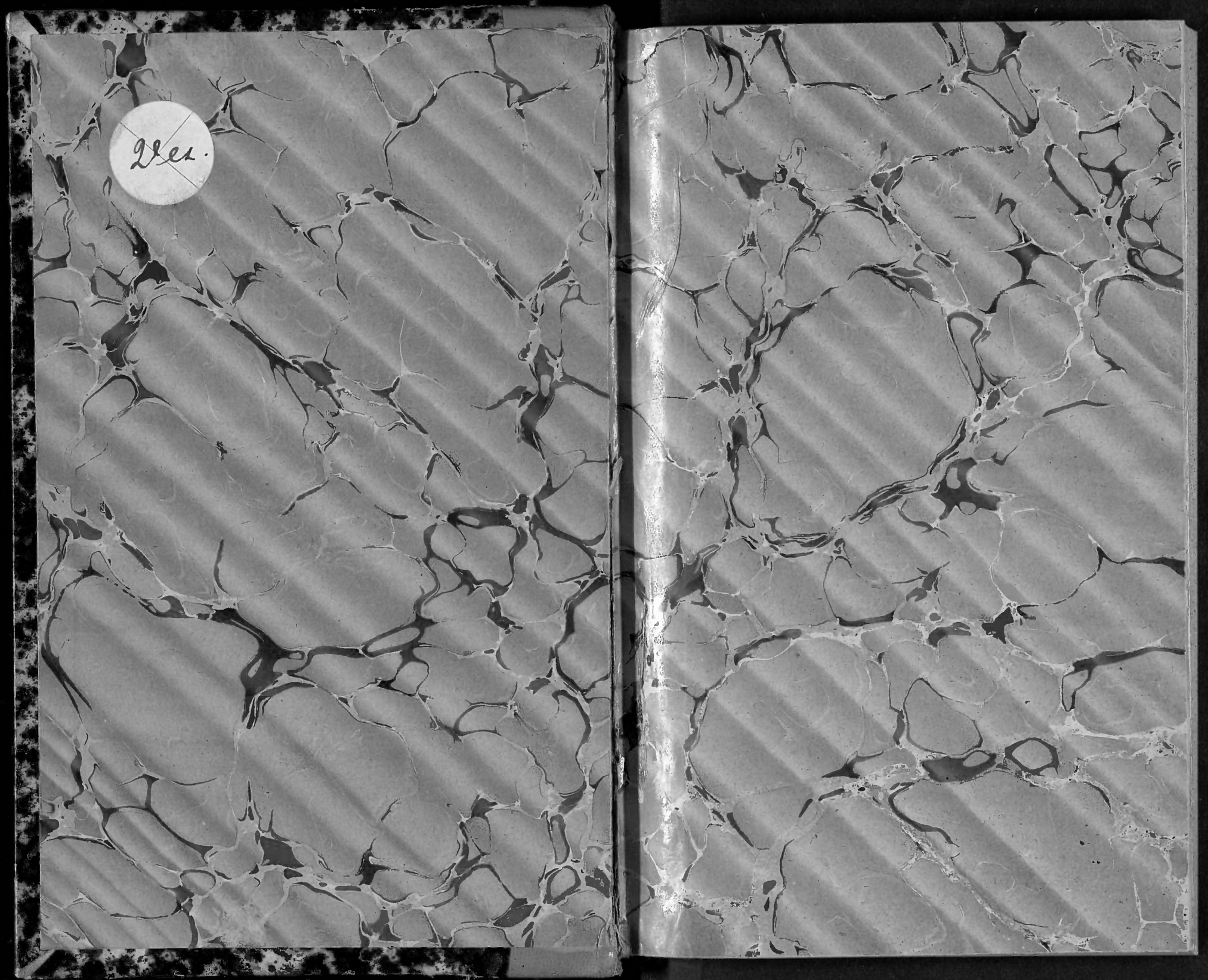
22 L.



Des.

ANNALES

DES MINES



Les Annales des Mines sont publiées sous les auspices de l'Administration des Mines et sous la direction d'une commission spéciale, nommée par le Ministre des travaux publics. Cette commission, dont font partie le directeur des routes, de la navigation et des mines et le chef du cabinet, du personnel et du secrétariat, est composée ainsi qu'il suit :

MM.

Linder, inspecteur général des mines, *président*.

Castel, inspecteur général.

Haton de la Goupillière, inspecteur général, directeur de l'École supérieure des mines.

Orsel, inspecteur général.

Résal, inspecteur général, professeur à l'École supérieure des mines.

Mallard, d°

Lorieux, inspecteur général.

Massieu, d°

Laur, d°

Villot, d°

Peslin, d°

Cheysson, inspecteur général des ponts et chaussées, professeur à l'École supérieure des mines.

MM.

Keller, ingénieur en chef, secrétaire de la Commission de la statistique de l'industrie minérale et des appareils à vapeur.

Vicaire, ingénieur en chef, professeur à l'École supérieure des mines.

Carnot, ingénieur en chef, inspecteur de l'École supérieure des mines.

Aguillon, ingénieur en chef, professeur à l'École supérieure des mines.

Ledoux, d°

Douvillé, d°

Bertrand, d°

Le Chatelier, d°

Lodin, d°

Sauvage, ingén. des mines, professeur à l'École supérieure des mines.

De Launay, d°

Zeiller, ingénieur en chef, *secrétaire de la commission*.

L'Administration a réservé un certain nombre d'exemplaires des Annales des Mines pour être envoyés soit, à titre de don, aux principaux établissements nationaux et étrangers, consacrés aux sciences et à l'art des mines, soit à titre d'échange, aux rédacteurs des ouvrages périodiques, français et étrangers, relatifs aux sciences et aux arts.

Les lettres et documents concernant les Annales des Mines doivent être adressés, *sous le couvert de M. le Ministre des travaux publics*, à M. l'ingénieur en chef, secrétaire de la commission des Annales des Mines.

Les auteurs reçoivent *gratis* 20 exemplaires de leurs articles.

Ils peuvent faire faire des tirages à part, à raison de 9 francs par feuille jusqu'à 50, 10 francs de 50 à 100, et 5 francs en plus pour chaque centaine ou fraction de centaine à partir de la seconde. — Le tirage à part des planches est payé 10 francs par planche et par cent exemplaires ou fraction de centaine. Les planches extraordinaires sont payées au prix de revient.

Le brochage, y compris couverture imprimée et faux frais, est payé, pour une feuille seule ou une fraction de feuille, 3 francs le premier cent et 1f,25 pour chaque centaine ou fraction de centaine en plus. Pour chaque planche, ou chaque nouvelle feuille de texte, il sera payé 0f,25 par chaque centaine d'exemplaires.

La publication des Annales des Mines a lieu par livraisons, qui paraissent tous les mois.

Les douze livraisons annuelles forment trois volumes, dont deux consacrés aux matières scientifiques et techniques, et un consacré aux actes administratifs et à la jurisprudence. Ils contiennent ensemble 120 feuilles d'impression et 24 planches gravées environ.

Le prix de l'abonnement est de 20 francs pour Paris, de 24 francs pour les départements et de 28 francs pour l'étranger.

PARIS. — IMP. C. MARPON ET E. FLAMMARION, RUE RACINE, 26.

ANNALES

DES MINES

OU

RECUEIL

DE MÉMOIRES SUR L'EXPLOITATION DES MINES

ET SUR LES SCIENCES ET LES ARTS QUI S'Y RATTACHENT

RÉDIGÉES ET PUBLIÉES

SOUS L'AUTORISATION DU MINISTRE DES TRAVAUX PUBLICS.

NEUVIÈME SÉRIE

MÉMOIRES. — TOME IV



PARIS

Vve Ch. DUNOD, ÉDITEUR

LIBRAIRE DES CORPS NATIONAUX DES PONTS ET CHAUSSÉES, DES MINES ET DES TÉLÉGRAPHES

Quai des Augustins, 49

1893

433
(4)

ANNALES
DES MINES

SUR LA DÉTERMINATION DU PHOSPHORE DANS LES FERS, LES ACIERS ET LES FONTES

Par M. Adolphe CARNOT, Ingénieur en chef des mines, Professeur à l'École supérieure des mines.

BIBLIOTHÈQUE
Entrée
1 1re

On sait que les aciers et les fers de bonne qualité ne peuvent renfermer qu'une très petite proportion de phosphore et que quelques dix-millièmes de cet élément suffisent à modifier beaucoup les propriétés du métal. Aussi attache-t-on la plus grande importance à une détermination exacte de la teneur en phosphore.

De nombreuses méthodes ont été proposées et donnent, dans les différents laboratoires, des résultats souvent peu concordants. La méthode que je viens d'étudier, fondée comme la plupart des autres sur l'emploi du molybdate d'ammoniaque, fournit, avec moins de peine, des résultats plus réguliers et plus sûrs.

Elle en diffère : 1° par le mode de séparation et de dosage du silicium, qui se fait au moyen de l'acide sulfurique; 2° par le mode de destruction des composés du carbone, où l'on se sert de l'acide chromique; 3° par la nature du composé final: ce composé n'est plus le pyrophosphate de magnésie, contenant 27,928 p. 100 de phosphore, mais le phosphomolybdate d'ammoniaque desséché, qui, obtenu par une seconde précipitation dans des conditions toujours identiques, présente une composition constante. Il ne renferme que 1,628 p. 100 de phosphore, c'est-à-dire 17 fois moins que le pyrophosphate. De là une précision beaucoup plus grande dans le dosage.

Je me suis attaché à éviter la calcination de l'azotate de fer, l'emploi de l'acide chlorhydrique, enfin la transformation du phosphomolybdate en pyrophosphate de magnésie, qui sont autant de causes d'inexactitude.

On opère sur une prise d'essai de 5 grammes pour les fers, les aciers ou les fontes pures; il suffirait de 1 gramme ou même $0^{gr},500$ pour les fontes phosphoreuses.

Le métal est attaqué par 40 centimètres cubes d'acide nitrique pur dans une capsule de porcelaine assez grande, qu'on recouvre aussitôt d'un entonnoir renversé, afin d'éviter les projections de gouttelettes liquides. Quand l'effervescence s'arrête, on chauffe doucement pour compléter l'attaque et on lave l'entonnoir avec un peu d'eau, qu'on reçoit dans la capsule. On y verse, tout en agitant le liquide avec une baguette de verre, 10 centimètres cubes d'acide sulfurique concentré (2 centimètres cubes par gramme de métal). Il se produit un magma volumineux, qui se redissout par l'agitation et la chaleur. On évapore doucement soit sur un petit brûleur à couronne, en remuant constamment pendant un quart d'heure, soit en laissant au bain de sable pendant un temps plus long; la masse devient bientôt pâteuse, puis se dessèche et se réduit en grumeaux faciles à écraser avec la baguette.

On porte à l'étuve et on maintient à une température de 120 à 125 degrés pendant deux heures, de manière à chasser entièrement l'acide azotique et à rendre la silice bien insoluble dans toute la masse. On redissout ensuite par 50 centimètres cubes environ d'eau bouillante et on lave avec une égale quantité d'eau sur un filtre, en recevant le liquide dans une fiole de 1/2 litre.

La silice reste sur le filtre, elle est habituellement colorée en noir ou en gris par le graphite et peut être mêlée de peroxyde de manganèse.

On dissout ce dernier, au-dessus d'une autre fiole, par un peu d'acide chlorhydrique concentré et on lave à l'eau chaude. On calcine, pour brûler le graphite, et on pèse la silice, qui est devenue blanche. Ce poids, multiplié par le coefficient 0,4667, fournit un dosage exact du *silicium*, comme dans la méthode de Drown et Shimer.

Le liquide filtré contient des composés organiques, provenant de la transformation du carbure de fer sous l'action des acides, et qui pourraient gêner la précipitation de l'acide phosphorique.

Pour brûler la matière organique, on ajoute environ 1 gramme d'acide chromique et l'on chauffe pendant une demi-heure à la température d'ébullition. Cette opération a, de plus, l'avantage de ramener sûrement à l'état d'acide orthophosphorique le peu d'acide pyrophosphorique qui aurait pu se former pendant l'évaporation à sec.

On ajoute à la liqueur 4 grammes de sulfate d'ammoniaque, puis on y verse 50 centimètres cubes de la solution molybdique à 5 p. 100 environ, préparée comme de coutume (*), et on maintient à 100° pendant une heure au

(*) La solution molybdique se prépare en dissolvant dans l'eau 150 grammes de molybdate d'ammoniaque cristallisé, étendant à 1 litre, puis versant dans 1 litre d'acide nitrique à 1,20 de densité, laissant trois ou quatre jours à la température de 60° et séparant le dépôt par décantation, pour ne se servir que de la liqueur claire.

moins, temps nécessaire pour que la précipitation soit bien complète. On laisse reposer et refroidir, puis on décante le liquide sur un filtre et on lave le dépôt dans la fiole avec de l'eau tiède additionnée d'un vingtième de la solution molybdique, jusqu'à ce que le liquide versé sur le filtre ne se colore plus que très faiblement en rose par le sulfocyanure d'ammonium, c'est-à-dire ne contienne plus que des traces négligeables de fer.

En même temps, on s'assure que la solution, portée de nouveau à 100° pendant une heure, ne fournit pas d'autre dépôt de phosphomolybdate (*).

On dissout alors le précipité dans la fiole par 30 centimètres cubes d'ammoniaque, étendue de son volume d'eau chaude, et, plaçant sur un petit matras de 150 centimètres cubes l'entonnoir avec le filtre sur lequel on avait décanté la liqueur acide, on y fait passer la solution ammoniacale, on lave la fiole et le filtre avec 50 centimètres cubes d'eau bouillante, un peu ammoniacale, en s'aidant de la trompe.

Le filtre a pu retenir de petites quantités d'hydrate et de phosphate ferrique; on les redissout par quelques gouttes d'acide nitrique étendu et chaud, que l'on ajoutera plus tard à la liqueur acide.

La solution ammoniacale, filtrée et refroidie, est peu à peu neutralisée par l'acide azotique, sans que la température s'élève au-dessus de 40°; lorsqu'il commence à se former en précipité jaune, que l'agitation ne redissout pas, on ajoute, en surplus, 3 centimètres cubes d'acide nitrique pur et la petite quantité d'acide dilué qui a servi à laver le filtre. On abandonne deux heures à la

(*) Il se produit souvent, en faible quantité, un dépôt d'acide molybdique, d'aspect plus cristallin, qui se dissout lentement dans l'ammoniaque étendue et froide et n'est pas précipité de nouveau, lorsqu'on acidifie la liqueur par l'acide nitrique à la température de 40 degrés.

température de 40° environ pour la précipitation du phosphomolybdate d'ammoniaque.

Le liquide est alors décanté sur un filtre taré et remplacé par de l'eau acidulée avec 1 p. 100 d'acide azotique. On y ajoute un peu de solution molybdique et on laisse pendant une heure, pour s'assurer qu'il ne se fait pas de dépôt.

Après deux ou trois lavages, on fait passer le précipité sur le filtre, on le lave à la trompe avec un peu d'eau distillée, on le sèche à l'étuve à 100° et on le pèse dans un petit flacon spécial à large ouverture, où le filtre, bien que devenu un peu cassant, puisse entrer sans se briser.

Par cette seconde précipitation de phosphomolybdate d'ammoniaque, dans des conditions de température et d'acidité bien définies, on obtient un produit de composition constante, exempt de fer et sans excès d'acide molybdique, ce qu'on ne pourrait avoir régulièrement par la première précipitation, faite à température plus élevée, en présence d'un assez grand excès de liqueur molybdique et d'une grande quantité de sels de fer.

Le poids du phosphore contenu s'obtient en multipliant le poids du précipité desséché par le coefficient 0,01628.

Comme on a attribué au phosphomolybdate d'ammoniaque plusieurs compositions différentes, il m'a paru nécessaire d'en faire l'objet d'un examen spécial.

L'analyse a été faite en dissolvant par l'ammoniaque et précipitant successivement l'acide phosphorique par la mixture magnésienne, le molybdène par l'hydrogène sulfuré et l'acide chlorhydrique, puis pesant d'une part le pyrophosphate de magnésie, d'autre part le sulfure de

molybdène après calcination modérée dans l'hydrogène; l'ammoniaque a été dosée volumétriquement après distillation avec une lessive de potasse; l'eau a été conclue par différence.

Les résultats conduisent à la formule :

(En équivalents) $PhO^5.24MoO^3.3AzH^4O.3HO.$
(En atomes) $P^2O^5.24MoO^3.3(AzH^4)^2O.3H^2O.$

	Trouvé.	Calculé.	
Acide molybdique.	90.720	90.756	
Acide phosphorique.	3.680	3,729	(d'où Ph = 1,628 p. 100)
Ammoniaque.	4.168	4.097	
Eau	1.432	1.418	
	100.000	100.000	

On avait précédemment attribué au phosphomolybdate d'ammoniaque les formules de composition suivantes :

						p. 100.
H. Debray (1868).	$PhO^5.$	$20MoO^3.$	$3AzH^4O.$	$3HO,$	d'où	Ph = 1,918
C. Rammelsberg (1877).	$PhO^5.$	$22MoO^3.$	$3AzH^4O.$	$12HO$		Ph = 1,684
R. Finkener (1878) . . .	$3PhO^5.$	$72MoO^3.$	$8AzH^4O.$	HO		Ph = 1,656
W. Gibbs.	$2PhO^5.$	$48MoO^3.$	$5AzH^4O.$	$16HO$		Ph = 1,597

SUR
LA DÉTERMINATION DU PHOSPHORE
DANS LES TERRES VÉGÉTALES

Par M. ADOLPHE CARNOT, Ingénieur en chef des mines,
Professeur à l'École supérieure des mines.

La recherche du phosphore dans les terres végétales peut être simplifiée par des moyens analogues à ceux que j'ai précédemment indiqués pour la recherche du phosphore dans les aciers (*); cependant la grande dissemblance des matières entraîne naturellement des différences correspondantes dans les opérations.

En premier lieu, le mode de destruction des composés carbonés par l'acide azotique concentré et l'acide chromique, qui convenait très bien aux aciers, ne suffit plus pour les terres végétales, du moins celles où l'humus se trouve en quantité importante; un grillage préalable est alors nécessaire pour faire disparaître la majeure partie des matières organiques.

En second lieu, l'emploi de l'acide sulfurique pourrait occasionner de grandes difficultés avec les terres, à cause de la formation d'une quantité plus ou moins grande de sulfate de chaux peu soluble. Mais j'ai reconnu que l'on pouvait ici se dispenser d'isoler la silice, à la condition d'employer plus tard, comme dans le cas des aciers, la méthode de double précipitation du phosphomolybdate (méthode qui se recommande déjà pour d'autres motifs,

(*) *Comptes rendus*, 16 janvier 1893, et *Ann. des mines*, *supra*.

notamment parce qu'elle permet d'obtenir un précipité final de composition bien définie). Je me suis assuré en effet que le dosage de l'acide phosphorique n'est pas altéré de plus d'un demi-centième lorsque l'on a introduit une quantité importante de silicate de soude dans la liqueur nitrique avant l'addition du nitromolybdate.

Dès lors, la recherche de l'acide phosphorique dans les terres végétales peut se faire de la manière suivante.

On prend 10 grammes de terre tamisée et séchée à 100°; si elle contient beaucoup de matières organiques, on les détruit le mieux possible par un grillage à température très modérée, qui serait inutile pour des terres pauvres en humus ou pour des échantillons de sous-sol.

On verse alors dans la capsule, d'abord un peu d'eau pour imbiber la terre, puis de l'acide azotique par petites quantités, jusqu'à ce qu'il ne se produise plus d'effervescence. Quand elle est terminée, on ajoute encore 10 centimètres cubes du même acide et on laisse pendant deux heures au bain-marie ou au bain de sable, vers 100°, en remuant de temps en temps avec la spatule de platine ou la baguette de verre et remettant, au besoin, un peu d'acide pour empêcher la matière de se dessécher.

On reprend par l'eau chaude, on filtre et on lave le résidu insoluble. Le liquide est ensuite concentré et, lorsque son volume est réduit à une cinquantaine de centimètres cubes, on ajoute 5 centimètres cubes d'acide azotique concentré et 1/2 gramme environ d'acide chromique en cristaux; puis, plaçant un petit entonnoir sur la fiole pour y faire retomber les vapeurs condensées, on chauffe à l'ébullition pendant une demi-heure, afin de rendre complète la destruction de la matière organique, commencée par le grillage.

On ajoute à la liqueur 5 grammes d'azotate d'ammoniaque, destinés à hâter la précipitation de l'acide phosphorique, et ensuite 50 centimètres cubes de la solution

nitrique de molybdate d'ammoniaque. On chauffe vers 100° pendant une heure sur le bain-marie ou le bain de sable. La précipitation se fait en ce temps d'une manière complète, grâce aux proportions élevées de solution molybdique et de nitrate d'ammoniaque.

Après avoir laissé déposer, on décante le liquide clair, on remet dans la fiole un peu d'eau acidifiée par 1/20 de son volume de la solution molybdique, on agite, on laisse déposer et on décante encore deux fois, en faisant passer le liquide sur un petit filtre plat, qui retient les parcelles de précipité entraînées dans le lavage.

Le précipité est alors traité dans la fiole et sur le filtre par 30 centimètres cubes d'ammoniaque additionnée d'un égal volume d'eau chaude. Le lavage est achevé avec 50 centimètres cubes d'eau chaude, rendue légèrement ammoniacale, et tout le liquide est reçu dans un petit matras où on le laisse refroidir.

On y verse doucement de l'acide azotique étendu jusqu'à neutralisation de la liqueur ammoniacale, en ayant soin d'aller lentement et de refroidir au besoin le matras, pour éviter que la température s'élève au-dessus de 40 degrés. Lorsque le précipité jaune de phosphomolybdate cesse de se redissoudre par agitation du liquide, c'est-à-dire lorsque la liqueur ammoniacale a été neutralisée, on ajoute encore 3 centimètres cubes d'acide nitrique pur, mêlés de 4 à 5 centimètres cubes d'eau et autant de solution molybdique. On laisse en repos pendant deux heures à la température de 40 degrés, puis on fait passer le liquide et le précipité sur un filtre taré; on achève le lavage avec un peu d'eau tenant 1/100 d'acide azotique, puis avec un peu d'eau pure, en s'aidant de la trompe, on sèche à l'étuve à 100 degrés et on pèse aussitôt (*).

(*) Il n'est guère possible d'éviter qu'il se produise une légère coloration bleue dans les parties du précipité qui touchent au papier; mais le poids n'est pas sensiblement affecté par ce com-

Le poids trouvé, multiplié par le coefficient 0,0373, donne la proportion d'acide phosphorique contenue dans les 10 grammes de terre soumis à l'analyse.

Ce procédé de dosage de l'acide phosphorique offre les mêmes garanties d'exactitude que celui recommandé par le *Comité consultatif des stations agronomiques et des laboratoires agricoles*, au nom duquel a été publié, en 1891, un important rapport destiné à l'unification des *Méthodes d'analyse des terres*.

La variante que je propose a l'avantage d'abréger de moitié environ la durée de l'opération, tout en fournissant les mêmes résultats, ainsi que j'ai pu le constater par l'analyse, faite comparativement par les deux procédés, de différents échantillons de terres, les unes granitiques, les autres argilo-calcaires.

Le coefficient que j'ai donné plus haut, pour passer du poids du phosphomolybdate à celui de l'acide phosphorique, diffère de celui qui figure dans le rapport du Comité (0,043); mais le Comité lui-même a depuis reconnu l'inexactitude de ce dernier nombre.

Le coefficient 0,0373 (ou, à très peu près, 0,037) est celui qui résulte de l'analyse directe et de la formule de composition du phosphomolybdate :

$$PO^5.24\,MoO^3.3\,AzH^4O + 3\,HO.$$

---

mencement de réduction du phosphomolybdate, si l'on ne prolonge pas trop longtemps l'action de la chaleur.

NOTICE

SUR LA

MINE D'ANTIMOINE DE FREYCENET

Par M. P.-L. BURTHE, Ingénieur civil des mines.

Situation. — La concession de Freycenet est située à 6 kilomètres à l'ouest de Lavoute-Chilhac, chef-lieu de canton de l'arrondissement de Brioude (Haute-Loire). Elle lui est reliée par une bonne route qui monte d'une façon continue de Lavoute (alt. 470^m) au lieu dit la Baraque-de-Freycenet, point à peu près central de la concession (alt. 980^m).

Lavoute est sur l'Allier. La voie ferrée de Clermont à Nîmes en passe à 22 kilomètres (gare de Brioude); 11 kilomètres (gare de Saint-Georges d'Aurac); 13 kilomètres (gare de Langeac).

La concession, instituée par décret en date du 26 mai 1855, a une superficie de 232 hectares. Elle est limitrophe, au sud-est, de la concession de plomb argentifère et antimoine de Promeyrat.

Topographie. — La topographie du terrain concédé est simple. Un étroit plateau, orienté de l'est à l'ouest (qu'on désigne du nom de plateau de Freycenet), s'abaissant brusquement au nord vers le ruisseau de la Licoulne, au sud vers le ruisseau de Promeyrat, et dominant les thalwegs de ces vallées de près de 200 mètres, se soude, à

peu près à la hauteur de la Baraque-de-Freycenet, à un autre plateau nord-sud (qu'on désigne du nom de plateau de Mont-Rome), limité à l'est par un grand ravin qui le sépare du plateau de Freycenet et à l'ouest par le ravin de la Rhode. Quand on franchit ce dernier ravin, en se dirigeant vers l'ouest, on s'élève par une pente douce sur un troisième et large plateau, dit de la Rhode.

Terrains. — Au point de vue géologique, le ravin de la Rhode joue un rôle important : c'est une cassure nord-sud, profonde de 80 mètres environ, qui sépare des roches différentes : à l'est, micaschistes ; à l'ouest, gneiss. Ces roches sont désignées, sur la carte géologique détaillée, par la caractéristique unique ζ^1. Elles sont bien distinctes pour le mineur, qui envisage surtout leur influence sur les allures des filons qu'elles renferment.

Les micaschistes, tels qu'on les voit dans les travaux, sont d'aspect et d'allures très variables. Les bancs sont minces, fortement inclinés. Sur le plateau de Freycenet, ils sont dirigés de l'est à l'ouest et plongent au sud ; puis ils s'infléchissent et prennent la direction nord-sud sur le plateau de Mont-Rome où ils plongent vers l'est. Ils sont fréquemment gauchis ; mais ces accidents paraissent plus fréquents à la surface qu'en profondeur. Leur dureté est médiocre, le mètre courant de galerie en travers-bancs y coûtant environ 50 francs. Néanmoins ils sont solides et demandent peu de boisage. Deux variétés paraissent avoir été peu propices à la richesse des filons : l'une, trop dure, est formée de petits lits minces, très feldspathiques, peu micacés, de couleur blanche légèrement teintée par de l'oxyde de fer ; l'autre, trop tendre, est formée presque exclusivement de feuilles de mica bronzé, larges d'un centimètre environ.

Les travaux de mines ont été encore trop peu développés dans le gneiss pour qu'on ait des renseignements

précis sur ses allures. Les percements ont montré jusqu'à présent une roche feldspathique, tendre, dont les bancs sont plus puissants, plus plats et plus réguliers que ceux des micaschistes ; leur orientation paraît se diriger de l'est à l'ouest.

On ne connaît pas dans l'étendue, ou le voisinage immédiat de la concession, de roches éruptives autres que quelques granulites (γ^1 de la carte géologique détaillée) en filons peu importants et sans influence apparente sur les filons de minerai. On rencontre quelquefois, disséminés dans les abatages, au contact du minerai d'antimoine, des rognons d'une roche amphibolique verte, sans suite et trop rare pour qu'on ait pu déterminer ses relations possibles avec le minerai.

Filons. — On connaît actuellement dans la concession de Freycenet sept filons d'antimoine, trois filons de minerais complexes plombo-antimonieux et argentifères, et un filon de galène argentifère. On rencontre ces filons, de l'est à l'ouest, dans l'ordre suivant :

Sur le plateau de Freycenet :	
1° Filon des Ardennes, galène argentifère. Direction.	S.-E.-N.-O.
2° Filon n° 1 de Freycenet, antimoine	E.-O.
3° Filon n° 2 — —	E.-O.
4° Filon du Rouaire, antimoine.	E.-O.
Sur le plateau de Mont-Rome :	
5° Filon du puits Martin, antimoine.	N.-S.
6° Filon Annie, antimoine.	N.-S.
Sur le plateau de La Rhode :	
7° Filon Saint-Thomas, antimoine.	N.-S.
8° Filon de La Rhode, minerai complexe.	E.-O.
9° Filon de Jeancenet, comprenant :	
Un filon de minerai complexe	?
Un filon d'antimoine	E.-O.
10° Filon non dénommé (entre les filons 8° et 9°) minerai complexe.	E.-O.

Outre ces filons, dont l'existence n'est pas douteuse, il existe dans la concession des indices qui portent à croire que d'autres gisements y seront ultérieurement découverts, principalement sur le plateau de Freycenet.

Les travaux d'exploitation ont porté sur les filons d'antimoine. Des recherches seulement ont été faites sur les filons de galène et de minerai complexe.

§ 1. — FILONS D'ANTIMOINE.

Ces filons sont tous, sauf celui de Jeancenet, dans les micaschistes. Ils ont pour allure commune de couper, sous un angle faible, la direction des bancs de schistes et de plonger dans le même sens que ces bancs entre lesquels ils s'intercalent souvent.

Minerai et gangues. — Tous fournissent le même minerai : du sulfure d'antimoine très pur. Leurs affleurements renferment un peu d'oxyde jaune ou blanc, provenant évidemment de l'altération du sulfure.

La matière principale du remplissage des filons est le schiste encaissant lui-même ou bien un quartz bleuâtre, très sec et compact, parsemé de fines aiguilles de sulfure quand le filon est pauvre, et disparaissant presque entièrement quand le filon s'enrichit. La pyrite de fer est peu abondante, plus marquée dans les filons nord-sud que dans les filons est-ouest. On trouve quelquefois de la calcite, blanche ou rose; quelques traces de blende, jamais de plomb ni d'arsenic. Le minerai n'est du reste ni aurifère, ni argentifère.

Mode de répartition du minerai. — Le mode de répartition du minerai dans les filons n'est assez bien connu que dans les filons nos 1 et 2 de Freycenet, les seuls qui aient été l'objet d'une exploitation suivie; mais il y est

suffisamment net et découle trop évidemment des allures respectives des filons et du terrain encaissant pour ne pas être analogue dans les autres filons, sauf peut-être celui de Jeancenet. Les parties riches forment dans le plan du filon une série de petits amas de minerai presque pur, séparés les uns des autres par des parties pauvres ou même tout à fait stériles, et dont l'ensemble constitue une colonne plongeant vers le sud. Le volume des noyaux riches ne dépasse pas un petit nombre de mètres cubes; leur puissance atteint jusqu'à $0^m,60$.

Filon n° 1. — Dans le filon n° 1 de Freycenet, les amas sont complètement isolés les uns des autres par des intervalles stériles de 5 à 6 mètres de longueur horizontale dans lesquels ne subsiste pas la plus mince fissure pouvant guider d'un amas à l'autre. Dans le sens vertical, on est au contraire guidé dans le passage d'un amas au suivant par une petite fente argileuse qui semble être le témoin d'un arrachement du filon, plutôt antérieur que postérieur au dépôt du minerai, à en juger par l'aspect de celui-ci. L'ensemble de ces amas forme, dans ce filon n° 1, une colonne de 60 mètres de longueur horizontale qui a été exploitée sans interruption sur une hauteur de 50 mètres. Dans la partie exploitée, le filon est orienté sur le Nord 78° Est (magnétique) s'infléchissant sur le Nord 85 à 88° Est dans les parties pauvres. Il plonge au sud sous des angles variant de 65 à 70°. A l'est, il est coupé par une faille argileuse Nord 70° Est, presque verticale, au delà de laquelle il n'a pas été encore retrouvé, bien que des indices superficiels rendent son prolongement certain. A l'ouest, il est aussi coupé par un glissement nord-sud, très plat et plongeant vers l'est. De ce côté non plus, on ne l'a pas retrouvé; on a cependant exploité par le puits dit de Boudon, situé sur le prolongement vers l'ouest de la direction du filon, une

veine qui présente les mêmes caractères. Fréquemment le toit du filon est sillonné de petites veinules de minerai massif, de $0^m,01$ à $0^m,02$ d'épaisseur, qui constituent un très bon minerai de lavage, inutilisé jusqu'à ce jour.

Filon n° 2. — Le filon n° 2 est plus régulier, plus quartzeux, et le quartz persiste dans les passages stériles où il devient plus blanc. Il court parallèlement au filon n° 1 et à 40 mètres au nord de celui-ci, distance mesurée à la surface. Son pendage, qui est aussi vers le sud, est un peu plus raide et ne s'éloigne pas beaucoup de 80°. Les deux filons tendent donc à se rapprocher en profondeur. On a exploité sur ce filon une colonne de 63 mètres de longueur horizontale sur une hauteur verticale de 98 mètres. A l'ouest, il se perd dans des micaschistes tendres. A l'est, il se bute contre un croiseur quartzeux encore mal défini.

Exploitation. Historique. — La première exploitation d'antimoine paraît avoir été ouverte sur le filon Annie, tout près du village de Mont-Rome, où on voit encore les traces d'un vieux puits et les restes d'un atelier de liquation. En 1854, on découvrit le filon n° 2 de Freycenet, sur lequel l'inventeur Lherbet fonça le puits qui porte son nom. Il demanda une concession. Des concurrents foncèrent en même temps, à une centaine de mètres à l'ouest, le puits de Boudon, éboulé aujourd'hui, mais dont on voit encore les traces et qui semble être à l'aplomb d'un remontage, dit de Girardin, ouvert sur le filon n° 1. La concession ayant été instituée en faveur de Lherbet, celui-ci exploita le filon n° 2 par le puits indiqué, jusqu'à ce qu'il fût gêné par les eaux, à 35 mètres de profondeur. Il ouvrit alors une galerie d'écoulement ou *adit* qui, amorcée au nord des affleurements, dans le ravin qui sépare les plateaux de Freycenet et de Mont-Rome, vint

recouper le filon n° 2, après un parcours de 288 mètres, à la profondeur de 78 mètres au-dessous de l'affleurement. Cette galerie révéla l'existence du filon n° 1, dont les affleurements avaient été méconnus. Lherbet dépouilla le filon n° 2, complètement entre le jour et le fond de son puits, et, en grande partie, jusqu'au niveau de l'adit. Ses successeurs achevèrent ces abatages et dépouillèrent le filon n° 1 en partant de l'adit jusqu'à une hauteur d'une vingtaine de mètres; au-dessous de l'adit, sur ce même filon, ils foncèrent deux petites descenderies, qu'ils réunirent, à la profondeur de 22 mètres, par une galerie en direction.

Tout le service se faisait par l'adit, le puits Lherbet ayant été abandonné et s'étant éboulé, après l'ouverture de cette galerie.

C'est cet ensemble de travaux isolés les uns des autres, sans aménagements et sans continuation possible en profondeur, qui portait le nom de mine de Freycenet.

Après un assez long chômage causé par des procès et le bas prix de l'antimoine, la compagnie des mines de Bonnac, qui avait découvert le filon de minerai complexe de la Rhode et qui en demandait la concession pour plomb et argent sur un périmètre superposé en partie à celui de Freycenet, acheta cette dernière concession et reprit les travaux. Elle n'envisageait, au début, qu'une exploitation temporaire; mais les circonstances la conduisirent à aménager la mine d'une façon régulière en vue d'une exploitation permanente. Dans ce but, elle déblaya le vieux puits de Lherbet, le réunit au filon n° 1 à la profondeur de 30 mètres, puis le fonça à 98 mètres et le réunit, par des travers-bancs: d'abord à l'adit (dont l'axe passe à 33 mètres à l'ouest de l'axe du puits), puis au filon n° 2, à 20 mètres en contre-bas de l'adit. Elle assura ainsi l'aérage, l'extraction et l'épuisement de sa mine en profondeur. En même temps, elle abattit le filon

n° 1 au-dessous de l'adit, et au-dessus jusqu'à 30 mètres du jour; — et le filon n° 2 jusqu'à la profondeur de 98 mètres atteinte par le puits.

Ces divers travaux d'aménagement représentent une longueur totale de 323m,90, dont :

Puits et cheminées	112m,65
Galeries en direction	152 ,05
Recoupes et travers-bancs	59 ,20

Ils ont coûté au total 36.146f,70, dont 16.622f,59 ont été consacrés au puits Lherbet.

Le puits mesure 2m,60 × 1,30 = 3m²,38. Il est divisé en trois compartiments de 0,65 × 0,85, mesures prises à l'intérieur des bois qui ont : les cadres, 0,15 × 0,15; les cloisons, 0,05 × 0,15; le coulantage, 0,025. La restauration de la partie ancienne du puits (36m,90) a coûté 2.936f,71. Le fonçage et l'installation de la partie neuve (61m,10) ont coûté 13.685f,88, ce qui fait ressortir à 223f,97 le coût du mètre courant, tout compris. Le fonçage proprement dit a employé :

			Par mètre
Main-d'œuvre.	Mineurs, 1.544 journées à 4f,82 = 7.448f,81 Manœuvres, 383 journées à 3f,07 = 1.179f,75	8.628f,56	141f,22
Explosifs		682 ,36	11 ,17
Forge		236 ,22	3 ,86
	Total	9.547f,14	156f,25

On a consommé 1kg,570 de dynamite par mètre courant.

Les galeries mesurent 1,50 × 1,80 en général et ont coûté : de 32 à 38 francs en direction sur les filons; de 45 à 56 francs en travers-bancs.

Exploitation. Résultats. — On ne connaît pas les résultats des exploitations antérieures à celle de la compagnie de Bonnac. On n'abattait alors que le minerai assez riche pour être liquaté; la liquation se faisait dans des pots en plein air. La compagnie de Bonnac a exploité en dix-neuf mois (de juin 1889 à décembre 1890), sur les deux filons de Freycenet, 3.478m²,65, dont 2.268,29

sur le filon n° 1 et 1.210,36 sur le filon n° 2. Cet abatage a produit 647.805 kilogrammes de minerai marchand, soit un rendement moyen de 179kg,1 par mètre carré de filon abattu.

Le minerai marchand était classé en trois catégories : 1° minerai riche à 50 p. 100 de métal et au-dessus; 2° minerai moyen à teneur comprise entre 50 et 30 p. 100; 3° minerai pauvre à teneur inférieure à 30 p. 100. Les 647.805 kilogrammes de minerais marchands se sont répartis en :

159.697 kilogr.	de la première catégorie, soit	24,6
57.010 —	de la seconde	8,8
431.098 —	de la troisième	66,6
647.806 kilogr.		100,0

Les rendements par mètre carré de filon ont été :

	1re catégorie.	2e catégorie.	3e catégorie.	Total.
Filon n° 1	57kg,2	23kg,9	82kg,9	164kg,0
Filon n° 2	34 ,2	8 ,4	152 ,2	194 ,8
Moyenne	45kg,9	16kg,4	116kg,8	179kg,1

La vente de 637.778 kilogrammes de minerai a produit une somme de 148.060f,69, soit en moyenne 232f,15 par tonne, se décomposant en :

Minerai de :			
1re catégorie.	Teneur moyenne, 55,45 p. 100	156.365 kg. à 659f,02	103.048f,88
2e catégorie.	— 36,00 p. 100	50.315 kg. à 206f,70	10.400f,45
3e catégorie.	— 16,04 p. 100	431.098 kg. à 80f,28	34.611f,36
Totaux et moyennes. . .	27,29 p. 100	637.778 kg. à 232f,15	148.060f,69

Les frais de vente et de transport (*) aux usines se sont élevés à 15.237f,49, soit en moyenne à 23f,89 par tonne, ce qui fait ressortir à 132.823f,20 la valeur du minerai

(*) Le transport de la tonne coûte :
3 francs de Freycenet à Lavoute et 8 à 10 francs de Lavoute à Freycenet;
5 à 6 francs de Lavoute à Saint-Georges-d'Aurac ou à Langeac, et *vice versa;*
6 à 7 francs de Lavoute à Brioude, et *vice versa.*

à la mine, à 208ᶠ,26 la valeur de la tonne et à 37ᶠ,29 la valeur du mètre carré de filon.

Les dépenses d'exploitation ont été :

1° *Dépenses proportionnelles au tonnage produit.*

Abatages	36.052ᶠ,57	61.189ᶠ,09
Extraction	4.637 ,75	
Roulage	4.945 ,81	
Préparation du minerai	15.552 ,96	

Soit 94ᶠ,42 par tonne.

2° *Dépenses indépendantes du tonnage.*

Travaux de recherche et aménagement (*)	19.524ᶠ,11	30.641 ,04
Épuisement	7.079 ,52	
Entretien des travaux	3.294 ,49	
Entretien de l'outillage	502 ,27	
Entretien des installations	240 ,60	
Total		91.830ᶠ,13

laissant une marge de 40.993ᶠ,07 pour les frais généraux et les bénéfices.

Le rapport de la valeur de la production aux dépenses, ou en quelque sorte le coefficient de productivité de la mine, s'est donc élevé à 1,448 et les deux facteurs de ce coefficient, savoir : le rapport de la valeur de la tonne aux frais spéciaux d'exploitation par tonne, d'une part, et, d'autre part, le rapport des frais indépendants du tonnage aux dépenses totales, ont atteint comme valeurs :

$$\text{le premier } \frac{208,26}{94,42} = 2,20, \text{ et le second } \frac{30\,641,04}{91\,830,13} = 0,346.$$

L'exploitation donne lieu aux remarques suivantes.

L'abatage a été opéré d'abord et pour la plus grande partie en régie, puis à la tâche. Le prix de revient moyen s'est élevé à 10ᶠ,37 par mètre carré ; il se décompose de la façon suivante :

(*) Non compris les dépenses extraordinaires de l'installation du puits Lherbet.

	ABATAGES A LA TACHE						ABATAGES EN RÉGIE								TOTAUX et MOYENNES	
	Filon n° 1		Filon n° 2		Total		Filon n° 1		Filon n° 2		Total					
	Total	par mètre carré	Total	par mètre carré	Total	par mètre carré	Total	par mètre carré	Total	par mètre carré	Total	par mètre carré			Total	par mètre carré
Nombre de mètres carrés.	501,12		236,41		737,53		1.763,15		977,97		2.741,12				3.478,65	
Nombre de journées	744 1/2	1,48	470	1,98	1.214 1/2	1,64	3.292	1,85	2.064	2,01	5.356	1,95			6.570 1/2	1,88
Main-d'œuvre	3.177,95	6,34	1.900,21	8,04	5.078,16	6,88	11.654,11	6,61	7.649,63	7,82	19.303,74	7,04			24.381,90	7,00
Explosifs	1.146,06	2,28	611,11	2,58	1.757,17	2,38	4.575,51	2,59	2.183,84	2,23	6.759,35	2,46			8.516,52	2,45
	4.324,01	8,62	2.511,32	10,62	6.835,33	9,26	16.229,62	9,20	9.833,47	10,05	26.063,09	9,50			32.898,42	9,45
Forge															1.857,75	0,54
Bois															1.135,80	0,35
Divers															100,60	0,03
Total															36.052,57	10,37

On voit par ces nombres que la dureté des filons est à peu de chose près la même, celle du filon n° 2 légèrement supérieure à celle du filon n° 1. On a employé comme explosifs la dynamite-gomme et la dynamite n° 1; la consommation moyenne par mètre carré de filon correspond à un peu plus de $0^{kg},300$ de dynamite n° 1. L'essai de la poudre comprimée n'a pas donné de résultats satisfaisants; il en eût peut-être été autrement avec des mineurs mieux exercés.

Le prix moyen de la journée a été de $3^{f},71$; il s'est élevé à $4^{f},18$ pour les mineurs à la tâche et s'est abaissé à $3^{f},60$ pour les mineurs en régie.

L'épuisement et l'extraction ont été faits au tour et à bras d'hommes, sauf pendant les cinq derniers mois de 1890, où l'aménagement de la mine a été suffisamment avancé pour permettre l'emploi d'un manège à chevaux sur le puits Lherbet. L'eau est peu abondante (de 50 à 80 litres par minute). Le poids de matière à extraire a été considérable parce que les filons, presque intercalés dans les bancs de schiste et plongeant dans le même sens qu'eux, donnent beaucoup de stérile à l'abatage, et que, faute de place dans la mine, ce stérile a dû être porté au jour.

La même observation s'applique au roulage: sur 100 wagons roulés provenant des abatages, 82 étaient des wagons de stérile et 18 seulement des wagons de minerai à préparer.

Le minerai n'a pas été liquaté; sa préparation a consisté presque uniquement en un triage à la main. Les matières sortant de la mine étaient culbutées et arrosées sur une grille en fonte, à barreaux espacés de $0^{m},02$. Les matières restant sur la grille étaient cassées au marteau, puis triées, les gros blocs ayant été au préalable concassés à la masse. Les matières traversant la grille et les résidus fins du triage étaient passés dans

une série de trommels, puis criblés. Toutes ces opérations étaient faites à bras d'homme; elles n'ont pas tiré parti de toutes les matières utiles, en particulier des matières fines et des fonds de cuve de crible qui seront repris quand l'exploitation disposera d'un meilleur outillage. Sur une dépense totale de $15.552^{f},96$, le triage a absorbé $12.383^{f},82$, soit environ les huit dixièmes. Il est nécessaire de pousser le triage aussi loin que possible, car la valeur du minerai augmente rapidement avec sa teneur, comme on en peut juger par les prix de vente ci-dessus qui montrent que la valeur du minerai à 55 p. 100 est trois fois plus grande que celle du minerai à 36 p. 100.

Des frais spéciaux de $94^{f},42$ par tonne pour une exploitation de 647.805 kilogrammes de minerai rendant en moyenne 27,29 p. 100 de métal font ressortir le prix de revient de la tonne de métal à $346^{f},36$. C'est un nombre un peu supérieur à celui que j'ai indiqué autre part (*) pour le prix auquel peut être produite la tonne d'antimoine en Auvergne. Mais il est manifeste, d'après les observations précédentes, que ces frais spéciaux, surtout en ce qui concerne l'extraction, le roulage et la préparation, pourront être notablement abaissés à Freycenet lorsque la mine sera plus ouverte, mieux outillée, et que les services seront concentrés à l'embouchure du puits Lherbet.

Il en sera de même des frais indépendants du tonnage. Les dépenses en travaux de recherche et d'aménagement ont été considérables. Il est certain que, étant donné le mode de répartition du minerai dans les filons, il sera nécessaire d'avoir toujours un grand nombre de chantiers d'abatage en activité pour compenser par les richesses des uns les faiblesses momentanées des autres. Les travaux de recherches et d'aménagement entraîne-

(*) *Annales des mines*, livraison d'août 1892.

ront donc toujours des dépenses notables, mais non pas excessives comme paraissent l'être celles indiquées ci-dessus.

Travaux de recherches. 1° **Filon Annie.** — La compagnie de Bonnac a déblayé, sur ce filon, un travers-bancs de 31^{m},50 de longueur aboutissant à un puits de 12 mètres de profondeur, dont 9^{m},50 au-dessus du niveau du travers-bancs et 2^{m},50 en contre-bas. Les anciens ont abattu le minerai sur les parois nord et sud du puits et sur une largeur de 0^{m},60. Le filon est en place au fond du puits, ne contenant pas de minerai massif, mais de bons morceaux de minerai de deuxième et troisième catégories, dans une veine quartzeuse de 0^{m},60, accompagnée d'une salbande argileuse de 0^{m},10 d'épaisseur. Sur ces indications favorables, la compagnie a attaqué ce filon par une galerie amorcée à 90 mètres au sud du puits et devant y aboutir à une profondeur de 25 mètres au-dessous de la surface. Ce travail de reconnaissance, destiné en même temps à devenir la galerie d'écoulement de l'exploitation future, n'a point découvert de massif important de minerai, résultat peu surprenant étant donnée la très faible charge de terrain sur la couronne de la galerie; mais il a prouvé qu'on avait affaire à un filon bien défini, orienté sur le Nord 22° Est (m.), plongeant vers l'ouest sous un angle de 80° et puissant de 0^{m},60 à 0^{m},75. On y a trouvé du minerai tantôt massif en rognons disséminés dans le schiste argileux, tantôt imprégnant un quartz bleuâtre et un peu pyriteux.

2° **Filon Saint-Thomas.** — Ce filon avait été autrefois l'objet d'une exploitation peu étendue et qui ne pouvait prendre de développement à cause de la disposition défavorable du terrain où elle avait été entamée. Un petit puits avait été foncé sur le filon dans le fond même du ravin de la Rhode. On y avait découvert du bon minerai massif,

mais difficile à extraire sans travaux coûteux et sans installations de surface. Ce puits avait été abandonné et même oublié quand les recherches pratiquées sur le filon de minerai complexe de la Rhode, ayant recoupé ce filon Saint-Thomas, rappelèrent le souvenir de ces anciens travaux. Le filon de minerai complexe, est-ouest, coupe et rejette très légèrement à main gauche le filon Saint-Thomas, qui est orienté sur le Nord 22° Est et plonge vers l'est sous un angle de 70°. La compagnie de Bonnac a reconnu ce filon sur une longueur de 30 mètres par une galerie dirigée vers le sud, et n'a trouvé dans cette région que des minerais à basse teneur. Elle n'a pas poussé plus loin cette recherche qui, pour être poursuivie avec chance de succès et économie, doit être menée plus profondément et en même temps que les recherches sur les filons de minerai complexe.

3° **Filon du Rouaire.** — Sur ce filon on a foncé un puits de 16 mètres de profondeur et poussé 9 mètres de galerie en direction, dans lesquels le filon s'est montré moyennement minéralisé. Cette recherche est pleine d'intérêt, car ce filon du Rouaire est probablement le prolongement vers l'ouest du filon n° 1 ou du filon n° 2 de Freycenet.

4° **Filon de Jeancenet.** — Ce filon a été ouvert par une galerie en direction de 17 mètres de longueur, prise à flanc de coteau. Le filon est quartzeux et, sur cette longueur, ne donne que du minerai à basse teneur; mais il est régulier et a plus de 1 mètre de puissance. Il est placé de telle sorte qu'on pourrait l'exploiter sur 75 mètres de hauteur avec écoulement naturel des eaux et du minerai par des galeries d'allongement. Il est très possible qu'un tel filon, rendant à bon marché un fort tonnage de minerai à basse teneur, mais immédiatement marchand, soit d'une exploitation au moins aussi avantageuse que les filons à petits amas de minerai riche. Un filon de

minerai complexe vient s'accoler au filon d'antimoine au fond de la galerie; leurs relations ne sont pas encore déterminées.

§ 2. — FILONS PLOMBEUX ET ARGENTIFÈRES.

Filon de la Rhode. — L'attention a été appelée sur ces gisements par la découverte du filon de la Rhode. Les premiers indices trouvés furent des débris de matières scoriacées, de quartz et de sulfate de baryte avec mouches de minerai, paraissant provenir du cassage et de la fusion de minerais, qui jonchaient le sol sur une longueur horizontale de près de 300 mètres et sur une ligne est-ouest. L'examen soigné du terrain amena bientôt la découverte d'une ancienne galerie d'écoulement, creusée à la pointerolle et présentant tous les caractères d'une haute antiquité, qui débouche au fond du ravin de la Rhode. On la déblaya et elle conduisit, au bout de 63 mètres, à d'anciens abatages éboulés, jadis pratiqués sur un filon de quartz calcédonieux, à teintes variables, mais principalement rouge ou noir, accompagné d'une petite quantité de barytine et parsemé de filets de galène antimoniale très argentifère.

Deux analyses, opérées au Bureau d'essai de l'École des mines de Paris, ont indiqué pour ce minerai la composition suivante :

	I.	II.
Plomb	25,64	12,90
Antimoine	3,30	9,00
Zinc	5,60	0,85
Fer	3,30	4,10
Arsenic	6,60	2,30
Soufre	18,00	13,00
Argent, par 100 kilogrammes de plomb.	$0^{kg},496$	$0^{kg},430$

Des essais répétés, opérés tant sur les débris de surface que sur les matières trouvées au courant des travaux de

recherche, ont toujours donné des teneurs élevées en argent, dont la moyenne se rapproche de $0^{k},400$ par 100 kilogrammes de plomb.

En présence de ces résultats, on décida l'exploration du gisement. Pour être concluants, les travaux d'exploration auraient dû être menés dans le sens horizontal et dans le sens vertical, car il est probable que les anciens ont enlevé tout ce qui existait aux affleurements, puisqu'ils ont exploité certaines parties à 15 mètres au moins en contre-bas de leur galerie d'écoulement. On a essayé de passer sous leurs travaux; mais l'abondance des eaux a fait échouer cette tentative risquée à bras d'homme. On s'est donc borné à suivre le filon dans sa direction horizontale, au niveau de la vieille galerie d'écoulement. On a constaté que les anciens avaient exploité à ce niveau trois petites colonnes minérales, puissantes de $0^{m},60$ à $0^{m},80$, longues chacune de 10 à 12 mètres, et séparées par des intervalles stériles d'une dizaine de mètres, dont deux à l'est de leur travers-bancs et une à l'ouest. En profondeur, ces abatages communiquent, car les eaux à l'est ont suivi le niveau de l'épuisement tenté à l'ouest. Le filon, perdu par les anciens à 27 mètres à l'ouest de leur travers-bancs, a été facilement retrouvé, rejeté à $1^{m},50$ au nord par un brouillage du terrain, avec des degrés de minéralisation variables, mais encourageants. A 9 mètres à l'ouest du croisement, on a découvert un amas riche, ayant parfois plus d'un mètre de puissance et long de 15 mètres. Le filon en s'enrichissant se divise en plusieurs branches, séparées par des bandes de matière feldspathique blanche et tendre. Le quartz qui, dans la partie stérile, est blanc ou légèrement rougeâtre, devient noir violacé et compact. Une grande partie du minerai se compose d'oxyde plombo-antimonieux jaune, provenant de l'altération de sulfure. Le mur du filon, incliné vers le nord sous un angle de

65 à 70° dans la partie stérile, se redresse presque verticalement dans la partie riche; sa direction Nord 75° Ouest (m.) ne change pas sensiblement. Le minerai est entré dans la galerie par le pied et en est sorti par la couronne. On l'a exploré sur une hauteur de $9^m,30$ dont 3 mètres au-dessus et $6^m,30$ au-dessous de la galerie; il se maintient bien sur cette distance.

A partir du ravin de la Rhode, on suit les affleurements de ce filon vers l'ouest sur 400 mètres de longueur, bien en dehors de la concession de Freycenet, jusqu'au pied du moulin à vent de la Rhode. En ce point subsistent les traces d'une ancienne tranchée, connue dans le pays sous le nom de Travail-des-Maures (*), longue de 40 mètres environ dans la direction est-ouest, et profonde de 4 à 5 mètres. Sur ses bords, on retrouve des quartz calcédonieux rouges et noirs et des minerais oxydés ou sulfurés en tout semblables à ceux des travaux ci-dessus. Vers l'est, le filon ne semble pas traverser le ravin de la Rhode, ni pénétrer dans les micaschistes du plateau de Mont-Rome.

Deux autres filons semblables, quartzeux et barytiques, existent au sud du précédent, le plus éloigné à moins de 100 mètres de distance; ils n'ont point encore été touchés.

Filon des Ardennes. — Le filon des Ardennes est d'une nature toute différente : il ne renferme que de la galène argentifère. Sa gangue est un quartz hyalin, cristallisé, caverneux et humide, accompagné de sulfate de baryte. Deux pointements de baryte, distants horizontalement de 65 mètres, révèlent son existence. Dans l'intervalle, le filon a été suivi en tranchée, bien régulier et fortement minéralisé. Il est orienté sur le nord-ouest (m.) et plonge vers l'ouest, avec une puissance de $0^m,40$ à 1 mètre. Une prise d'essai faite avec soin sur la totalité des matières extraites de cette tranchée a rendu 22 p. 100 de plomb et $4^k,745$ d'argent par tonne de plomb d'œuvre. L'aspect de ce filon est satisfaisant et sa continuité n'est pas douteuse : il se prolonge en effet dans la concession limitrophe de Promeyrat, où il a été l'objet de recherches étendues qui ont déterminé l'institution de cette concession en 1877.

(*) Le village d'Ally, le plus voisin de ces travaux, porte en patois le nom de Zagha, bien évidemment arabe.

On voit que la concession de Freycenet renferme, sur une faible étendue superficielle, des gisements variés et dignes d'intérêt. Un décret récent les a tous réunis entre les mains d'un même concessionnaire. C'était la mesure la plus utile qui pût être prise pour en assurer l'exploitation économique. Il est probable que pareille mesure devra être adoptée tôt ou tard pour la plupart des concessions d'antimoine situées sur la rive gauche de l'Allier, entre Langeac et Massiac. Car les circonstances rencontrées à Freycenet ne constituent pas un cas isolé, et c'est ce qui m'a engagé à les décrire : elles se retrouvent dans les concessions de Barlet, Chazelles, Lubilhac, instituées pour antimoine seulement, et dans d'autres localités non encore concédées, où des déblais anciens, souvent considérables et montrant les mêmes gangues et les mêmes minerais qu'à Freycenet, témoignent d'une ancienne activité minière, malheureusement à peu près éteinte aujourd'hui.

BULLETIN DES TRAVAUX DE CHIMIE

EXÉCUTÉS EN 1891

PAR LES INGÉNIEURS DES MINES

DANS LES LABORATOIRES DÉPARTEMENTAUX

I. — LABORATOIRE DE CLERMONT-FERRAND.

Travaux de M. DE BÉCHEVEL, ingénieur des mines. (EXTRAIT.)

1° et 2° *Galène.* — Échantillons provenant de la commune de Pinols (Haute-Loire) et remis par M. Charrier, explorateur, à Paulhaguet.

N° 1. Galène massive à grande facettes.

N° 2. Galène à grain fin, à gangue de quartz et d'argile, provenant du même filon.

	N° 1	N° 2
Rendement en plomb à l'essai par voie sèche (pour 100).	81,66	71,50
Teneur en argent.. { du minerai brut (en grammes par tonne).	300	958
{ du plomb d'œuvre correspondant (en gr. par tonne). .	367	1.340

3° *Minerai blendeux.* — Minerai provenant du même filon que les échantillons nos 1 et 2 et présenté par le même explorateur.

Blende brune cristallisée, en association avec de la galène et du quartz.

Composition centésimale.

Quartz	36,30
Fer	5,10
Plomb	9,87
Zinc	27,87
Soufre	20,86
	100,00

Tableau par espèces minérales.

Quartz	36,30
Pyrite de fer	10,93
Sulfure de plomb	11,39
— de zinc	41,38
	100,00

L'essai pour argent du même échantillon accuse pour le minerai brut une teneur de 1.650 grammes d'argent.

Il eût été intéressant d'examiner dans quelle mesure cet argent se répartit entre les principaux éléments du minerai, c'est-à-dire entre la gangue pierreuse, la pyrite, la galène et la blende, mais il eût fallu pour cela diversifier le minerai dont il s'agit, par un triage minutieux, en quatre produits secondaires contenant respectivement en proportion dominante chacun des éléments à étudier. La quantité de matière mise à notre disposition étant trop faible pour permettre ce triage, nous avons du moins cherché à faire un premier partage de l'argent entre la galène et la blende d'après les résultats fournis par les essais précédents, en supposant non argentifères le quartz et la pyrite.

Les essais nos 1 et 2 accusent dans ces conditions, pour la galène seule, une teneur moyenne de 740 grammes par tonne.

En appliquant ce coefficient à la galène de l'échantillon n° 3, on trouve, pour la blende seule, une teneur de 3kg,780.

II. — LABORATOIRE DE MARSEILLE.

Travaux de M. SÉLIGMANN-LUI, ingénieur des mines. (EXTRAIT.)

1° à 5° *Bauxites.* — Nos 1 à 3. Échantillons remis par M. Aiguier, de Marseille, et provenant des environs de Pourcieux (Var).

Une carrière vient d'être ouverte pour l'exploitation de ce gisement, qui présente des bauxites bien définies.

N° 1. Variété blanchâtre.

N° 2. id. rose.

N° 3. id. rouge.

Nos 4 et 5. Échantillons remis par M. Delrieu, de Marseille, et trouvés dans les environs de Trets.

N° 4. Variété rose, texture compacte.

N° 5. id. rouge id.

	1	2	3	4	5
Al^2O^3	65,0	59,2	54,5	59,0	49,5
Fe^2O^3	7,5	9,4	10,8	8,2	12,8
SiO^2	22,8	20,4	20,5	27,2	31,5
HO, pertes	4,7	11,0	14,2	5,6	6,2
	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

III. — LABORATOIRE DE PAU.

Travaux de M. METTRIER, ingénieur des mines. (EXTRAIT.)

1° *Eaux minérales.* — Analyse complète des eaux de la *Grande Source* de Gazost, prises à l'établissement d'Argelès où elles sont utilisées.

La prise d'eau minérale a été faite par nous au robinet qui sert à l'embouteillage dans le sous-sol de l'établissement, à l'occasion d'une demande en déclaration d'intérêt public de la source de Gazost. M. Willm avait effectué l'analyse des eaux prises à la source, mais aucun essai n'avait été encore opéré sur les eaux prises à l'établissement, où elles sont utilisées.

L'analyse ci-après a montré que, malgré leur transport dans une conduite en fonte de 20 kilomètres de longueur, ces eaux sulfureuses conservaient toutes leurs propriétés :

COMPOSITION ÉLÉMENTAIRE		COMPOSITION HYPOTHÉTIQUE	
	gr.		gr.
Acide carbonique total (dont 0gr,0085 libre)	0,0224	Chlorure de sodium	0,2132
Soufre	0,0193	Sulfure de sodium	0,0445
Acide sulfurique	0,0081	— de calcium	0,0020
Acide silicique	0,0314	Sulfate de chaux	0,0137
Chlore	0,1294	Bicarbonate de chaux	0,0229
Sodium	0,1100	Silicate de chaux	0,0220
Chaux	0,0266	Silice en excès	0,0205
Matières organiques et traces diverses	0,0307	Acide carbonique libre	0,0085
		Matières organiques et traces diverses	0,0307
Total	0,3779	Total	0,3780

Il a en outre été effectué des essais sulfhydrométriques à la source même de Gazost et à l'établissement d'Argelès; ces essais ont donné en moyenne les résultats suivants :

	Au griffon.	A l'établissement.
Quantité de sulfure par litre évaluée en sulfure de sodium	0gr,0546	0gr,0468

Ces chiffres sont sensiblement supérieurs à ceux trouvés par M. Willm, ce qui peut être attribué, en ce qui concerne l'eau prise à l'établissement, aux meilleures conditions dans lesquelles se fait actuellement le transport de l'eau par la conduite, par suite de la suppression de réservoirs à ciel ouvert et de la formation d'une patine protectrice pour le tuyau.

De plus, des essais faits sur de l'eau embouteillée avant l'hiver 1890-1891, c'est-à-dire à peu près à l'époque du voyage de M. Willm, eau qui devait contenir d'après ses essais 0gr,0338 de sulfure, ont donné 0gr,0442, ce qui tendrait à prouver que dans cette eau, une fois bien embouteillée, le sulfure se régénère par suite de la réduction des sulfates au contact de la matière organique restée dans l'eau.

IV. — LABORATOIRE DE VESOUL.

Travaux de M. VILLAIN, ingénieur des mines. (EXTRAIT.)

Phosphates de chaux. — Il existe, dans la Haute-Saône, un gisement de phosphate, à l'état de nodules, qui se trouve immédiatement superposé au calcaire à Gryphée arquée (étage du lias). L'exploitation des nodules se fait en plusieurs points du département. L'analyse avait pour but de rechercher la richesse relative de quelques échantillons de diverses provenances.

Voici les résultats trouvés :

L'échantillon de plus grande richesse provenait du gisement de Pomoy; teneur : 32,67 p. 100 d'acide phosphorique.

Ensuite venait un échantillon prélevé dans la petite couche appelée *le Cordon*, dans le gisement de Saint-Marcel; teneur : 31,22 p. 100.

En troisième lieu, se place le phosphate marchand fabriqué avec des nodules provenant des deux gisements de Pomoy et de Pusy; teneur : 29,16 p. 100.

Enfin, le plus pauvre des échantillons essayés se présentait sous forme d'un débris d'ammonite, provenant de la couche de Saint-Marcel; sa teneur était de 27 p. 100.

V. — LABORATOIRE D'ALGER.

Travaux de M. TINGRY, contrôleur des mines. (EXTRAIT.)

1° *Galène.* — Essai pour plomb et argent de sept échantillons provenant du Bou-Thaleb et remis par M. Guillier.

a_1 et a_2. Échantillons à grain demi-fin, avec gangue barytique et traces de blende.

b_1, b_2, b_3, b_4 et b_5. Échantillons compacts, à grain d'acier avec veinules et plans de clivage imprégnés de calamine et d'ocre jaune.

Trouvé :

	a_1	a_2	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5
Plomb (p. 100).	76,15	84,38	82,80	68,60	57,70	84,20	71,40
Argent à la tonne de plomb (en grammes). .	0,601	0,146	0,301	0,202	0,174	0,304	0,216

2° *Calamine.* — Essai pour zinc de quatre échantillons remis par le directeur de la Compagnie algérienne et provenant de l'Ouarsenis.

a. Calamine grise compacte.

b. Calamine gris blanchâtre concrétionnée.

c. Calamine jaune blanchâtre, partie concrétionnée, partie friable.

d. Calamine jaune gris, stratifiée et contournée, avec gangue siliceuse.

Trouvé :

	a	*b*	*c*	*d*
Zinc (p. 100)	37,30	34,00	41,87	29,08

3° *Calamine.* — Analyse de quatre échantillons de Mazis remis par le Crédit agricole algérien.

a. Échantillon gris rougeâtre peu homogène.

b. Calamine compacte, jaunâtre, avec fissures remplies de calamine blanche.

c. Calamine blanche, régulièrement stratifiée, friable.

d. Échantillon gris jaune foncé, tirant sur le brun, très dur par places.

Trouvé p. 100 :

	a	*b*	*c*	*d*
Carbonate de zinc. . . .	88,40	98,59	90,35	89,35
— de plomb . . .	»	»	»	2,88
— de chaux . . .	5,35	»	1,70	»
Silice.	1,50	0,40	3,00	5,62
Fer et alumine	4,50	0,50	3,97	1,39
	99,75	99,49	99,02	99,24

4° *Roches phosphatées.* — Essai pour acide phosphorique de huit échantillons provenant d'Aïn-Bessem et remis par l'administration de la commune mixte.

a et *b*. Échantillons compacts, durs, à stratifications nettes, le premier gris brun, le deuxième gris jaunâtre.

c et *d*. Échantillons concrétionnés, gris brun, le premier avec une apparence de débris d'os, le deuxième avec nodules compacts.

e et *f*. Échantillons compacts avec stratifications, alternativement blanches et jaunes pour le premier, et jaunes et grises pour le second.

g et *h*. Échantillons compacts, avec parties concrétionnées pour le premier, et nodules très nets pour le second.

Trouvé p. 100 :

	a	*b*	*c*	*d*	*e*	*f*	*g*	*h*
Acide phosphorique . . .	8,37	6,15	11,29	10,25	13,60	11,80	9,30	18,26
Phosphate tribasique de chaux correspondant. .	18,27	13,43	24,65	22,38	29,69	25,76	20,30	39,86

5° *Roches phosphatées.* — Essai pour acide phosphorique de trois échantillons provenant de la Djidiouïa et remis par M. Crémieux.

Ces échantillons sont tous les trois durs et compacts : *a* et *b* sont à pâte fine et homogène, de nuance jaune clair; *c* est à veinules alternées de nuances jaune et gris clair, avec nodules très apparents.

Trouvé p. 100 :

	a	*b*	*c*
Acide phosphorique	19,30	21,25	24,00
Phosphate tribasique de chaux correspondant. .	42,13	46,39	52,39

6° *Roches phosphatées.* — Essai pour acide phosphorique de treize échantillons provenant d'Inkermann et remis par M. Darmont.

a et *a'*. Échantillons gris, compacts, à pâte homogène, fortement calcaire.

b à *e*. Échantillons gris jaunâtres avec veinules blanchâtres.

f. Échantillon gris clair avec stratifications régulières plus foncées.

g. Échantillon jaunâtre ayant toute l'apparence d'un grès à ciment calcaire.

h. Échantillon à aspect de nougat, formé de nodules jaunâtres dans une pâte homogène.

i et *k*. Échantillons à pâte calcaire homogène avec rognons siliceux.

l. Échantillon à concrétions grises dans une pâte fine très blanche.

m. Échantillon gris, compact, à pâte très homogène.

Trouvé p. 100 :

	a	*a'*	*b*	*c*	*d*	*e*	*f*	*g*	*h*	*i*	*k*	*l*	*m*
Acide phosphorique	5,13	5,65	11,80	12,15	10,20	10,22	17,30	0,70	18,35	1,30	»	16,85	8,00
Phosphate tribasique de chaux correspondant	12,20	12,34	25,74	26,52	22,27	22,31	37,77	1,53	40,06	2,84	»	36,78	17,46

7° *Roches présumées phosphatées*. — Essai pour acide phosphorique de huit échantillons de roches présumées contenir du phosphate de chaux, provenant des environs de Boghari et remises par l'Ingénieur en chef des mines. L'apparence de ces échantillons est celle d'un calcaire plus ou moins gréseux.

a, *b* et *c*. Échantillons gris jaunâtres, le premier avec nodules plus clairs, les deux autres avec veinules couleur de rouille.

d et *e*. Échantillons gris verdâtres à texture spongieuse, le deuxième plus foncé.

f. Échantillon gris clair à pâte fine.

g. Échantillon gris très clair avec nodules couleur de rouille.

h. Échantillon gris jaune, léger et friable, avec veines de pâte plus dure.

Trouvé p. 100 :

	a	*b*	*c*	*d*	*e*	*f*	*g*	*h*
Acide phosphorique	3,30	1,70	2,80	traces	traces	1,90	40,00	6,90
Phosphate tribasique de chaux correspondant	7,20	3,71	6,11	traces	traces	4,15	87,32	15,06

VI. — LABORATOIRE DE CONSTANTINE.

Travaux de M. SERGÈRE, contrôleur des mines. (EXTRAIT.)

1° *Minerais d'antimoine*. — Essai de deux échantillons d'antimoine oxydé remis par M. Roux et provenant de Sanza.

a. Échantillon blanc avec quelques taches jaunes, à structure fibroradiée.

b. Échantillon gris noirâtre, amorphe, n'accusant sa métallisation que par son poids.

	a	*b*
Antimoine (p. 100)	68,48	48,33

2° *Minerais de cuivre*. — Essai de deux échantillons remis par M. Jacob et provenant du Chabet-Akrioui.

a. Cuivre gris presque massif, avec veines d'argile ferrugineuse.

b. Cuivre gris passant par altération au cuivre carbonaté bleu, avec veines rouges, de couleur rappelant l'ocre rouge ou le cinabre.

Dosé dans *a*	Cuivre	38,00 p. 100
	Argent	650 gr. à la tonne de minerai.
Dosé sur les veines rouges de *b*	Mercure	4,90 p. 100
Dosé sur l'ensemble de *b*	Cuivre	27,15 p. 100.
	Argent	600 gr. à la tonne de minerai.

3° *Galène*. — Essai d'un échantillon remis par M. Barbier et provenant de Souk-Ahras.

Échantillon constitué par des mouches de galène éparses dans une gangue argileuse.

Plomb (pour 100)	32,40
Argent à la tonne de minerai (en grammes)	625

4° *Minerais mélangés*. — Essai de deux échantillons remis par M. Virot et provenant de la forêt des Ouichaoua-Rifia, près Collo.

a. Échantillon constitué par un oxyde de fer friable montrant quelques traces de cuivre carbonaté vert.

b. Échantillon de galène et blende mélangées, avec traces de pyrite cuivreuse.

	a	*b*
Cuivre (pour 100)	7,12	fortes traces
Plomb (pour 100)	»	18,85
Zinc (pour 100)	»	26,39
Argent à la tonne de minerai (en grammes)	280	400

V. — LABORATOIRE D'ORAN.

Travaux de M. PONCELET, contrôleur des mines. (EXTRAIT.)

1° *Galène.*— Essai pour plomb et argent d'un minerai provenant de Gar-Rouban, remis par l'Ingénieur des mines.

C'est une galène à gangue quartzeuse, partie massive, partie pulvérulente.

Dosé :

Plomb (p. 100)	67,20
Argent à la tonne de plomb (en grammes)	615

2° *Minerai de plomb.* — Essai pour plomb et argent d'un échantillon provenant des recherches Cerrata près Saïda, remis par M. Poirot.

C'est une dolomie dans laquelle est disséminée de la galène en mouches plus ou moins grosses. L'essai a été fait sur du minerai trié à la main et débarrassé en grande partie de sa gangue.

Dosé :

Plomb (pour 100)	39,72
Argent à la tonne de plomb (en grammes)	242

3° *Galène et Calamine.* — Essai pour plomb ou zinc de quatre échantillons provenant du territoire de Zemmora et remis par M. Fabriès.

a. Galène à gangue argileuse et calcaire avec une sorte de salbande pyriteuse; absence d'arsenic constatée dans cette pyrite.

b. Calamine cloisonnée avec fer arséniaté dans les cloisons et quelques mouches de galène.

c. Calamine cloisonnée avec fer arséniaté dans les cloisons, traversée par une petite bande de galène et de plomb carbonaté.

d. Calamine ferrugineuse à gangue terreuse; absence de l'arsenic et du plomb constatée.

Dosé :

	a	*b*	*c*	*d*
Plomb (pour 100)	30,00	»	10,2	»
Zinc (p. 100)	»	31,6	37,3	23,0

On a dosé en outre dans l'échantillon *a* :

Argent à la tonne de plomb (en grammes)	603

4° *Calamine.* — Essai pour zinc d'un lot de calamine provenant du Djebel-Masser, remis par M. Pitcairn.

La prise d'essai a été faite sur l'ensemble de la masse préalablement concassée.

Trouvé :

Zinc (pour 100)	33,00

5° *Minerais cuivreux.* — Échantillons provenant des recherches Mérel à Aïn-Sefra, remis par l'Ingénieur des mines.

Un premier échantillon de grès un peu argileux avec mouches et imprégnations de carbonates de cuivre et de fer a été seulement essayé pour cuivre; on a trouvé :

Cuivre (p. 100)	3,35

Six autres échantillons ont été l'objet d'analyses partielles :

a. Fragment de la salbande du toit.

b. id. id. du mur.

c, d, e, f. Grès plus ou moins argileux constituant le gros du gîte.

Dosé :

	a	*b*	*c*	*d*	*e*	*f*
Sable insoluble	37,00	42,00	78,60	22,10	80,00	81,37
Argile	43,00	47,00	8,68	65,35	10,00	10,70
Chaux	»	»	4,45	6,77	6,35	5,70
Cuivre	0,67	0,80	4,60	0,04	1,16	»
Corps non dosés	19,33	10,20	3,67	5,74	2,49	2,23
	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

En outre, l'analyse d'un échantillon de terre noire minéralisée, provenant des mêmes recherches et remis par l'Ingénieur des mines, a donné :

Sable insoluble	9,90
Argile	7,76
Chaux	0,67
Cuivre	21,17
Peroxyde de fer	11,65
Peroxyde de manganèse	33,66
Corps non dosés	15,19
	100,00

6° *Minerais manganésifères.* — Analyse de deux échantillons manganésifères, mais non cuivreux, provenant des mêmes recherches d'Aïn-Sefra, et remis par l'Ingénieur des mines.

a. Terre blanche friable, se délitant rapidement dans l'eau, et donnant de l'argile, du sable et une matière pulvérulente d'un brun noir.

b. Roche tuffacée happant à la langue et de saveur légèrement salée, présentant des plaquettes de carbonate de chaux entre lesquelles se trouve intercalé un magma avec cristaux de gypse.

Trouvé :

	a	*b*
Sable insoluble	8,00	5,82
Argile	58,00	11,50
Carbonate de chaux	6,60	61,35
Sulfate de chaux	»	8,60
Peroxyde de fer	3,33	2,75
— de manganèse	15,65	8,27
Corps non dosés	8,42	1,73
	100,90	100,00

7° *Roches phosphatées.* — Analyse de sept échantillons, provenant du Djebel-Zerdeb, près Lamoricière, et remis par l'Ingénieur des mines.

Ces échantillons présentent l'aspect de travertins rubanés avec parties plus ou moins compactes. On s'est assuré pour tous que, malgré leur ressemblance avec la calamine, ils ne contiennent pas de zinc.

Trouvé :

	a	*b*	*c*	*d*	*e*	*f*	*g*
Phosphate tribasique de chaux	69,5	75,5	74,0	81,0	68,0	65,0	34,2
Carbonate de chaux	15,0	11,0	16,5	12,5	14,5	16,0	7,5
Sable et argile insolubles	12,5	6,5	3,5	2,4	10,0	7,0	46,0
Corps non dosés (eau, fer, calamine)	3,0	7,0	6,0	4,1	7,5	12,0	12,3
	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

UTILITÉ

DES

CHEMINS DE FER D'INTÉRÊT LOCAL

TARIFS — FORMULE D'EXPLOITATION

EXAMEN

DES OBSERVATIONS FORMULÉES PAR M. COLSON

Par M. CONSIDÈRE,
Ingénieur en chef des ponts et chaussées.

1. Aux mois de février et de mars 1892, nous avons publié, dans les *Annales des Ponts et Chaussées*, une étude sur l'utilité des chemins de fer d'intérêt local et sur leurs formules d'exploitation.

M. Colson, ingénieur des ponts et chaussées, maître des requêtes au Conseil d'État, a fait paraître d'abord dans les *Annales des mines* (*), puis dans les *Annales des ponts et chaussées*, une étude de notre travail qui, sous la forme la plus courtoise, renferme la critique de toutes nos conclusions, sauf une seule.

M. Colson estime bien préférable à ceux qui ont été employés jusqu'ici, le type de formule que nous avons proposé pour déterminer les sommes à allouer aux concessionnaires des chemins de fer d'intérêt local, afin de

(*) 2e volume de 1892, p. 44.

couvrir les dépenses d'exploitation; mais il pense que nous avons complètement erré dans toutes les considérations qui nous ont conduit à imaginer et à proposer ce type de formule. D'après lui, nous nous sommes trompé sur l'augmentation de trafic que les embranchements apportent aux grands réseaux, sur les parcours moyens des voyageurs et des marchandises qui empruntent leurs rails, sur la valeur des avantages directs et indirects des transports, sur les tarifs qui font produire aux chemins de fer le maximum d'utilité totale, sur ceux qu'en pratique, il convient d'appliquer, enfin sur les valeurs numériques qu'il y a lieu de donner aux coefficients de la formule d'exploitation que nous avons proposée et dont, en somme, M. Colson n'approuve que la forme algébrique, sauf même à la simplifier.

Il est heureux que nous ayons reçu par ailleurs de hautes et formelles approbations; car, en présence de critiques aussi radicales venant d'un homme si compétent, nous aurions pu douter que notre travail méritât même d'être défendu. Nous n'avons pas eu cette pensée, mais nous avons compris qu'il ne suffirait pas de répondre aux arguments de M. Colson par d'autres arguments également abstraits qui, souvent, laisseraient le lecteur fort embarrassé pour choisir, et nous avons voulu ajouter de nouvelles études statistiques à celles que renferme notre premier mémoire, bien que M. Colson ne nous en eût opposé aucune. Après avoir élargi ainsi la base expérimentale de notre étude, nous avons cherché à éclairer, par une analyse plus serrée, les points que nous avions d'abord laissés dans la pénombre.

Préoccupé de prouver partout et toujours, nous avons fait une œuvre laborieuse et pénible à lire et nous avons dû en différer longtemps l'achèvement et la publication, malgré la contrariété que nous éprouvions de n'être connu des lecteurs des *Annales des mines* que par une

critique presque absolue des idées que nous avions exprimées.

Pour réfuter les arguments de M. Colson, nous avons parlé souvent de lui et de nous; peut-être aurions-nous pu diminuer le nombre des expressions personnelles, mais c'eût été au préjudice de la précision, dont nous n'avons rien voulu sacrifier à d'autres considérations.

Nous avons fait tout notre possible pour nous dépouiller de notre personnalité, afin de discerner plus facilement la part de vérité contenue dans les critiques qui nous étaient adressées et nous avons notablement modifié certaines propositions, où les observations de M. Colson nous ont fait reconnaître quelque exagération. Mais, en somme, nos conclusions finales n'ont pas varié et nous semblent plus certaines que lorsque, pour la première fois, nous les avons formulées, sans bien savoir quelles critiques on pourrait en faire.

CHAPITRE Ier.

ÉTUDE STATISTIQUE DES RECETTES TOTALES DU TRAFIC CRÉÉ PAR LES CHEMINS DE FER D'INTÉRÊT LOCAL.

2. *Rappel de nos conclusions antérieures.* — Le mémoire que nous avons publié, en 1892, dans les *Annales des ponts et chaussées*, renferme une étude analogue à celle que nous allons faire dans ce chapitre. Elle se rapporte à neuf petites lignes, dont deux font partie du réseau de l'Ouest, quatre de celui d'Orléans et trois de réseaux d'intérêt local englobés dans le réseau du Nord.

Cette étude nous a conduit à la conclusion suivante :

L'augmentation nette de recettes que les embranchements apportent aux réseaux contigus et dont on a coutume de ne tenir aucun compte, présente, en

ce qui concerne les lignes que nous avons étudiées, une importance d'une à deux fois plus grande pour les voyageurs, et de deux à neuf fois plus grande pour les marchandises que les recettes qu'encaissent ces embranchements, les seules qui profitent à leurs concessionnaires.

L'importance de cette augmentation de trafic que les petites lignes apportent aux grands réseaux, est la base principale de notre mémoire. Sans doute, après l'avoir acceptée, on peut encore ne pas admettre intégralement toutes nos conclusions, mais on ne saurait s'en écarter beaucoup. Aussi, le désaccord absolu qui nous sépare de M. Colson, vient-il surtout de la différence de nos opinions sur ce point. Il ne conteste nullement que les lignes étudiées dans notre mémoire donnent les résultats que nous venons de rappeler, mais il pense qu'elles sont dans des conditions tellement spéciales qu'on n'en peut tirer aucune conclusion applicable à la généralité des chemins de fer d'intérêt local, et il incline à croire que le trafic créé par un embranchement ne doit, le plus souvent, effectuer sur la ligne principale qu'un parcours *médiocre* et, par suite, lui donner que des recettes *médiocres*.

Nous examinerons ultérieurement s'il est vrai que les résultats des neuf lignes étudiées dans notre premier mémoire ne conduisent pas aux conclusions que nous en avons tirées; en ce moment, nous nous bornerons à donner, sans commentaires, les résultats de l'étude identique de sept autres lignes.

3. *Objet de cette étude nouvelle.* — Connaissant fort mal les réseaux de Paris-Lyon-Méditerranée et de l'Est, nous avons prié MM. Noblemaire et Barabant d'y faire rechercher les lignes qui réunissent les conditions énumérées au paragraphe 5 de notre premier mémoire, comme

nécessaires pour fournir des renseignements utiles. Ils ont bien voulu en faire le choix et nous envoyer les chiffres relatifs à ces lignes. Plusieurs embranchements, auxquels on avait d'abord pensé, ont dû être écartés, parce que leur ouverture à l'exploitation était antérieure à la période dont la compagnie de Paris-Lyon-Méditerranée a conservé les archives.

Les résultats donnés par les sept nouvelles lignes étudiées sont consignés dans deux tableaux absolument analogues à ceux qui figurent au paragraphe 5 de notre premier mémoire. Nous ne pouvons que nous référer aux longues explications que nous avons données au sujet de la nature de ces tableaux et des procédés de calcul des chiffres qui y figurent.

Le premier tableau se rapporte à cinq embranchements du réseau Paris-Lyon-Méditerranée qui sont exploités par la compagnie et dont les stations délivrent, pour toutes les autres stations du réseau, des billets directs dont la valeur est portée intégralement en compte dans leurs recettes. Les recettes du trafic propre de l'embranchement sont donc comprises dans les chiffres de la colonne 14 et doivent en être retranchées pour obtenir ceux de la colonne 16 qui donnent l'augmentation de recettes que chaque embranchement a procurée, *en dehors de ses propres rails*, aux autres lignes du grand réseau dont il est l'affluent.

Au contraire, les deux chemins de fer qui figurent au second tableau, étaient exploités comme lignes d'intérêt local avec une comptabilité distincte et sans billets communs, pendant les années auxquelles se rapportent les chiffres que nous reproduisons. Leurs recettes propres ne figurent donc pas dans les recettes du grand réseau, et on obtient directement, dans la colonne 14, des chiffres correspondant à ceux qui figurent dans la colonne 16 du premier tableau.

PREMIER TABLEAU.

DÉSIGNATION des EMBRANCHEMENTS	LONGUEUR	DISTANCE de l'origine à Paris	DATE DE L'OUVERTURE	ANNÉES comparées A	ANNÉES comparées B	SENS du trafic observé	NATURE du trafic
1	2	3	4	5	6	7	8
Pont de Dore à Ambert	48	402	1885	1883	1887	Expéditions.	Voyageurs...
							Marchandises.
Veynes à Briançon	109	»	1884	1882	1886	Id.	Voyageurs...
							Marchandises.
Crest à Die	36	643	1884	1882	1886	Id.	Voyageurs...
							Marchandises.
Tamnay à Château-Chinon	24	»	1880	1887	1891	Id.	Voyageurs...
							Marchandises.
St-Georges-de-Commiers à la Mure	31	»	1888	1886	1890	Id.	Voyageurs...
							Marchandises.

DEUXIÈME TABLEAU.

DÉSIGNATION des EMBRANCHEMENTS	LONGUEUR	DISTANCE de l'origine à Paris	DATE DE L'OUVERTURE	ANNÉES comparées A	ANNÉES comparées B	SENS du trafic observé	NATURE du trafic
1	2	3	4	5	6	7	8
Nançois-le-Petit à Gondrecourt	35	»	1875	1874	1877	Expéditions.	Voyageurs...
							Marchandises.
Amagne à Veuziers	27	»	1873	1872	1876	Id.	Voyageurs...
							Marchandises.

TABLEAU.

STATIONS DU GRAND RÉSEAU influencées par l'embranchement — Recettes de l'année A	Recettes probables de l'année B si l'embranchement n'eût pas existé	Recettes de l'année B	Diminution de recettes imputable à l'embranchement (col. 10 — col. 11)	RECETTES DES STATIONS de l'embranchement pendant l'année B	AUGMENTATION TOTALE des recettes de la Compagnie produite par l'embranchement (col. 13 — col. 12)	RECETTE PROPRE de l'embranchement	AUGMENTATION des recettes de la Compagnie en dehors de l'embranchement (col. 14 — col. 15)	RAPPORT $Z = \frac{\text{col. 16}}{\text{col. 15}}$ Voyageurs	RAPPORT $Z = \frac{\text{col. 16}}{\text{col. 15}}$ Marchandises
9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
130.687	130.687	2.227	128.460	305.049	176.589	74.313	102.276	1,4	»
400.251	400.251	72.242	328.009	485.996	157.987	40.229	117.758	»	2,9
46.454	46.454	— 9.067	55.521	798.171	742.650	188.358	554.312	2,9	»
26.000	26.000	78.843	— 52.843	1.090 970	1.143.813	65.524	1.078.289	»	16,5
82 613	82.613	60.465	22.148	173.913	151.765	41.968	109.797	2,6	»
124.582	124.582	93.249	31.333	282.047	250.714	29.922	220.792	»	7,3
128.047	140.000	86.259	53.741	106.906	53.165	12 852	40.313	3,1	»
116.247	128.000	95.691	32.309	120.787	88.478	5.152	83.326	»	16,2
25.676	28.000	23.329	— 4.671	99.960	95.289	48.027	47.262	1,0	»
32.160	35.000	140.009	— 105.009	549.346	654.355	328.288	326.067	»	1,0

TABLEAU.

STATIONS DU GRAND RÉSEAU où s'embranche le chemin de fer d'intérêt local — Recettes de l'année A	Recettes probables de l'année B si le chemin de fer d'intérêt local n'eût pas existé	Recettes de l'année B	Augmentation de recettes de la gare d'embranchement (col. 11 — col. 10)	DIMINUTION DE RECETTES des stations voisines influencées	AUGMENTATION NETTE de recettes du grand réseau (col. 12 — col. 13)	RECETTES du chemin de fer d'intérêt local	RAPPORT $Z = \frac{\text{col. 14}}{\text{col. 15}}$ Voyageurs	RAPPORT $Z = \frac{\text{col. 14}}{\text{col. 15}}$ Marchandises
9	10	11	12	13	14	15	16	17
72.287	72.287	91.812	19.525	— 2.506	22.031	36.140	0,6	»
132.595	132.595	202.758	70.163	1.284	68.879	40.451	»	1,5
107.872	110.000	174.024	64.024	— 41.630	105.654	69.768	1,5	»
85.839	87.000	293.883	206.883	31.037	175.846	63.388	»	2,8

Tous les chiffres de ces tableaux résultent directement des statistiques des compagnies ou d'opérations arithmétiques indiquées en tête des colonnes, sauf les deux exceptions que nous allons indiquer.

Les chiffres de la colonne 10 donnent la valeur probable de la recette que les stations de la grande ligne influencées par l'embranchement auraient faite après l'époque où il a été ouvert, s'il n'avait pas existé. Ils doivent évidemment différer, en plus ou en moins, des chiffres de la colonne 9, suivant que l'activité des transports, dans les régions voisines, a augmenté ou diminué de l'année A qui a précédé l'ouverture de l'embranchement, à l'année B qui l'a suivie.

Dans notre premier mémoire, nous avons fait de minutieuses études pour calculer, avec toute l'exactitude possible, les chiffres inscrits dans la colonne 10, en mettant à profit la connaissance que nous avions de la région où sont situées les lignes comprises dans le premier tableau. Ne pouvant nous livrer à ce travail pour les régions du Paris-Lyon-Méditerranée et de l'Est, que nous connaissons fort mal, nous avons adopté des bases très simples, en nous attachant à pécher plutôt par excès que par insuffisance dans la détermination des chiffres de la colonne 10, parce que des erreurs faites dans ce sens seraient défavorables à notre thèse et ne pourraient être opposées à nos conclusions. Nous avons, en conséquence, admis que, si l'on n'avait pas ouvert les embranchements en question, les recettes des stations de la grande ligne n'auraient subi aucun changement de 1882 à 1886, ni de 1883 à 1887, tandis qu'il est constant que le trafic des chemins de fer a diminué notablement pendant cette période de désastres financiers.

De 1886 à 1890 et de 1887 à 1891, nous avons admis que le trafic aurait augmenté de 10 p. 100; nous doutons qu'on puisse trouver ce chiffre insuffisant.

Entre 1874 et 1877, nous avons supposé l'égalité, bien qu'en général, le trafic eût sensiblement diminué.

De 1872 à 1876, où les conditions étaient un peu plus favorables, nous avons admis une majoration de 2 p. 100 environ.

Les chiffres de la colonne 11 du premier tableau présentent une autre particularité. Pour tenir compte des doubles emplois que signale le paragraphe 14 de notre premier mémoire et qui proviennent du produit des billets pris dans les stations influencées, à destination des stations de l'embranchement, les recettes des voyageurs indiquées par la compagnie pour les années B ont été diminuées uniformément des 40/100 des recettes propres de l'embranchement inscrites dans la colonne 15. Le taux de cette correction que nous avons justifié pour la ligne de Morlaix à Roscoff, est certainement exagéré pour les lignes qui figurent au nouveau tableau n° 1, parce que les stations influencées, y ayant une très minime importance, délivrent, pour les stations de l'embranchement, un nombre de billets minime aussi et beaucoup plus faible que celui que donne, à destination de Saint-Pol et Roscoff, la gare de Morlaix qui est le centre principal d'attraction de ces deux villes. Nous avons donc commis volontairement des erreurs défavorables à notre thèse. Pour la ligne de Briançon, elles sont telles que la recette des stations influencées pendant l'année B est remplacée par une quantité négative, ce qui est absurde.

Certains chiffres des tableaux en question présentent d'autres anomalies qu'il importe de signaler. Les signes —, qui précèdent quelques chiffres de la colonne 12 du premier tableau, prouvent qu'au lieu de la diminution qu'on pouvait prévoir pour les recettes des stations influencées du grand réseau, il y a eu, dans certains cas, une augmentation. Faute de connaître les circonstances locales qui se sont produites vers l'époque de la mise en

exploitation des embranchements, nous ne pouvons pas expliquer ces anomalies ; nous ferons seulement remarquer qu'elles sont sans importance auprès des chiffres de la colonne 16 et qu'elles ne sauraient, en conséquence, exercer d'influence notable sur les chiffres des colonnes 17 et 18, les seuls qui servent de base à nos conclusions. Il n'y a d'exception que pour le chemin de fer de Saint-Georges de Commiers à La Mure, qui est dans des conditions exceptionnelles. On en jugera par ce fait, que, sur un total de 135.000 tonnes de marchandises qu'il a expédiées en 1891, il y avait 7.600 tonnes de chaux et ciment et 126.000 tonnes d'anthracite, dont 95.000 tonnes ont été expédiées à Grenoble, c'est-à-dire à 19 kilomètres seulement au delà du point d'embranchement. On comprend que les différences d'activité industrielle de la région desservie occasionnent des variations de recettes d'importance comparable à celles que produit le trafic à petite distance procuré au grand réseau par cette ligne.

Les chiffres de la colonne 13 du second tableau présentent une anomalie encore plus forte, en ce qui concerne le trafic des voyageurs de la ligne d'Amagne à Vouziers. Au lieu d'une diminution, on constate une augmentation considérable des recettes des stations voisines de l'embranchement et, en se reportant aux états détaillés, on voit qu'elle provient presque entièrement de la gare de Rethel, qui est à 8 kilomètres de l'embranchement d'Amagne. Comme il est impossible d'attribuer un aussi fort accroissement de recette au produit des billets pris à Rethel pour Amagne par les voyageurs à destination de la nouvelle ligne, il faut admettre qu'une cause locale, que nous ne connaissons pas, a provoqué une augmentation anormale du trafic de la gare de Rethel, de 1872 à 1876. Cette hypothèse n'a, du reste, rien de surprenant, car on comprend qu'un nouvel équilibre n'ait

pu s'établir qu'à la longue près de la frontière, après la guerre de 1870-1871. Il a dû se produire, en certains points, des développements anormaux de trafic, pendant qu'ailleurs on constatait des effets contraires.

Par suite de ces particularités, les statistiques des deux lignes qui figurent au second tableau, ne semblent pas pouvoir fournir de renseignements bien sérieux sur l'effet réel des embranchements.

4. *Résultats bruts de cette étude.* — Dans le présent chapitre, nous nous bornerons à ces observations qui ont pour but de faire connaître la nature des indications que peuvent donner les diverses lignes que nous avons étudiées. Ce n'est qu'à la fin du chapitre suivant que nous aurons tous les éléments nécessaires pour discuter les chiffres obtenus, expliquer les écarts énormes qu'ils présentent et dégager les conséquences qu'ils comportent. Nous ferons cependant remarquer immédiatement qu'ils mettent en évidence l'importance des augmentations de recettes que les embranchements étudiés ont apportées aux grands réseaux dont ils sont les affluents. Le rapport Z de ces augmentations aux recettes propres des embranchements, varie de 0,6 à 3,1 pour les voyageurs et de 1,0 à 16,5 pour les marchandises.

De prime abord, ces résultats paraîtront difficiles à concilier avec la première conclusion de M. Colson que nous avons citée ; nous espérons établir qu'une étude attentive confirme pleinement cette impression.

CHAPITRE II.

ÉTUDE DES PARCOURS MOYENS DES VOYAGEURS ET DES MARCHANDISES SUR LES DIVERS CHEMINS DE FER.

5. *Objet de cette étude.* — L'étude que nous venons de faire et celle de même nature que renferme le premier

chapitre de notre mémoire précédent, mettent hors de doute l'importance du trafic nouveau que certains embranchements apportent aux grands réseaux ; mais les résultats obtenus diffèrent tellement d'une ligne à l'autre qu'on ne saurait en déduire des moyennes applicables à l'ensemble des chemins de fer d'intérêt local que l'on pourra construire en France.

Aussi, dans le chapitre II de notre premier travail, avons-nous tenté de tirer des conclusions plus générales des chiffres fournis par les statistiques officielles des chemins de fer français. Cette étude comporte deux parties bien distinctes : la première a pour but de montrer comment se répartit, entre les petites lignes et les grands réseaux, la recette totale donnée par le trafic commun qui emprunte les premières pour une fraction de son parcours ; dans la seconde, nous avons recherché quelle est la portion de la recette encaissée par les grands réseaux pour ce trafic commun qui provient de transports nouveaux vraiment provoqués par les embranchements. C'est cette portion qui, seule, forme l'augmentation réelle de recette brute dont bénéficient les grands réseaux.

Dans le présent chapitre, nous vérifierons l'exactitude du raisonnement suivant qui résume la première partie de cette étude, telle qu'elle figure dans notre mémoire.

Le parcours total du trafic qui emprunte les lignes d'intérêt local sur une partie du trajet, peut être évalué, en moyenne, à 30 kilomètres pour les voyageurs et à 127 kilomètres pour les marchandises.

D'autre part, les statistiques établissent que les parcours moyens effectués par les voyageurs et les marchandises sur les chemins de fer d'intérêt local sont respectivement de 11 kilomètres et de 20 kilomètres.

Les parcours que les voyageurs et les marchandises fréquentant les lignes d'intérêt local, effectuent sur les grands réseaux contigus, sont donc égaux à ceux qu'ils font sur ces petites lignes, multipliés par les rapports $\frac{30-11}{11}=\frac{19}{11}$ pour les voyageurs et $\frac{127-20}{20}=\frac{107}{20}$ pour les marchandises.

Pour déterminer les rapports des recettes que le trafic commun donne aux grands réseaux et aux chemins de fer d'intérêt local, il suffit de multiplier les rapports indiqués ci-dessus pour les parcours moyens, par les rapports des tarifs moyens qui sont appliqués sur ces deux catégories de voies ferrées. On obtient ainsi les chiffres suivants :

$$\text{Voyageurs. . . .}\quad \frac{19^{k}}{11^{k}}\times\frac{4^{c},63}{5^{c},37}=1,5$$

$$\text{Marchandises. .}\quad \frac{107}{20}\times\frac{5^{c},95\,(*)}{8}=4,0$$

Telle est la première partie de notre argumentation, la seule que nous voulions justifier dans le présent chapitre. Ce que M. Colson en conteste, ce sont les chiffres de 30 kilomètres et 127 kilomètres que nous avons admis pour les parcours moyens totaux du trafic qui emprunte les lignes d'intérêt local dans une partie du trajet. Nous allons chercher à les justifier, en commençant par celui de 30 kilomètres qui concerne les voyageurs.

6. *Parcours moyens des voyageurs sur les grands*

(*) Nous avons expliqué, dans notre premier mémoire, que c'est aux vices des conventions actuelles qu'il faut attribuer l'exagération des tarifs des marchandises sur les chemins de fer d'intérêt local dont la moyenne est voisine de 11 centimes, c'est-à-dire supérieure de 5 centimes au tarif moyen des grands réseaux. Avec des conventions rationnelles, les concessionnaires des petites lignes auront intérêt à appliquer des tarifs dont la moyenne sera inférieure à 8 centimes.

réseaux.— Un rapide examen des parcours des voyageurs sur les diverses compagnies montre d'abord ce qu'il faut penser du chiffre de 35 kilomètres que les statistiques donnent pour leur moyenne.

En 1889, dernière année dont nous ayons la statistique officielle, on trouve les chiffres suivants :

	kilogr.
Nord	41,2
Est	29,0
Ouest	23,1
Paris-Orléans	57,9
Paris-Lyon-Méditerranée	54,0
Midi	49,6
Ceinture de Paris	5,8
Grande ceinture de Paris	12,4
Moyenne des grandes compagnies	35,3

Ces chiffres présentent des différences énormes qu'il est facile de s'expliquer.

Il semble que la longueur des parcours moyens effectués sur un réseau dépend surtout des trois éléments suivants : nature de la région et de la population desservies, étendue du réseau, distance moyenne à Paris et aux autres grands centres de consommation.

A tous ces points de vue, le réseau d'Orléans est dans des conditions qui nous paraissent représenter la moyenne des chemins de fer français. En effet, la région qu'il dessert est surtout agricole comme l'ensemble de la France et est située, en moyenne, sous la même latitude et à la même distance de Paris : 350 kilomètres environ. En outre, le réseau d'Orléans ne comporte qu'une très faible longueur de lignes appartenant à la banlieue de Paris qui réduisent les parcours moyens dans une proportion énorme, et qui doivent évidemment être exclues dans le calcul des moyennes applicables aux régions où l'on doit établir des chemins de fer d'intérêt local.

Nous ne voyons qu'une raison qui puisse faire supposer que le parcours moyen des voyageurs soit un peu plus grand sur le réseau d'Orléans que dans le reste de la France, c'est que ce réseau ne touche qu'à deux villes de première importance : Paris et Bordeaux, dont la situation excentrique tend à augmenter la longueur des voyages.

Au contraire, le réseau de Paris-Lyon-Méditerranée dessert deux villes d'une importance exceptionnelle : Lyon et Marseille, qui sont, en quelque sorte, les capitales des régions voisines. Elles combattent l'attraction de Paris et diminuent ainsi les parcours moyens. En outre, ce réseau dessert des régions industrielles de grande importance, et nous verrons plus loin qu'elles se distinguent par des parcours de voyageurs très réduits.

On comprend donc que, malgré la grande étendue du réseau de Paris-Lyon-Méditerranée, le parcours moyen (54 kilomètres) y soit un peu inférieur à celui du réseau d'Orléans (57^{km},9), ou, tout au moins, qu'en raison de ces influences contraires, il n'en diffère pas beaucoup.

Le chiffre du Midi (49^{km},6) s'explique aussi très facilement. Vu le peu d'étendue de ce réseau et la multiplicité des issues par lesquelles le trafic lui échappe pour emprunter d'autres lignes, il est naturel que les parcours y soient moindres que sur le Paris-Lyon-Méditerranée et l'Orléans.

Le chiffre du Nord (41^{km},2) est également normal pour un réseau de faible étendue qui dessert une région industrielle et dont les points extrêmes sont, à la fois, peu éloignés de Paris et contigus à des lignes étrangères avec lesquelles ils ont un trafic commun très important dont les statistiques ne portent aucune trace.

Au premier examen, il semble difficile de concilier ces chiffres avec ceux que donne le réseau de l'Ouest, où le parcours moyen des voyageurs n'a été que de 23^{km},1

en 1889 et de 21^{km},3 en 1891. Mais le tableau qui figure à la page 136 du dernier rapport adressé aux actionnaires, montre que, si le parcours moyen y est si faible, c'est par suite de l'influence des lignes de la banlieue de Paris, sur lesquelles il n'est que de 7^{km},6. Pour l'ensemble des autres lignes du réseau, le parcours des voyageurs a été de 47^{km},7 en 1891, quoiqu'elles comprennent les stations des Batignolles, Houilles, Maisons-Laffitte, Achères, Poissy, Conflans, etc., qui font incontestablement partie de la banlieue de Paris.

Sur le réseau de l'Est, le parcours moyen est plus grand que sur celui de l'Ouest, mais sa valeur n'est cependant que de 29 kilomètres, bien moindre que sur les autres réseaux. Nous ne nous sommes pas procuré l'état détaillé des recettes de ses stations, mais il ne semble guère douteux que, pour ce réseau comme pour celui de l'Ouest, la faiblesse du parcours moyen résulte de l'influence des lignes de banlieue : Paris à Vincennes et Champigny, Paris à Pantin, Bondy à Lagny, Paris à Noisy et Nogent-sur-Marne. Il n'y a aucune raison pour que, sur les lignes que la compagnie de l'Est exploite en dehors de la banlieue de Paris, le parcours moyen des voyageurs soit plus faible que dans tout le reste de la France.

En résumé, si on laisse de côté les lignes de banlieue de la compagnie de l'Ouest, et si l'on néglige le réseau de l'Est pour lequel on devrait faire une séparation analogue dont nous n'avons pas les éléments, on trouve les chiffres de :

41^{km},2, 47^{km},7, 57^{km},9, 54^{km},0, 49^{km},6

pour valeurs des parcours moyens des voyageurs qui ressortent des statistiques individuelles des compagnies. En multipliant chacun de ces chiffres par la longueur du réseau auquel il s'applique, on obtient leur moyenne géométrique qui est de 52 kilomètres.

Si l'on excluait les stations des réseaux du Nord, d'Orléans et de Paris-Lyon-Méditerranée qui sont situées dans la banlieue de Paris, comme nous l'avons fait pour l'Ouest, on trouverait, au moins, 55 kilomètres pour la moyenne des parcours que font les voyageurs *sur chacun des grands réseaux*. Mais ce n'est point encore là le renseignement dont nous avons besoin pour déterminer le parcours moyen que font, non sur un seul réseau, mais sur l'ensemble des chemins de fer français, les voyageurs qui empruntent des lignes d'intérêt local dans une partie du trajet. Ce qui importe, c'est de déterminer le parcours moyen des voyageurs *sur l'ensemble de tous les réseaux considérés comme n'en formant qu'un*.

Or il y a, entre ces deux sortes de parcours, une différence notable qu'un exemple fera bien comprendre. Supposons qu'un voyageur fasse un trajet de 60 kilomètres également réparti entre trois réseaux; on fera figurer, à la statistique de chaque compagnie, un voyageur ayant parcouru 20 kilomètres, tandis qu'en réalité, il n'y aura qu'un voyageur unique parcourant 60 kilomètres.

Pour se rendre compte de l'importance de cette cause d'erreur, il suffit de remarquer en combien de points les réseaux se touchent et même se traversent et s'enchevêtrent. Le seul réseau d'Orléans a 62 gares de transit, par lesquelles il échange du trafic commun avec d'autres voies ferrées.

Nous croyons, en conséquence, pouvoir dire qu'en dehors de la banlieue de Paris, dont on n'a pas à s'occuper dans l'étude des chemins de fer d'intérêt local, chaque voyageur qui emprunte les rails des grands réseaux, y parcourt, en moyenne, 60 kilomètres, au moins. C'est le double du parcours total de 30 kilomètres que nous avons attribué aux voyageurs qui fréquentent les chemins de fer d'intérêt local.

Il nous semble qu'*a priori* on doit être porté à trouver cette différence suffisante ; mais, en présence de l'avis contraire de M. Colson, nous allons apporter, à l'appui de notre opinion, des preuves plus convaincantes et que nous croyons décisives.

7. *Nature des statistiques qui vont être étudiées.* — Certaines compagnies impriment des statistiques annuelles indiquant, pour chaque station, les nombres des voyageurs et des tonnes de marchandises expédiés et les recettes encaissées pour les deux sortes de trafic.

En divisant les chiffres des recettes par les nombres correspondants des unités expédiées, on obtient les recettes moyennes par voyageur et par tonne. En divisant ensuite les recettes moyennes par les tarifs moyens, on trouve des valeurs approchées des parcours moyens que font, sur le réseau considéré, les voyageurs et les marchandises expédiées par chaque station.

Nous avons choisi, pour les étudier, les statistiques des réseaux d'Orléans et de l'Ouest, où les stations sont groupées par lignes dans leur ordre naturel, ce qui facilite beaucoup les recherches. Leur examen nous a permis de déterminer les influences qui agissent sur les parcours moyens.

8. *Influence de l'importance des agglomérations sur les parcours moyens.* — Plus tard, nous étudierons avec soin toutes les influences qui agissent sur les parcours moyens ; en ce moment, il nous suffit de signaler la principale dont l'ignorance empêcherait de discerner les lois qui se dégagent de l'étude des statistiques : c'est celle qu'exerce l'importance des agglomérations desservies par les stations. L'examen des résultats du trafic fait immédiatement reconnaître que, plus les agglomérations sont considérables, plus longs sont les parcours effectués sur les chemins de fer par les voyageurs qu'elles fournissent. Il en résulte que, pour déterminer l'influence exercée par d'autres causes sur les parcours moyens, il ne faut comparer entre elles que des stations desservant des localités de même importance.

Ceci posé, il est bien facile de reconnaître si la nature des lignes influe sur les parcours moyens.

9. *Les parcours moyens sur les réseaux d'intérêt général sont indépendants de l'importance des lignes.* — En consultant, par exemple, la statistique publiée pour 1890 par le ministère des travaux publics, on voit que la recette kilométrique varie de 103.952 à 2.427 francs pour les diverses lignes de la compagnie d'Orléans. L'écart est énorme. Si donc les parcours moyens étaient influencés par l'importance des lignes, comme le pense M. Colson, et étaient moindres pour les voyageurs fournis par les petits embranchements que pour ceux qui proviennent des grandes lignes, on devrait trouver des recettes moyennes, par voyageur, bien plus faibles pour les uns que pour les autres, pourvu que l'on eût soin de ne comparer entre elles que des stations d'importance analogue. Or on ne constate absolument rien de pareil.

Pour éliminer les villes importantes que les grands réseaux desservent bien plus souvent que les embranchements et qui donnent des parcours moyens très élevés, le procédé le plus simple est de rechercher dans les statistiques et de compter les stations qui donnent une très faible recette par voyageur. Nous avons choisi le chiffre de 1 franc, parce qu'il facilite beaucoup les recherches.

Laissant de côté les banlieues de Paris et de Bordeaux, nous avons reconnu que, sur les vingt pages de la statistique d'Orléans, celles qui renferment le moins de stations dont la recette soit inférieure à 1 franc par voyageur, se rapportent à des embranchements de faible

importance, notamment à ceux de Neussargues à Aurillac, Nontron à Angoulême, Eygurande à Largnac, Eygurande à Montluçon, Châteauroux à La Châtre, Doyet à Bézenet, etc.

Au contraire, les pages qui comprennent le plus de stations donnant une recette par voyageur inférieure à 1 franc, appartiennent aux grandes lignes et, en particulier, à celle d'Orléans à Poitiers, Angoulême et Bordeaux.

Nous n'irons pas jusqu'à tirer de ces faits la conclusion que c'est sur les petites lignes que l'on trouve, en général, le moins de stations donnant un faible parcours moyen, attendu que les longs trajets des voyageurs expédiés par les stations des embranchements que nous venons de citer, s'expliquent naturellement par la faible densité des populations qu'ils desservent et par la grande distance des centres d'attraction importants. Mais, au moins, est-il démontré que, pour le réseau d'Orléans, il n'y a pas plus de stations à faible parcours moyen sur les petits embranchements que sur les grandes lignes.

Comme d'ailleurs ce sont les grandes lignes qui desservent le plus de villes importantes donnant de longs parcours, il faut bien en conclure que des localités situées, par ailleurs, dans des conditions identiques, ne donnent pas de moindres parcours moyens des voyageurs, lorsqu'elles sont situées sur de petits embranchements que lorsqu'elles sont desservies par les grandes lignes.

Une étude analogue donne les résultats suivants pour le réseau de l'Ouest. Parmi les régions qu'il dessert, il y en a une où les parcours moyens sont exceptionnellement réduits, aussi bien sur les grandes lignes que sur les petits embranchements, c'est celle de Rouen, Elbeuf, Évreux, Lisieux et le Havre. Dans ce pays industriel, les centres sont très nombreux et rapprochés et les trajets sont naturellement fort réduits. Sur tout le reste du

réseau, les parcours sont beaucoup plus longs; mais, là aussi, les stations qui donnent moins de 1 franc de recette, sont également réparties entre les grandes et les petites lignes.

Nous n'avons pas fait d'études analogues sur le réseau du Nord, parce que les stations sont rangées dans sa statistique, non plus par ligne, dans l'ordre où elles se suivent, mais par degré d'importance, de sorte qu'il eût fallu des recherches extrêmement laborieuses pour comparer les stations des grandes lignes et celles des embranchements qui sont confondues dans les tableaux.

Comme nous l'avons déjà dit, nous avons cru inutile d'étudier les statistiques des stations des autres réseaux. (La compagnie de Paris-Lyon-Méditerranée n'en possède pas.) Nous avons pensé qu'on ne pourrait contester un fait vérifié dans toute l'étendue de deux réseaux comportant environ 1.800 stations, et nous généralisons ainsi les résultats qu'ils ont donnés :

Les parcours moyens des voyageurs fournis par les stations des grands réseaux sont absolument indépendants de l'importance des lignes qui les desservent.

Ce simple fait permet de prévoir le parcours moyen des voyageurs que fournirait un embranchement d'intérêt général à construire. Pour le déterminer, il suffirait de rechercher le parcours moyen des voyageurs expédiés par des stations que desservent des chemins de fer d'intérêt général quelconques, pourvu qu'elles fussent dans les mêmes conditions que les stations de l'embranchement, au point de vue des diverses influences qui agissent sur les parcours moyens.

Mais il ne serait légitime d'étendre cette méthode aux lignes d'intérêt local que si l'on établissait, au préalable, qu'il n'existe aucune différence essentielle, à ce point de

vue, entre les deux catégories de voies dont il s'agit. Nous allons faire cette démonstration.

10. *La conclusion précédente est également applicable aux lignes d'intérêt local.* — Il n'y a pas très longtemps que les grandes et les petites compagnies se considéraient encore comme des ennemies ; les premières ne voulaient s'imposer ni gêne ni dépense pour communiquer avec les secondes et celles-ci, convaincues que celles-là chercheraient à leur nuire, avaient pour principal souci de conserver une indépendance absolue.

On arrivait ainsi à établir des gares distinctes, quelquefois même éloignées l'une de l'autre. On n'avait pas de billets communs pour les voyageurs qui, parvenus à l'embranchement, devaient réclamer et attendre leurs bagages, sortir d'une gare, se rendre à l'autre, prendre de nouveaux billets et faire réenregistrer leurs bagages.

Entre l'arrivée d'un train et le départ de celui qui lui correspondait, il fallait laisser un délai assez long pour toutes ces démarches et la durée du voyage était augmentée d'autant.

En un mot, on faisait tout ce qui était possible pour élever une barrière entre les lignes des deux catégories et pour empêcher le public de passer des unes aux autres. On comprend qu'on devait y réussir dans une large mesure et que les voyageurs provenant des petites lignes ne continuaient pas leurs voyages sur les grands réseaux aussi volontiers que ceux des embranchements d'intérêt général et qu'ils n'y faisaient pas d'aussi longs parcours.

Mais, de part et d'autre, on a fini par comprendre combien ces errements sont funestes pour tous, et les grandes compagnies se sont décidées à traiter, presque comme leurs propres embranchements, les chemins de fer d'intérêt local tracés de manière à leur apporter du

trafic. On fait gare commune et on délivre, dans les stations de chaque compagnie, des billets communs, au moins pour les gares de l'autre réseau avec lesquelles elles ont des relations fréquentes.

En quoi de pareils chemins de fer se distinguent-ils des embranchements des grandes Compagnies, au point de vue du trafic des voyageurs? En ceci seulement que la vitesse y est un peu moindre et les tarifs très légèrement supérieurs. Mais il est évident que ce sont les voyages à courte distance, effectués sur la petite ligne, que cette infériorité doit surtout entraver, parce qu'elle pèse alors sur la totalité du parcours et du prix, tandis que son importance relative est minime pour les longs voyages dont la plus grande partie se fait sur les grands réseaux. Cette infériorité des chemins de fer d'intérêt local doit donc augmenter, plutôt que diminuer, le parcours moyen des voyageurs qui empruntent leurs rails pour une partie du trajet.

En conséquence, nous ne voyons aucune raison pour admettre que la catégorie à laquelle appartient une voie ferrée, puisse influer sur le parcours moyen des voyageurs qui l'empruntent et nous croyons, par suite, pouvoir étendre aux chemins de fer d'intérêt local l'assimilation que l'étude des statistiques nous a amené à faire, à ce point de vue, entre les grandes lignes et les petits embranchements d'intérêt général.

La conclusion pratique qui s'en dégage, peut se formuler ainsi :

Pour déterminer la valeur probable du parcours moyen des voyageurs qui emprunteront les chemins de fer d'intérêt local soudés intimement aux grands réseaux, il suffit de déterminer la valeur réelle du parcours moyen des voyageurs provenant de stations des grands réseaux choisies parmi celles qui sont analogues aux stations des chemins de fer d'intérêt local, au point de vue des

diverses influences qui peuvent agir sur les parcours moyens des voyageurs.

11. *Influences qui agissent sur les parcours moyens des voyageurs.* — Quelles sont ces influences?

Nous avons déjà indiqué l'une d'elles : l'importance des agglomérations desservies par les stations.

La seconde est la distance de ces agglomérations à leurs centres naturels d'attraction : il est clair que plus cette distance sera grande, plus longs seront les parcours moyens.

La troisième est l'importance de ces centres d'attraction.

Les villes de 200.000, 100.000 âmes et parfois moins sont, en quelque sorte, les capitales des régions voisines, le principal marché de vente pour leurs produits et d'achat pour les marchandises qu'elles consomment. En conséquence, le plus grand nombre des voyageurs s'y arrêtent et ne vont pas plus loin. Au contraire, si la ville voisine a peu d'importance, des relations s'établissent au delà, à grande distance, et augmentent les parcours moyens.

En dehors de ces influences, nous ne voyons rien qui puisse exercer une action sur les parcours moyens, si ce n'est pourtant le caractère différent des diverses populations.

On aurait pu croire que la distance des stations à Paris exerce aussi une grande influence sur les parcours des voyageurs qu'elles expédient, on verra plus loin qu'il n'en est rien pour les voyageurs.

12. *Recherche des stations des grands réseaux analogues à celles des chemins de fer d'intérêt local.* — Ceci posé, si l'on admet que la longueur moyenne des chemins de fer d'intérêt local restera ce qu'elle est aujourd'hui, c'est-à-dire de 20 à 25 kilomètres, et qu'il n'y a pas de raisons pour penser que les localités qu'ils desserviront, seront plus ou moins importantes que celles que les lignes d'intérêt général desservent dans un rayon de 20 à 25 kilomètres autour des villes, la proposition qui termine le paragraphe précédent, se transformera nécessairement en celle-ci :

Pour déterminer la valeur probable du parcours moyen des voyageurs qui emprunteront les chemins de fer d'intérêt local soudés intimement aux grands réseaux, il suffit de déterminer la valeur réelle du parcours moyen des voyageurs provenant de stations des grands réseaux situées dans des rayons de 20 à 25 kilomètres autour des villes de même importance que celles qui se trouveront à l'origine des embranchements des lignes d'intérêt local.

13. *Recettes par voyageur de telles stations.* — Nous avons fait cette étude pour 175 stations situées à moins de 20 kilomètres de trente-huit villes du réseau d'Orléans et pour 117 stations situées à moins de 25 kilomètres de vingt et une villes du réseau de l'Ouest et nous avons indiqué, dans les tableaux nos 3 et 4, les recettes, par voyageur, des stations situées dans la banlieue de chacune de ces villes.

TABLEAU N° 3. — RÉSEAU D'ORLÉANS.

Recettes, par voyageur, des stations situées à moins de 20 kilomètres des villes ci-après :

BANLIEUES DE	DISTANCES à Paris	RECETTES par voyageur	BANLIEUES DE	DISTANCES à Paris	RECETTES par voyageur
1° Banlieues de villes ayant moins de 10.000 habitants agglomérés.					
	kilom.	francs		kilom.	francs
T Pontivy	636	1,80	Le Blanc	333	2,70
Ribérac	534	1,40	La Châtre	300	2,80
Nontron	496	1,70	La Flèche	295	1,50
Bourganeuf	408	2,60	T Vendôme	177	1,90
T Ruffec	398	3,00	Pithiviers	95	1,30
Montmorillon	372	2,30	Etampes	56	1,40
Guéret	366	2,80			
Moyenne : 2f,10.					
2° Banlieues de villes ayant de 10.000 à 20.000 habitants.					
Quimper	681	1,90	Tulle	505	1,10
T Rodez	664	1,70	Brive	502	2,50
T Agen	651	1,20	T Moulins	313	1,20
Bergerac	640	1,60	T Saumur	295	1,80
Aurillac	605	2,40	Châteauroux	263	1,80
Cahors	602	1,80	T Blois	178	1,80
Vannes	562	1,40			
Moyenne : 1f,70.					
3° Banlieues de villes ayant de 20.000 à 40.000 habitants.					
Périgueux	499	1,50	T Poitiers	332	0,90
T Angoulême	445	1,10	T Bourges	232	1,20
T Clermont-Ferrand	378	2,50			
Moyenne : 1f,50.					
4° Banlieues de villes ayant plus de 40.000 habitants.					
T Toulouse	716	1,10	T Tours	234	1,10
T Nantes	427	1,80	T Le Mans	211	0,80
Limoges	400	1,50	T Orléans	121	1,80
T Angers	339	1,10			
Moyenne : 1f,30.					

TABLEAU N° 4. — RÉSEAU DE L'OUEST.

Recettes, par voyageur, des stations situées à moins de 25 kilomètres des villes ci-après :

BANLIEUES DE	DISTANCES à Paris	RECETTES par voyageur	BANLIEUES DE	DISTANCES à Paris	RECETTES par voyageur
1° Banlieues de villes ayant moins de 10.000 habitants agglomérés.					
	kilom.	francs		kilom.	francs
T Ploërmel	453	2,40	Argentan	197	1,90
Avranches	390	2,80	Yvetot	178	1,70
Saint-Lô	315	1,70	T Nogent-le-Rotrou	149	2,50
Segré	314	2,40	Dreux	82	1,90
Mayenne	281	1,80	Mantes	58	2,40
Moyenne : 2f,10.					
2° Banlieues de villes ayant de 10.000 à 20.000 habitants.					
Morlaix	550	1,90	Evreux	108	1,50
Saint-Brieuc	462	3,10	T Chartres	88	1,30
Moyenne : 1f,90.					
3° Banlieues de villes ayant de 20.000 à 40.000 habitants.					
Laval	301	1,50	T Caen	239	1,50
Moyenne : 1f,50.					
4° Banlieues de villes ayant plus de 40.000 habitants.					
T Nantes	397	1,10	T Le Mans	211	1,30
Rennes	374	1,20	Rouen	136	0,60
T Angers	308	1,70			
Moyenne : 1f,20.					

Les recettes par voyage sont, en moyenne, pour les banlieues des villes :

	De moins de 10.000 habitants.	De 10.000 à 20.000 habitants.	De 20.000 à 40.000 habitants.	De plus de 40.000 habitants.
	fr.	fr.	fr.	fr.
Pour le réseau d'Orléans de. . .	2,10	1,70	1,60	1,30
Et pour le réseau de l'Ouest de.	2,10	1,90	1,50	1,20

Les chiffres relatifs aux diverses banlieues d'un même groupe sont loin d'être égaux entre eux, et ce fait enlève tout caractère absolu aux moyennes qu'on peut en tirer.

Elles seraient différentes si l'on avait choisi d'autres villes que celles que nous avons prises au hasard. Toutefois les anomalies les plus marquées sont faciles à expliquer. Ainsi les banlieues de Clermont-Ferrand et de Saint-Brieuc doivent leurs recettes moyennes exceptionnellement élevées, l'une à la station balnéaire de Royat, l'autre à la ville de Lamballe, qui a 4.362 habitants et qui dépasse ainsi, de beaucoup, l'importance des localités que l'on trouve, en général, dans les banlieues. Si l'on constate, au contraire, des chiffres si bas pour Angoulême et Poitiers, c'est parce que ces villes sont des points de transit avec d'autres compagnies, auxquelles profite une partie des recettes des voyageurs expédiés par les stations voisines appartenant au réseau d'Orléans.

Les chiffres de recettes fournis par les statistiques de la compagnie d'Orléans ne représentent donc qu'une partie des recettes totales correspondant aux parcours faits sur des rails quelconques par les voyageurs qu'expédient les stations des banlieues d'Angoulême et de Poitiers. Il en est de même pour dix-huit des trente-sept villes inscrites au tableau n° 3 qui sont aussi des points de transit et pour sept des vingt et une villes inscrites au tableau n° 4. Ces villes sont marquées de la lettre T.

Il est, en conséquence, certain que les recettes moyennes, par voyageur, données par ces tableaux sont beaucoup trop faibles. Si on les majore d'un dixième, ce qui semble très modéré, on trouve, pour les stations comprises dans les banlieues des villes :

	De moins de 10.000 habitants.	De 10.000 à 20.000 habitants.	De 20.000 à 40.000 habitants.	De plus de 40,000 habitants.
Des recettes moyennes par voyageur de	2f,30	2f,00	1f,70	1f,40
Qui correspondent à des parcours moyens de	46km	40km	34km	28km

au tarif moyen de 0f,05 par kilomètre qui doit être consi-

déré comme un maximum pour des stations de banlieue où dominent les billets d'aller et retour.

Les villes de plus de 20.000 âmes étant peu nombreuses et étant, en général, les points de convergence de plusieurs lignes d'intérêt général qui sillonnent leurs banlieues, il est probable qu'il n'y aura qu'un nombre assez restreint de lignes d'intérêt local partant *directement* de villes d'une telle importance, et que les régions desservies par les chemins de fer d'intérêt local seront, en général, comprises dans les banlieues de villes ayant moins de 20.000 et souvent moins de 10.000 âmes. S'il en est ainsi, il résulte des chiffres ci-dessus qu'on doit prévoir 40 kilomètres, au moins, pour le parcours moyen des voyageurs qui emprunteront les chemins de fer d'intérêt local de la région desservie par les réseaux d'Orléans et de l'Ouest, auxquels s'applique l'étude statistique que nous venons de faire.

Ce chiffre de 40 kilomètres est applicable à toutes les régions qui sont analogues aux contrées traversées par les réseaux d'Orléans et de l'Ouest, au point de vue de la distance et de l'espacement des centres d'attraction, et de l'importance relative de l'agriculture et de l'industrie, c'est-à-dire à la presque totalité des territoires que desservent les réseaux de Paris-Lyon-Méditerranée, du Midi, de l'État, et une partie de celui de l'Est.

En dehors de cette vaste superficie, il ne reste que 1/5 environ du territoire français, qui forme la région du Nord et la partie industrielle du réseau de l'Est. Là, on constaterait assurément des parcours moyens bien plus réduits pour les voyageurs; mais, alors même qu'on ne leur assignerait que la valeur inadmissible de 20 kilomètres, on trouverait $\frac{4}{5}\,40 + \frac{1}{5}\,20 = 36$ kilomètres pour la valeur probable du parcours moyen que feraient, sur l'ensemble des voies ferrées, les voyageurs empruntant, pour

une partie du parcours, les chemins de fer d'intérêt local que l'on pourra construire en France.

14. *Parcours moyen des voyageurs sur les chemins de fer d'intérêt local.* — L'étude attentive, peut-être même minutieuse à l'excès, que nous venons de faire, nous amène donc à regarder comme trop faible la valeur de 30 kilomètres que nous avons admise, dans notre premier mémoire, pour le parcours moyen que feront, sur tous les réseaux, les voyageurs qui fréquenteront les chemins de fer d'intérêt local français. On voit quel dissentiment nous sépare de M. Colson, qui pense que ce chiffre de 30 kilomètres est très exagéré.

Au paragraphe 11, nous avons dit que la distance à Paris n'influe guère sur les parcours des voyageurs. Les tableaux nos 3 et 4 en donnent la démonstration ; les banlieues y sont rangées par ordre de distance décroissante à Paris, et cette distance varie dans la proportion énorme de 716 à 56 kilomètres. Si donc cet élément influait notablement sur les parcours moyens, on constaterait une décroissance très marquée dans les recettes par voyageur. Or, il n'en est rien, et la diminution est bien faible si elle existe.

Il faut en conclure que la distance à Paris n'exerce pas une grande influence sur les parcours moyens des voyageurs des petites stations situées hors de sa banlieue, les seules qui nous intéressent au point de vue de l'étude des chemins de fer d'intérêt local.

15. *Prévision du parcours moyen des voyageurs sur une ligne déterminée.* — Nous n'aurions pas besoin de pousser plus loin cette étude si nous voulions seulement répondre aux critiques de M. Colson et mettre hors de doute les conclusions de notre premier travail qui ne visent qu'une moyenne applicable à l'ensemble des futurs

réseaux d'intérêt local français ; mais il nous semble utile de formuler certaines observations que nous a suggérées l'étude précédente et qui peuvent permettre de prévoir, dans une certaine mesure, le parcours moyen que feront, sur tous les réseaux, les voyageurs fréquentant, non plus l'ensemble des chemins de fer d'intérêt local français, mais une ligne déterminée. Les grandes compagnies et l'État, qui est directement intéressé à leurs recettes, ont besoin de connaître ce chiffre d'où dépend l'augmentation de trafic et, par suite, de bénéfice net qu'ils peuvent attendre d'un chemin de fer d'intérêt local : c'est, en grande partie, sur lui qu'ils doivent régler les sacrifices à accepter pour la construction et l'exploitation d'une ligne déterminée.

On a vu que le parcours moyen des voyageurs en provenance ou à destination d'une station dépend surtout de trois éléments principaux : sa population agglomérée, celle de son centre d'attraction le plus rapproché et la distance qui l'en sépare.

Pour déterminer l'influence de chacun de ces éléments, il ne suffit plus de réunir, en un seul total, les recettes de toutes les stations de chaque banlieue, comme on l'a fait dans les tableaux nos 3 et 4 ; il faut les diviser en un grand nombre de groupes dont chacun ne comprenne que des stations desservant des localités de population, à peu près, égale et qui soient situées à des distances, à peu près, égales aussi de leurs centres d'attraction.

Nous avons fait ce travail, mais comme il est très laborieux, nous ne l'avons étendu qu'à un nombre de stations assez limité. Les résultats qu'il a donnés, sont donc les moyennes de chiffres trop peu nombreux pour être considérés comme ayant une grande valeur ; nous les donnons sous toutes réserves, comme une première approximation que de nouvelles études rendront plus satisfaisante. A défaut d'autre mérite, leur représentation graphique

aura l'avantage de rendre sensible aux yeux le sens, sinon la valeur exacte de l'influence que chaque élément exerce sur les parcours moyens des voyageurs provenant des stations de banlieue.

16. *Représentation graphique de la loi de variation des parcours moyens.* — On a pris pour abscisses les distances des stations au centre d'attraction voisin et on a limité l'épure aux abscisses représentant 5 et 25 kilomètres, distances entre lesquelles sont, en général, situées les stations des chemins de fer d'intérêt local. L'échelle des abscisses est de $0^m,0025$ par kilomètre.

Les ordonnées représentent les recettes par voyageur expédié, à l'échelle de $0^m,05$ par franc, ou encore les parcours moyens, à l'échelle de $0^m,0025$ par kilomètre. On a réuni par une même courbe les sommets des ordonnées correspondant aux stations qui desservent des localités d'égale population, situées dans les banlieues de villes de même importance.

Ne pouvant tracer toutes les courbes qui représenteraient toutes les combinaisons possibles des diverses variables, on a tracé, en traits pleins, les quatre courbes $A^3 — B^3 — C^3 — D^3$ qui représentent les recettes, par voyageur, de stations desservant des localités moyennes de 500 à 1.000 habitants situées dans les banlieues de villes de moins de 10.000 — 10.000 à 20.000 — 20.000 à 40.000 — et plus de 40.000 habitants. Ces quatre courbes correspondent aux quatre groupes des tableaux nos 3 et 4. La courbe A_3, par exemple, représente donc la loi suivant laquelle la recette par voyageur varie, en fonction de la distance au centre d'attraction, pour les stations desservant des localités de 500 à 1.000 habitants situées dans la banlieue de villes de moins de 10.000 âmes.

En outre, nous avons tracé, en pointillé et en ponctué, deux séries de courbes dont chacune se rapporte à des

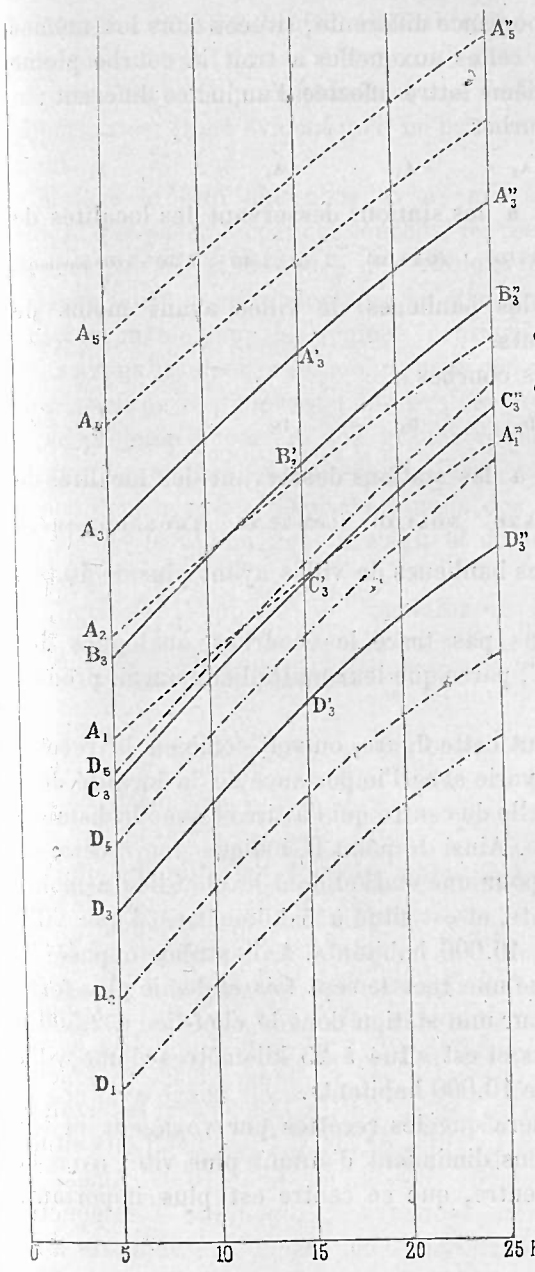


Fig. 1.

Loi de variation du parcours moyen des voyageurs des petites localités en fonction de la population de ces localités, de la population de leur centre d'attraction et de la distance qui les en sépare.

Échelles :

Abscisses : $0^m,0025$ par kilomètre de distance.

Ordonnées : $0^m,0025$ par kilomètre de parcours.

stations d'importance différente, situées dans les mêmes banlieues que celles auxquelles a trait la courbe pleine qui porte la même lettre affectée d'un indice différent :

Ainsi les courbes

A_1 A_2 A_3 A_4 A_5

se rapportent à des stations desservant des localités de

moins de 200 — 200 à 500 — 500 à 1.000 — 1.000 à 2.500 — 2.500 à 5.000 habitants,

situées dans les banlieues de villes ayant moins de 10.000 habitants.

De même les courbes

D_1 D_2 D_3 D_4 D_5

se rapportent à des stations desservant des localités de

moins de 200 — 200 à 500 — 500 à 1.000 — 1.000 à 2.500 — 2.500 à 5.000 habitants,

situées dans les banlieues de villes ayant plus de 40.000 habitants.

Nous n'avons pas tracé les courbes analogues des groupes B et C, parce que leur multiplicité aurait produit la confusion.

En examinant cette figure, on voit combien la recette par voyageur varie avec l'importance de la localité desservie, avec celle du centre qui l'attire et avec la distance qui l'en sépare. Ainsi le point D_1 indique une recette de $0^f,40$ environ pour une station dont le chef-lieu a moins de 200 habitants, et est situé à 5 kilomètres d'une ville ayant plus de 40.000 habitants. A l'extrême opposé, le point A''_5 indique une recette sept fois et demie plus forte de 3 francs, pour une station dont le chef-lieu a 2.500 à 5.000 habitants et est situé à 25 kilomètres d'une ville ayant moins de 10.000 habitants.

On remarquera que les recettes par voyageur et les parcours moyens diminuent d'autant plus vite, avec la distance au centre, que ce centre est plus important.

Lorsqu'il a moins de 10.000 habitants, les courbes de la série A montrent que sa distance n'influe guère sur les parcours moyens, principalement sur ceux des stations importantes. Il est évident qu'il ne pouvait en être autrement.

Malgré le soin que nous avons mis à représenter, autant que possible, par ces courbes, les résultats moyens donnés par les statistiques des stations d'Orléans et de l'Ouest, nous ne prétendons pas qu'elles aient une valeur absolue, même pour des régions identiques à celles que nous avons étudiées ; néanmoins, nous pensons qu'on peut tirer parti de ces courbes pour évaluer le trafic qu'une ligne projetée apportera aux grands réseaux, à la condition d'examiner, dans chaque cas, comment elles concordent avec les résultats connus des stations existantes de la région dont il s'agit et de les modifier en conséquence.

Toutefois, il importe de constater un fait qui limite l'importance de la réserve que nous venons de formuler sur la valeur de ces courbes.

17. *Les parcours moyens des voyageurs varient peu d'une région à l'autre.* — Les variations que présentent, d'une région à l'autre, les recettes par voyageur et, par suite, les parcours moyens, sont assez faibles et hors de proportion avec celles que l'on constate dans le nombre des voyageurs par habitant de population desservie. Ainsi, les habitants de la région de Libourne voyagent trente-six fois plus que les riverains de la ligne d'Auray à Pontivy, et cependant, malgré cette énorme différence d'activité, les uns et les autres font des parcours moyens à peu près égaux, lorsqu'ils sont dans les mêmes conditions au point de vue de l'importance de la localité qu'ils habitent, du centre qui les attire et de la distance qui les en sépare.

En dehors des pays industriels à population très dense, le parcours moyen des voyageurs varie donc peu d'une région à l'autre, et, par conséquent, il est facile de l'évaluer approximativement d'avance. Il en résulte que les études faites, à ce point de vue, pour une contrée quelconque sont, pour d'autres, un premier renseignement qui n'est pas sans intérêt, tandis qu'on s'exposerait aux plus graves erreurs en admettant que le nombre de voyageurs par habitant est, à peu près, le même dans les diverses parties de la France, comme on l'a fait trop souvent.

18. *Parcours moyens des marchandises sur les grands réseaux.* — Nous allons étudier les parcours moyens des marchandises, en suivant la marche que nous avons adoptée pour ceux des voyageurs. Nous pourrons aller plus vite parce que la plupart des considérations que nous avons développées, s'appliquent également aux deux espèces de transports.

Les statistiques officielles des chemins de fer d'intérêt général français donnent 128 kilomètres comme parcours moyen des marchandises en 1889, dernière année dont nous ayons la statistique ; mais ce chiffre est bien loin de représenter le parcours moyen que les marchandises ont réellement effectué sur des rails quelconques.

D'une part, en effet, les chemins de fer d'intérêt général comprennent un certain nombre de petits réseaux sur lesquels les parcours, forcément restreints, sont compris entre $3^{km},5$ et $51^{km},1$. Tel est notamment le cas de la grande et de la petite Ceinture que les marchandises n'empruntent guère que pour transiter d'un réseau à l'autre. Si on laisse de côté ces petits réseaux pour ne considérer que les grandes compagnies, on obtient un parcours moyen de 140 kilomètres au lieu de 128 kilomètres.

Mais ce n'est là que la moindre des corrections dont il faut tenir compte. Ce qui fausse surtout les statistiques au point de vue des parcours moyens, c'est ce fait, déjà signalé pour les voyageurs, mais bien autrement important pour les marchandises, qu'une unité de transport qui parcourt D kilomètres sur deux ou sur trois réseaux, figure aux statistiques de deux ou de trois compagnies, comme deux ou trois unités différentes ayant parcouru, en moyenne, $\frac{D}{2}$ ou $\frac{D}{3}$ kilomètres seulement.

Pour apprécier l'importance de cette cause d'erreur, il suffit d'étudier le tableau des recettes des stations et de déterminer la fraction du trafic qui provient du transit.

Pour l'Orléans, par exemple, le nombre de tonnes expédiées ou reçues en transit pendant l'année 1889 a été de 3.318.000. Toutes ces unités figurent à la statistique de deux compagnies, au moins, parfois de trois, alors que, n'ayant fait qu'un seul parcours, elles ne seraient inscrites qu'une fois à la statistique des chemins de fer français, si tous les réseaux étaient confondus. Pour calculer les parcours réels sur des rails quelconques, on devrait donc ne compter que pour 1/2 ou 1/3 de leur nombre ces unités de transit, suivant qu'elles ont emprunté un ou deux réseaux.

Le minimum de la réduction que l'on doit faire subir au chiffre de 8.151.000 tonnes à toute distance, porté à la statistique de la compagnie d'Orléans en 1889, est donc de :

$$\frac{3.318.000}{2} = 1.659.000 \text{ tonnes.}$$

Le nombre des tonnes kilométriques transportées étant de 1.473.000.000, le parcours moyen des marchandises sur le réseau d'Orléans est donc, au moins, de :

$$\frac{1.473.000.000}{8.151.000 - 1.659.000} = 227 \text{ kilomètres,}$$

au lieu de :

$$\frac{1.473.000.000}{8.151.000} = 181 \text{ kilomètres,}$$

chiffre qui figure à la statistique officielle.

La majoration qui en résulte pour le parcours moyen sur le réseau d'Orléans, dépasse 25 p. 100, et il est vraisemblable qu'elle atteindrait 30 p. 100 si l'on tenait compte des transports qui ont emprunté trois ou quatre réseaux, au lieu de deux. Il n'y a pas de raison pour croire qu'en moyenne, les autres réseaux ne soient pas dans des conditions analogues, car si celui de P.-L.-M. est plus grand, plus homogène et a, sans doute, relativement moins de transit, il est probable que c'est l'inverse pour les autres réseaux, dont chacun a moins d'étendue que celui d'Orléans.

Il semble donc vraisemblable que la majoration de 25 ou 30 p. 100 qu'il convient d'appliquer au parcours moyen des marchandises sur le réseau d'Orléans, doit être également adoptée pour le parcours moyen des six grandes compagnies qui, du chiffre de 140 kilomètres précédemment obtenu, devrait être ainsi porté à 180 kilomètres.

On voit qu'en admettant 127 kilomètres pour le parcours moyen, sur tous rails, des marchandises qui fréquentent ou fréquenteront les lignes d'intérêt local, nous sommes resté bien au-dessous du parcours moyen des marchandises qui circulent sur l'ensemble des chemins de fer français. Cette différence semblera, sans doute, plus que suffisante au lecteur qui se reportera aux considérations que nous avons développées dans notre premier mémoire (paragraphe 26) pour démontrer qu'à ce point de vue, il y a bien peu de différence entre les deux catégories de voies ferrées ; mais, vu l'importance que cette question présente pour notre argumentation, nous allons justifier, avec plus de rigueur la valeur du parcours

moyen que nous avons admise pour les marchandises. Nous suivrons la même marche que pour les voyageurs.

19. *Influences qui modifient les parcours moyens.* — Lorsqu'on étudie la statistique détaillée des recettes des marchandises des diverses gares d'une compagnie, de celle d'Orléans par exemple, on remarque immédiatement que les recettes moyennes par tonne, et, par suite, les parcours moyens sont, en général, notablement plus forts pour les grandes gares que pour les petites stations. Toutefois la différence est bien moindre que pour les voyageurs.

On reconnaît aussi, qu'à l'encontre de ce qui a lieu pour les voyageurs, la distance aux centres de première importance commerciale tels que Paris, Bordeaux et Nantes, influe, au moins, autant sur les parcours des marchandises que la distance aux centres secondaires, alors même que ces derniers sont beaucoup plus voisins. C'est la conséquence naturelle de ce fait que les échanges de marchandises se font dans un rayon bien plus étendu que les transports de voyageurs, ainsi que le prouve la grande différence des parcours moyens des marchandises et des voyageurs qui sont dans le rapport de 3 à 1.

Ces observations préliminaires étaient nécessaires pour interpréter les résultats de l'étude des statistiques dont nous allons rendre compte.

20. *L'importance des lignes d'intérêt général n'influe pas sur les parcours moyens des marchandises.* — Nous avons d'abord voulu rechercher si l'importance des lignes influe sur le parcours moyen des marchandises qui les empruntent, comme le pense M. Colson. Dans ce but, nous avons marqué, sur la statistique détaillée du réseau d'Orléans, les stations qui donnent moins de 10 francs par tonne expédiée, et nous avons reconnu que les sec-

tions de lignes qui comportent la plus faible proportion de telles stations, sont les suivantes : Blois à Tours — Châtellerault à Ruffec — Coutras à Bordeaux — Auray à Châteaulin — Tours à Vierzon — Argenton à Saint-Sulpice-Laurière — Loches à Châteauroux — Poitiers à Argenton — Guéret à Busseau — Guéret à Saint-Sébastien — Bourganeuf à Vieilleville — Saint-Saviol à Lussac — Libourne à Bergerac — Saint-Denis au Buisson — Saint-Denis à Aurillac — Miécaze à Mauriac — Monsempron à Cahors — Montluçon à Eygurande.

Dans cette énumération figurent six tronçons de grandes lignes et douze petites lignes dont plusieurs peuvent être assimilées à des chemins de fer d'intérêt local.

Il semble donc bien établi que, pas plus pour les marchandises que pour les voyageurs, les parcours moyens du trafic que donne une localité déterminée, située à une distance également déterminée de ses centres d'attraction, ne varient avec l'importance de la ligne d'intérêt général qui la dessert.

21. *La nature des chemins de fer, pas plus que leur importance, n'influe sur les parcours des marchandises.* — La catégorie à laquelle appartient une ligne, n'influe pas plus que son importance sur les parcours moyens des marchandises qu'elle expédie, et il importe peu qu'elle soit d'intérêt général ou local, pourvu qu'elle soit bien reliée aux grands réseaux.

Si le passage d'une ligne à l'autre occasionnait de longs retards et des dépenses excessives, il est évident qu'il empêcherait le transit. Le trafic des marchandises de la ligne d'intérêt local se réduirait presque aux relations réciproques de ses propres stations, c'est-à-dire généralement à bien peu de chose. Comme nous l'avons dit à propos des voyageurs, tel est le cas de certains

réseaux d'intérêt local qui ont été construits à une époque où leurs concessionnaires redoutant, avec quelque raison parfois, les exigences des grandes compagnies, avaient à cœur de s'en rendre absolument indépendants et établissaient des gares séparées qui communiquaient difficilement avec les grands réseaux au prix de dépenses excessives et quelquefois par camions seulement. Mais, à l'heure actuelle, ces errements sont partout abandonnés, et il en résulte un progrès plus important encore pour les marchandises que pour les voyageurs. Les voies des deux réseaux sont mises en contact intime et l'on s'applique à réduire au minimum la durée et les frais du transbordement.

Toutefois, à notre avis, il reste encore quelque chose à faire, et on devrait appliquer, pour la fixation des tarifs, des idées analogues à celles dont on s'est inspiré pour l'installation des gares communes. Quoique l'on fasse, le transbordement entraînera toujours quelques dépenses, surtout quand il se fera entre des voies de largeurs différentes. Or nous croyons que l'intérêt des compagnies leur commande de supporter ces frais dans la plupart des cas et de n'en pas majorer les tarifs kilométriques. Au paragraphe 41, nous chercherons à en donner la démonstration dont nous n'avons pas encore les éléments.

Si les grandes compagnies adoptent ce point de vue, les chemins de fer d'intérêt local seront, pour le public, de vrais prolongements de leurs réseaux et ne différeront des embranchements d'intérêt général que par l'application de taxes kilométriques plus élevées. Mais, ainsi que nous l'avons fait observer pour le trafic des voyageurs, cette différence de tarifs ne pourra qu'augmenter les parcours moyens des transports qui les fréquenteront, au lieu de les réduire, car elle aura une importance relative d'autant moindre que le parcours sur la

petite ligne sera une fraction plus faible du parcours total, et ce seront, par conséquent, les transports à grande distance qu'elle entravera le moins.

En résumé, l'étude des statistiques établit que les parcours moyens des marchandises sont influencés par diverses causes, notamment par l'importance et la nature des localités qui les reçoivent ou les expédient, ainsi que par leur distance aux centres d'attraction prochains ou éloignés, mais qu'ils ne dépendent nullement de la catégorie des voies ferrées qui les desservent. Ces deux faits conduisent à la conclusion suivante :

Si l'on admet que les chemins de fer d'intérêt local français auront la même longueur moyenne que les lignes actuelles, c'est-à-dire 20 à 25 kilomètres, on obtiendra la valeur probable du parcours moyen total des marchandises qui emprunteront leurs rails, en déterminant la valeur réelle du parcours moyen des marchandises qu'expédient actuellement les stations des grands réseaux qui sont dans les mêmes conditions au point de vue de la distance aux grands centres commerciaux et qui sont situées à moins de 20 ou 25 kilomètres de villes comparables à celles d'où partiront les chemins de fer d'intérêt local.

22. *Recettes par tonne de marchandises des stations de banlieue.* — Nous avons fait cette étude pour les réseaux d'Orléans et de l'Ouest comme nous l'avions faite pour les voyageurs ; nous en donnons les résultats dans les tableaux n°s 5 et 6.

TABLEAU N° 5. — RÉSEAU D'ORLÉANS.

Recettes, par tonne de marchandises, des stations situées à moins de 20 kilomètres des villes ci-après :

BANLIEUES DE	DISTANCES à Paris	RECETTES par tonne	BANLIEUES DE	DISTANCES à Paris	RECETTES par tonne
1° Banlieues de villes ayant moins de 10.000 habitants agglomérés.					
	kilom.	francs		kilom.	francs
T Pontivy	636	10,00	Le Blanc	333	13,00
Ribérac	534	7,00	La Châtre	300	8,00
Nontron	496	7,00	La Flèche	295	6,00
Bourganeuf	408	7,00	T Vendôme	177	11,00
T Ruffec	398	14,00	Pithiviers	95	2,00
Montmorillon	372	9,00	Etampes	56	4,00
Guéret	366	9,00			
Moyenne : 8f,20.					
2° Banlieues de villes ayant de 10.000 à 20.000 habitants.					
Quimper	681	10,00	Tulle	505	10,00
T Rodez	664	4,00	Brives	502	14,00
T Agen	651	6,00	T Moulins	313	5,00
Bergerac	640	9,00	T Saumur	295	7,00
Aurillac	605	7,00	Châteauroux	263	12,00
Cahors	602	13,00	T Blois	178	6,00
Vannes	562	6,00			
Moyenne : 8f,40.					
3° Banlieues de villes ayant de 20.000 à 40.000 habitants.					
Périgueux	499	8,00	T Poitiers	332	10,00
T Angoulême	445	7,00	T Bourges	232	5,00
T Clermont-Ferrand	378	4,20			
Moyenne : 7f,00.					
4° Banlieues de villes ayant plus de 40.000 habitants.					
T Toulouse	716	3,00	T Tours	234	11,00
T Nantes	427	10,00	T Le Mans	211	3,00
Limoges	400	11,00	T Orléans	121	6,00
T Angers	339	6,00			
Moyenne : 7f,00.					

TABLEAU N° 6. — RÉSEAU DE L'OUEST.

Recettes, par tonne de marchandises, des stations situées à moins de 25 kilomètres des villes ci-après :

BANLIEUES DE	DISTANCES à Paris	RECETTES par voyageur	BANLIEUES DE	DISTANCES à Paris	RECETTES par voyageur
	kilom.	francs		kilom.	francs
1° Banlieues de villes ayant moins de 10.000 habitants agglomérés.					
† Ploërmel	453	9,00	Argentan	197	8,00
Avranches	390	11,00	Yvetot	178	9,00
Saint-Lô	345	1,00	† Nogent-le-Rotrou	149	13,00
Segré	314	10,00	Dreux	82	10,00
Mayenne	281	14,00	Mantes	58	9,10
Moyenne : 9f,40.					
2° Banlieues de villes ayant de 10.000 à 20.000 habitants.					
Morlaix	550	20,00	Evreux	108	8,00
Saint-Brieuc	462	10,00	† Chartres	88	7,00
Moyenne : 11f,00.					
3° Banlieues de villes ayant de 20.000 à 40.000 habitants.					
Laval	301	3,00	† Caen	239	7,00
Moyenne : 5f,00.					
4° Banlieues de villes ayant plus de 40.000 habitants.					
† Nantes	397	10,00	† Le Mans	211	19,00
Rennes	374	10,00	Rouen	136	8,80
† Angers	308	16,00			
Moyenne : 12f,80.					

En ce qui concerne la compagnie d'Orléans, le tableau n° 5 renferme les chiffres relatifs à 175 stations groupées à moins de 20 kilomètres de 38 villes d'une importance très différente.

Sauf une seule, celle de Vannes, toutes les banlieues pour lesquelles on trouve moins de 7 francs de recette par tonne, sont situées près d'un point de transit, par lequel une partie du trafic s'échappe à très courte distance et passe à une compagnie voisine dont les recettes

n'entrent pas en compte. Ainsi La Flèche est à 31 kilomètres de la ligne du Mans à Angers, qui appartient au réseau de l'Ouest. Pithiviers est à 22 kilomètres de Malesherbes où ses transports vers Paris prennent le Paris-Lyon-Méditerranée. Étampes est à 56 kilomètres de Paris. Rodez, Agen, Moulins, Blois, Bourges (*), Toulouse, Angers, Le Mans et Orléans sont des points de transit, et les marchandises provenant des banlieues de ces villes, qui passent d'un réseau à l'autre, ne font, sur celui d'Orléans, que des parcours minimes dont la recette ne représente qu'une faible fraction de celles qu'elles donnent à toutes les compagnies.

Pour les autres banlieues, la recette moyenne par tonne varie de 7 à 14 francs ; les chiffres les plus élevés s'appliquant, en général, aux groupes les plus éloignés des grandes agglomérations, telles que Paris, Bordeaux et Nantes.

A l'inverse de ce qui se produit pour les voyageurs, les grands centres commerciaux, même éloignés, exercent donc, sur le trafic des marchandises, une action qui l'emporte sur celle des villes plus rapprochées mais de moindre importance, et l'on comprend qu'il devait en être ainsi ; car, d'une part, les grands marchés doivent agir au loin sur les marchandises dont les parcours moyens sont trois fois plus grands que ceux des voyageurs, et, d'autre part, les petites villes produisent et consomment si peu qu'elles ne peuvent guère influencer les transports de marchandises, tandis que leurs attractions administratives et urbaines suffisent pour attirer les voyageurs de leurs banlieues.

Nous avons fait la même étude pour le réseau de

(*) Nous avons adopté comme classification des gares de transit celle des compagnies. Certaines des gares qui y figurent, par exemple Bourges, ne reçoivent que le transit de petites lignes.

l'Ouest que pour celui d'Orléans, avec cette seule différence qu'on a, comme pour les voyageurs, porté de 20 à 25 kilomètres le rayon des banlieues. Les résultats figurent au tableau n° 6. Ils sont encore plus nets que ceux du réseau d'Orléans, parce que le tableau contient moins de villes voisines d'un point de transit.

Deux banlieues seulement donnent moins de 7 francs de recette par tonne, ce sont celles de Saint-Lô et de Laval qui sont dans des conditions toutes spéciales. Dans la première, la station de la Meauffe envoie à Saint-Lô même 70.800 tonnes de ballast sur un total de 77.000 tonnes d'expéditions. Dans la seconde, les stations de Louverné et de Saint-Pierre-Lacour expédient 70.500 tonnes de chaux à tarifs très réduits, sur un total de 75.850 tonnes.

En résumé, si l'on néglige, d'une part, les banlieues qui présentent des conditions exceptionnellement défavorables au point de vue de la nature du trafic ou du voisinage d'un point de transit important; d'autre part, celles qui donnent des chiffres exceptionnellement élevés, on reconnaît que, sur les deux réseaux d'Orléans et de l'Ouest, la recette par tonne expédiée des stations de banlieue, varie, en général, de 7 à 12 francs, et peut être évaluée à 9 francs en moyenne.

Le tarif moyen de la tonne kilométrique a été de 5^{c},64 pour l'Ouest en 1891. Nous ne connaissons pas celui de l'Orléans, mais on sera certainement au-dessus de la vérité en admettant le chiffre de 6 centimes pour les deux compagnies et on obtiendra, par suite, une valeur trop faible, pour le parcours moyen des marchandises expédiées des stations de banlieue, en divisant par 6 centimes la recette moyenne de 9 francs, ce qui donne 150 kilomètres.

Tels sont les résultats obtenus pour 292 stations situées dans les banlieues de cinquante-neuf villes prises

au hasard parmi celles que desservent les deux compagnies d'Orléans et de l'Ouest. On trouverait des chiffres plus bas pour les réseaux du Nord et peut-être de l'Est, et des chiffres supérieurs pour celui de Paris-Lyon-Méditerranée. La moyenne générale serait, sans doute, voisine de 140 kilomètres, au moins. Mais il est nécessaire de faire, à propos de ce chiffre, l'observation que nous avons formulée au paragraphe 17 au sujet des parcours moyens sur l'ensemble de chaque réseau. Les recettes des gares ne correspondent qu'aux parcours effectués sur les lignes de la compagnie dont on consulte la statistique et, par suite, les chiffres que nous venons de calculer, sont bien inférieurs aux parcours moyens qu'effectuent, *sur tous les réseaux*, les marchandises expédiées par les stations de banlieue que nous avons étudiées.

23. *Parcours moyens des marchandises qui fréquentent les lignes d'intérêt local.* — Comme nous avons démontré, par ailleurs, que les résultats donnés par les stations de banlieue sont applicables aux chemins de fer d'intérêt local, nous sommes amené à conclure que les parcours moyens qu'effectuent, sur des rails quelconques, les marchandises expédiées par les lignes d'intérêt local, sont supérieurs au chiffre de 140 kilomètres et, *a fortiori*, à celui de 127 kilomètres que nous avons admis dans notre premier mémoire et que M. Colson juge très exagéré. Nous le conservons néanmoins par prudence, mais avec la conviction que nous restons ainsi notablement au-dessous de la vérité.

Ainsi se trouve justifié le seul point que M. Colson ait critiqué dans le raisonnement par lequel nous avons déterminé la valeur moyenne du rapport des recettes que le trafic commun donne aux grands réseaux et aux chemins de fer d'intérêt local, raisonnement qui est résumé en caractères spéciaux au paragraphe 5 de la présente

note. Nous considérons donc comme démontré que la valeur moyenne de ce rapport est de 1.50 pour les voyageurs et de 4 pour les marchandises. Ce sont les chiffres indiqués au paragraphe 5.

On se demandera peut-être pourquoi nous n'avons pas essayé de dégager des statistiques et de représenter graphiquement les lois suivant lesquelles les parcours moyens des marchandises varient en fonction de l'importance des localités qui les expédient ou les reçoivent, de celle des centres d'attraction et de la distance qui sépare les unes des autres, comme nous l'avons fait pour les voyageurs. On se l'expliquera en étudiant les recettes des stations considérées isolément; on constatera alors, de l'une à l'autre, des différences énormes qui tiennent évidemment à la nature et à la destination des marchandises expédiées. Ces différences ne permettent pas d'apercevoir les lois générales que nous aurions voulu dégager.

CHAPITRE III.

INFLUENCE QUE LA DISTANCE DES POPULATIONS AUX STATIONS EXERCE SUR LE TRAFIC ET LA RECETTE QU'ELLES DONNENT AUX CHEMINS DE FER.

24. *Utilité de cette étude.* — Comme nous le disions au paragraphe 28 de notre premier mémoire, et comme on vient de le voir établi d'une manière plus complète, les renseignements donnés par les statistiques sur la longueur des parcours moyens des voyageurs et des marchandises permettent de déterminer la part qui revient, en moyenne, aux grands réseaux dans les recettes totales du trafic qui emprunte les lignes secondaires; mais cette part ne représente pas, en entier, un boni réel, parce qu'une partie du trafic en question serait arrivée, par voitures, aux grands réseaux, si les lignes secondaires n'eussent

pas existé. Il reste donc à chercher quelle est la fraction des recettes du trafic commun, qui constitue réellement un boni pour les grands réseaux.

On sait combien l'attraction des chemins de fer diminue rapidement à mesure que l'on s'éloigne de leurs stations. C'est un fait si connu que, pour déterminer le trafic probable d'une ligne à construire, la plupart des ingénieurs ne tiennent compte que de la population groupée dans une double zone de 5 kilomètres de largeur de part et d'autre du chemin de fer; quelques-uns portent cette largeur à 8 ou 10 kilomètres, mais c'est l'exception.

Il est évident, qu'en fait, la décroissance de l'attraction des chemins de fer est progressive et continue, et non pas brusque, comme le suppose la règle pratique que nous venons de rappeler; elle est même très différente pour les voyageurs et pour les diverses espèces de marchandises.

Dans notre première étude, nous avons tracé, d'après l'ensemble des renseignements qui nous étaient alors parvenus, la ligne qui représente la loi de cette décroissance pour le trafic des voyageurs, d'une part et, de l'autre, pour le trafic des marchandises. Cette ligne, une fois admise, nous a permis de déterminer la fraction du trafic commun et de la recette correspondante qui serait arrivée au grand réseau si la petite ligne n'avait pas existé. En retranchant cette fraction du total de la recette procurée aux grands réseaux par le trafic commun, nous avons obtenu, par différence, l'augmentation nette de recette brute que les chemins de fer d'intérêt local placés dans des conditions moyennes apportent aux grands réseaux.

L'enchaînement de ces déductions n'a pas été attaqué par M. Colson; pour en contester la conclusion, il faut en contester la base, c'est-à-dire la loi suivant laquelle diminue le trafic que donne une population, lorsqu'augmente sa distance de station à la plus voisine.

25. *Documents consultés.* — Nous avons cherché à vérifier, autant que possible, cette loi, et M. Sartiaux, ingénieur en chef de l'exploitation de la compagnie du Nord, a eu la grande obligeance de faire faire, dans ce but, des relevés très délicats et de nous en communiquer les résultats. Il doit toutefois être bien entendu que les conclusions que nous en avons tirées, nous sont absolument personnelles et ne l'engagent à aucun degré.

26. *Décroissance du nombre de voyageurs.* — Une première série de recherches a porté uniquement sur les variations du nombre de voyageurs par habitant. Il a été constaté que, dans la région d'Arras-Douai, lorsque la distance des agglomérations aux stations est :

De moins de 1 km, le nombre des voyageurs par habitant est de	9, en moyenne.	
De 1 à 2 km, il varie de	3,5 à 3,5	voyageurs.
De 2 à 5 km, il varie de	2,7 à 0,9	—
Au-dessus de 5 km, il varie de	1,25 à 0,1	—

Si l'on admet que la distance moyenne soit de $0^{km},500$ pour les localités où elle est inférieure à 1 kilomètre, on reconnaît que le nombre V des voyageurs que donne une population, est, à peu près, inversement proportionnel à sa distance aux stations D, augmentée de $0^{km},300$.

On a donc la relation $V = \frac{K}{D + 0^{km},300}$, D étant exprimé en kilomètres et K étant un coefficient numérique dont la valeur, égale à 7,2 pour la région d'Arras-Douai, peut être fort différente ailleurs.

Sauf les anomalies et les irrégularités que l'on doit forcément rencontrer en pareille matière, cette loi se vérifie convenablement dans les autres parties du réseau du Nord qui ont été l'objet de recherches analogues et qui sont les suivantes :

Nord . . . Bully-Grenay, Loos.
Nord-Est. Hautmont, Sous-le-Bois, Sains, La Capelle, Étreux.

Ouest . . . Eu, Incheville, Longroy, Blangy, Nesle-Normandeuse, Sénarpont, Vieux-Rouen, Aumale.
Centre. . . Nesles, Rosières, Bornel, Rémy, Bresle, Saint-Sulpice, Auneuil.
Sud . . . . Taverny, Saint-Leu, Isle-Adam, Berzy.

27. *Décroissance de la recette-voyageurs.* — Nous avons aussi recherché comment varie, non plus le nombre de voyageurs, mais la recette R^v du trafic des voyageurs par habitant. L'ensemble des résultats est convenablement représenté par la formule $R^v = \frac{K'}{D + 1^{km}}$, D étant exprimé en kilomètres et K′ étant un coefficient variable d'une localité à l'autre.

La recette-voyageurs par habitant diminue donc moins vite que le nombre des voyageurs, quand la distance aux stations augmente, et cela s'explique naturellement par ce fait que l'on recule moins devant un trajet en voiture quand il s'agit d'un voyage long et important, que lorsqu'il n'est question que de déplacements à petite distance qui généralement présentent un moindre intérêt.

Si l'on construit la courbe de décroissance des recettes-voyageur par habitant qui représente les résultats de la formule $R^v = \frac{K'}{D + 1^{km}}$, on reconnaît qu'elle indique une diminution de ces recettes plus rapide encore que la courbe que nous avions tracée au paragraphe 28 de notre premier mémoire. Sans que nous reproduisions ici les déductions que nous avons faites dans ce travail, on comprend qu'une correction dans ce sens aurait pour effet de faire évaluer plus haut encore que nous ne l'avons fait, le trafic qui échappe aux grandes lignes par l'effet de la distance et conduirait, par suite, à admettre une plus grande valeur pour la fraction du trafic commun qui constitue, pour les grands réseaux, une augmentation réelle de recettes.

28. *Décroissance du trafic des marchandises.* — M. Sartiaux a bien voulu nous communiquer des renseignements de même nature pour les marchandises. En ce qui concerne celles de grande vitesse, la loi de décroissance paraît être sensiblement la même que pour les voyageurs. Quant aux marchandises de petite vitesse, il y a de telles différences entre le trafic de stations qui semblent placées dans des conditions identiques qu'on ne peut en tirer une loi bien nette.

Voici cependant la moyenne des résultats que donne l'étude du trafic de diverses localités appartenant à la région d'Arras-Douai. Lorsque leur distance aux stations est de :

0 à 1 km. le nombre de tonnes par habitant est de. . .	1t,0 à 1t,5	en moyenne.
De 1 à 5 km.	0t,7 à 0t,8	—
Au-dessus de 5 km.	0t,01 à 0t,2	—

Dans la région dont il s'agit, le tonnage expédié par habitant diminue donc beaucoup moins vite que le nombre de voyageurs, tant que la distance à la station ne dépasse pas 2 à 3 kilomètres; mais il décroît très rapidement au delà de cette limite qui semble correspondre à celle que nous avons signalée, *a priori*, dans notre premier mémoire comme rendant difficile l'accomplissement des formalités que l'expéditeur et surtout le destinataire doivent remplir à la gare.

Dans d'autres régions desservies par le réseau du Nord, on a trouvé les valeurs suivantes pour le rapport des tonnages par habitant qu'expédient des localités distantes des stations de moins de 2 kilomètres, d'une part, et de plus de 4 kilomètres, de l'autre :

Région nord du réseau du Nord.		10
— nord-est —	. . . . .	4
— centre —	. . . . .	4 à 7
— sud —	. . . . .	3

Ces chiffres sont loin de présenter la concordance de

ceux que l'on trouve pour le trafic des voyageurs et il ne pouvait en être autrement, car rien n'est plus variable que la nature et la valeur des marchandises que chaque pays produit ou consomme et, par suite, que le coût et la longueur des transports par camions qu'elles peuvent supporter pour arriver à la voie ferrée (*).

29. *Confirmation de nos conclusions antérieures.* —

(*) On nous a fait l'objection suivante au sujet des conséquences que nous tirons de la loi de décroissance du trafic, en ce qui concerne les marchandises :

« La statistique montre bien que *la proximité des agglomérations et des gares et l'abondance plus grande du trafic* sont deux faits concomitants qui doivent, par suite, être liés par un rapport de cause à effet; mais on peut se demander dans quelle mesure chacun d'eux est cause ou effet; car, si évidemment la proximité des gares développe le trafic de certains produits, d'un autre côté, les industries qui ont de gros transports, viennent naturellement s'installer et se développer à côté des gares. De sorte que, dans le surcroît de trafic existant là où la proximité existe, une partie est créée par cette proximité, une autre n'est pas créée par elle, mais tient à ce qu'à la longue, les industries pour qui le chemin de fer a le plus d'importance, se sont tassées dans les environs. C'est l'ensemble de ces deux faits qui explique que les agglomérations voisines du chemin de fer donnent relativement plus de trafic que les autres, et il semble difficile de discerner la part de chacun. »

Pour que l'objection portât, il faudrait que la loi de décroissance du trafic eût été déduite de la comparaison des résultats donnés par des localités mal choisies, dont les unes, voisines des chemins de fer, auraient bénéficié du tassement d'industries dont il vient d'être question, tandis que les autres posséderaient peu ou pas d'usines. Or il n'en est rien. On n'a comparé entre elles que des localités aussi analogues que possible, au point de vue industriel.

Nous ajouterons qu'alors même qu'on n'aurait pas agi de la sorte, on serait peut-être encore à l'abri de toute critique fondée, car ce tassement d'industries qui s'est produit, à la longue, dans les localités voisines des stations, se produira, dans une certaine mesure, près des lignes d'intérêt local. C'est tout simplement l'une des formes de l'action des chemins de fer et nous ne voyons aucune raison pour qu'elle ne soit pas portée à leur actif aussi bien que les autres.

Toutefois, et c'est tout ce qu'il nous importe de noter, la diminution qui se produit dans le trafic par habitant à mesure qu'on s'éloigne des stations, est, au moins, aussi rapide, en moyenne, que nous l'avons admis dans notre premier mémoire, aussi bien pour les marchandises que pour les voyageurs. Nous pouvons donc regarder comme démontrée la conclusion que nous en avons tirée et qui est la suivante.

Des recettes que les grandes compagnies encaissent pour le trafic commun, la fraction qui constitue pour elles une augmentation réelle de recettes, est, au moins, de 70/100 pour les voyageurs et de 50/100 pour les marchandises. Le surplus leur serait arrivé par une autre voie si l'embranchement n'eût pas existé.

D'autre part, on a vu, au paragraphe 23, que le rapport des recettes que le trafic commun donne, d'une part, aux grandes lignes, d'autre part, aux chemins de fer d'intérêt local, est de 1,50 pour les voyageurs et de 4,00 pour les marchandises.

Il résulte de ces deux faits que les augmentations réelles de recettes procurées aux grandes compagnies par le trafic commun sont, en moyenne, égales aux recettes propres des chemins de fer d'intérêt local, multipliées par $1{,}50 \times 0{,}70 = 1{,}00$ environ pour les voyageurs et par $4{,}00 \times 0{,}50 = 2{,}00$ pour les marchandises, comme nous l'avons établi dans notre premier mémoire.

Pour arriver finalement à un chiffre unique applicable au trafic total des chemins de fer d'intérêt local, il faut faire une hypothèse sur l'importance relative du trafic des voyageurs et de celui des marchandises. Celle que nous avons faite dans notre premier mémoire, et qui n'a pas été critiquée, conduit à la conclusion suivante :

En moyenne, les chemins de fer d'intérêt local

qu'il y a lieu de construire en France, donneront vraisemblablement aux grands réseaux dont ils seront les affluents, une augmentation de recettes égale aux 140/100 de leurs propres recettes.

30. *Avis exprimés sur cette question.* — Quel est, à ce sujet, l'avis de M. Colson? Il ne l'a pas précisé par des chiffres, mais il qualifie de *généralement médiocres* les parcours que fait, sur les grands réseaux, le trafic créé par les petites lignes et on jugera que, pour lui, le mot médiocre signifie presque négligeable, puisque, dans ses conclusions, il ne tient presque aucun compte des recettes que les embranchements procurent aux grands réseaux.

En présence d'une contradiction aussi radicale venant d'un homme de telle valeur, nous avons éprouvé le besoin de prendre l'avis de quelques-unes des personnalités qui sont les mieux placées pour se former une opinion motivée et que leurs fonctions forcent à se préoccuper de l'influence réciproque des grandes et des petites lignes. Tous ont été d'accord avec M. Noblemaire dont une note, insérée dans les *Annales des ponts et chaussées* en 1890, reconnaît très nettement la sérieuse importance du trafic qu'apportent aux grands réseaux les chemins de fer d'intérêt local tracés et exploités de manière à être pour eux, non des concurrents, mais des affluents. Nous ne croyons pas devoir préciser davantage les opinions qui ont été exprimées devant nous, et d'ailleurs c'est inutile, car le sentiment actuel des grandes compagnies est mis hors de doute par la ligne de conduite que successivement elles ont toutes adoptée.

On sait trop que leur propre intérêt est et doit être le mobile qui les dirige, pour douter un instant qu'elles attendent des petites lignes des avantages, non pas médiocres, mais très sérieux, puisqu'elles encouragent leur création

en prêtant leur crédit, en modifiant leurs gares pour communiquer avec elles et en leur accordant des conditions très libérales pour l'exploitation des gares communes et pour les transbordements, malgré les gênes et les difficultés qui en résultent pour elles. Il est donc certain que les grandes compagnies attribuent à l'augmentation de recettes et de bénéfices que leur procurent les lignes affluentes, une importance très sérieuse et non pas médiocre ou presque négligeable, comme le soutient notre éminent contradicteur.

CHAPITRE IV.

DISCUSSION DE L'ÉTUDE STATISTIQUE FAITE AU CHAPITRE I.

Nous allons maintenant préciser, à l'aide des considérations qui précèdent, la valeur et la signification des résultats des études statistiques que nous avons faites pour seize lignes situées dans des régions très diverses.

31. *Trafic des voyageurs.* — Le premier tableau inséré au paragraphe 5 de notre premier mémoire a trait à six lignes de Bretagne que M. Colson a jugées sans intérêt général, parce qu'elles sont très éloignées de Paris. Cette particularité existe, en effet, pour les lignes de Morlaix à Roscoff et de Plouaret à Lannion qui sont situées à 550 et 518 kilomètres de Paris, tandis que la distance moyenne de la capitale aux diverses localités de la France n'est que de 350 kilomètres; mais ce fait n'a pas beaucoup d'importance au point de vue du trafic des voyageurs, puisque la distance à Paris n'exerce guère d'influence sur leurs parcours moyens, ainsi que nous l'avons établi au paragraphe 14.

L'objection a donc peu de portée pour ces deux lignes :

elle n'en a aucune pour celles de Quimper à Douarnenez, Quimper à Pont-l'Abbé, Rosporden à Concarneau et Auray à Quiberon. En effet, si ces lignes sont à 681, 661 et 581 kilomètres de Paris, elles ne sont qu'à 173, 153 et 73 kilomètres de la bifurcation de Redon, par laquelle les voyageurs et les marchandises à grande vitesse, à destination de Paris, sortent du réseau d'Orléans et empruntent celui de l'Ouest, de telle sorte qu'au point de vue des recettes de la compagnie d'Orléans, les seules qui figurent dans les tableaux, les quatre lignes dont il s'agit, sont dans des conditions inférieures et non supérieures à la moyenne, en ce qui concerne les distances au point de sortie du réseau.

Les résultats donnés par ces quatre derniers embranchements pour le trafic des voyageurs méritent donc la plus sérieuse attention; toutefois, pour les bien apprécier, il faut noter deux particularités d'influence contraire. D'une part, les lignes en question aboutissent à de petites villes d'une importance supérieure à la moyenne des localités que desservent les lignes d'intérêt local et donnent, par conséquent, des parcours totaux plus élevés. D'autre part, ces villes étant situées tout à fait à l'extrémité des lignes, à 24, 22, 16 et 28 kilomètres de la bifurcation, et ayant une importance absolument prépondérante par rapport aux stations intermédiaires, les parcours moyens effectués sur ces embranchements sont presque égaux à leurs longueurs totales, c'est-à-dire au double environ du parcours moyen effectué sur l'ensemble des lignes d'intérêt local françaises, qui n'est que de 11 kilomètres et qui a servi de base à nos calculs.

De ces deux influences contraires, la seconde, qui tend à diminuer l'importance *relative* des recettes du grand réseau et qui la divise presque par deux, semble prépondérante, de telle sorte que les quatre lignes en question sont dans des conditions plutôt inférieures que supérieures

à la moyenne, au point de vue du rapport Z des augmentations de recette des grands réseaux aux recettes propres des embranchements. Les valeurs de ce rapport étant égales à 0,97 et à 1,30 pour ces quatre lignes, on est donc conduit, par l'étude de leurs résultats, à juger faible, plutôt qu'exagérée la valeur de 1,00 que nous avons admise, comme moyenne du rapport Z, pour le trafic des voyageurs.

Il importe de remarquer que la compensation d'influences contraires que nous venons de signaler pour des cas particuliers, se réalise généralement dans une certaine mesure, et que, toutes les fois que les villes de quelque importance desservies par des embranchements sont situées près de leurs stations extrêmes, ce qui a généralement lieu, elles produisent les deux effets opposés que nous venons de noter, de telle sorte que, tout en donnant aux grands réseaux une augmentation exceptionnellement élevée de recettes, elles peuvent ne pas modifier le rapport de cette augmentation à la recette propre des embranchements, seul élément que nous cherchions à déterminer en ce moment.

Ces considérations s'appliquent aux lignes de Roscoff et de Lannion, mais ces embranchements présentent, en outre, des particularités qui expliquent les valeurs élevées de 2,00 et 1,53 qu'ils donnent pour le rapport Z. Pour la première, c'est l'humeur remuante des Roscovites qui fournissent le tiers des voyageurs de la ligne et dont le parcours moyen de 70 kilomètres élève à 50 kilomètres la moyenne de la ligne entière. Pour la seconde, c'est la situation de son point de bifurcation placé à la petite gare de Plouaret que les voyageurs de Lannion dépassent presque toujours, pour se rendre à des localités plus importantes.

Les résultats que les six lignes bretonnes donnent pour le trafic des voyageurs, s'expliquent donc facilement et

sont bien en rapport avec la valeur moyenne de 1,00 que nous avons adoptée pour le rapport Z.

Nous n'avons rien de particulier à dire des trois lignes d'intérêt local qui figurent au second tableau de notre premier mémoire. Elles donnent, pour Z, des valeurs de 1,0 — 0,9 et 1,20 qui s'éloignent très peu de la moyenne indiquée plus haut.

Parmi les cinq embranchements du réseau de P.-L.-M. qui figurent au premier tableau du présent mémoire, deux, ceux de Pont-de-Dore à Ambert et de Saint-Georges-de-Commiers à La Mure, donnent, pour Z, des valeurs de 1,8 et 1,2 qui n'ont rien d'anormal. L'importance de la population d'Ambert (3.945 hab.) explique l'élévation de la première.

Au contraire, les quatre autres lignes donnent, pour Z, des valeurs tout à fait exceptionnelles : 3,3 pour la ligne de Veynes à Briançon, 3,0 pour la ligne de Crest à Die, et 3,5 pour celle de Tamnay à Château-Chinon. La ligne de Briançon n'est pas assimilable aux chemins de fer d'intérêt local ; elle dessert trois villes : Gap (6.946 hab.), Embrun (2.343 hab.) et Briançon (1.475 hab.), qui sont situées à 27,65 et 109 kilomètres de Veynes, origine de l'embranchement. Il est bien naturel que les voyageurs qui en proviennent, fassent de longs parcours pour sortir de leurs montagnes et chercher au loin des centres d'approvisionnement et de consommation. Cette ligne n'est donc intéressante qu'à un point de vue tout spécial.

La ligne de Crest à Die aboutit à une petite ville de 3.257 habitants dont l'importance dépasse, mais non de beaucoup, celle d'un grand nombre de localités que desserviront les chemins de fer d'intérêt local. La valeur élevée de 3 que cette ligne donne pour Z, s'explique surtout par ce fait que, bien qu'ouverte plus tard, elle forme, en réalité, le prolongement de la ligne de Livron à Crest que les voyageurs suivent pour rejoindre la grande

ligne de Livron d'où ils ont encore 17 kilomètres à parcourir pour arriver à Valence, centre le plus rapproché. Assurément ce ne sont pas là des conditions moyennes, mais il est néanmoins certain qu'un bon nombre de chemins de fer d'intérêt local aboutiront aussi sur les grandes lignes à des distances notables de leurs centres d'attraction et donneront, par suite, aux grandes compagnies des recettes beaucoup plus fortes que celles que nous avons calculées, attendu que les parcours moyens, que nous avons adoptés, sont ceux de stations groupées dans les banlieues de leurs centres d'attraction et à moins de 20 à 25 kilomètres d'eux. En faisant ce choix, nous avons commis volontairement une erreur défavorable à notre thèse qui peut la supporter sans en être atteinte.

En ce qui concerne la ligne de Tamnay à Château-Chinon (2.549 hab.), la valeur élevée de Z qui est de 3,50, s'explique par les mêmes raisons que pour la ligne de Die et aussi peut-être par l'activité de la population qu'elle dessert. Ne connaissant nullement ce pays, nous sommes réduit aux conjectures et nous devons nous borner à faire remarquer que les résultats fournis par les deux dernières lignes dont il vient d'être question, tendent à faire regarder plutôt comme insuffisante que comme exagérée la valeur moyenne $Z = 1,00$ que nous avons admise pour les voyageurs.

Le chemin de fer de Nançois-le-Petit à Gondrecourt donne, au contraire, pour Z, une valeur 0,60 qui est exceptionnellement faible; sur seize, c'est la seule qui soit notablement inférieure à l'unité. Elle semble indiquer que les habitants des localités desservies par cette ligne ont des relations à courte distance ou que, pour les longs voyages, ils vont parfois s'embarquer directement sur les grands réseaux qui les entourent de tous côtés, notamment à Joinville, Maxey et Neufchâteau.

Mais nous devons faire remarquer que si nous avions

comparé les années 1874 et 1878, au lieu de 1874 et 1877, nous aurions trouvé, pour Z, la valeur 1,03 au lieu de 0,60. Ces variations exceptionnelles que l'on ne constate pas pour la plupart des lignes, tendent à prouver que l'équilibre ne s'est pas établi immédiatement près de la frontière après la guerre de 1870-1871.

Pour la ligne d'Amagne à Vouziers, la valeur $Z = 1,50$, bien supérieure à la moyenne, s'explique naturellement par l'importance de Vouziers, qui compte 3.666 habitants et peut-être aussi, comme nous l'avons déjà dit, par un développement anormal du trafic de la gare de Rethel à la suite de la dernière guerre.

32. *Trafic des marchandises.* — Les résultats des lignes dont nous avons fait l'étude, sont encore plus favorables à nos conclusions pour le trafic des marchandises que pour celui des voyageurs. En effet, si l'on calcule les moyennes qu'elles donnent, en laissant de côté la ligne de Briançon qui ne peut pas être assimilée aux petites lignes d'intérêt local, on trouve, pour les marchandises, une valeur de Z égale à 4,40, c'est-à-dire supérieure de 120 p. 100 à celles de 2,0 que nous avons indiquée comme moyenne probable pour les chemins de fer d'intérêt local, tandis que, pour les voyageurs, la valeur moyenne de Z n'est que de 1,60, dépassant de 60 p. 100 seulement le chiffre 1,00 auquel nous nous sommes arrêté.

On doit remarquer, en outre, que, par suite de leurs longs parcours, les marchandises, bien plus souvent encore que les voyageurs, dépassent les limites de leurs réseaux d'origine pour en emprunter d'autres. Il est donc certain que les chiffres de nos tableaux statistiques qui ne tiennent compte que des recettes des réseaux contigus aux embranchements, sont trop faibles et n'indiquent pas, à beaucoup près, la totalité des recettes que donnent à l'ensemble des chemins de fer français, les transports

créés par les embranchements pris comme sujets d'étude.

Ces deux observations nous semblent suffisantes pour établir que les résultats des études statistiques en question, pris dans leur ensemble, démontrent la modération de la valeur moyenne de Z que nous avons admise pour les marchandises.

Nous nous bornerons, en conséquence, à de courtes observations sur les anomalies que présente la valeur de Z pour le trafic des marchandises des lignes dont l'étude figure dans la présente note. En ce qui concerne les autres, nous ne pouvons que nous référer aux paragraphes 19 et 21 de notre premier mémoire.

Les valeurs élevées de Z que les lignes de Briançon et de Die donnent pour les marchandises, semblent tenir à la nature des régions montagneuses qu'elles traversent, bien plus encore qu'à l'importance des localités desservies. On comprend, en effet, que les pays de nature exceptionnelle dont les produits diffèrent beaucoup de ceux du reste de la France, doivent faire des échanges à grande distance pour les vendre et se procurer ceux dont ils ont besoin.

La valeur très réduite de Z obtenue pour la ligne de La Mure est la conséquence de la nature de ses transports. En effet, au paragraphe 3, on a vu que sur 135.000 tonnes de marchandises transportées en 1891, il y avait 133.600 tonnes de chaux, ciments et anthracites, dont 95.000 ont été expédiées à Grenoble, à 19 kilomètres seulement de l'origine de l'embranchement, et ont, par suite, donné au grand réseau des recettes exceptionnellement faibles.

Les chiffres relatifs aux lignes de Gondrecourt et de Vouziers s'éloignent peu de la moyenne, l'un en moins, l'autre en plus. Ils ne nécessitent pas d'observations particulières.

33. *Résultats des quatre premiers chapitres.* — En résumé, l'étude détaillée des recettes de deux cent quatre-vingt-douze stations appartenant aux réseaux d'Orléans et de l'Ouest, a démontré la modération des valeurs que nous avons admises, dans notre premier mémoire, pour les parcours moyens du trafic qui emprunte les chemins de fer d'intérêt local.

D'autre part, les relevés relatifs à un assez grand nombre de localités desservies par le réseau du Nord a prouvé, qu'au moins dans cette région, le trafic diminue plus rapidement encore que nous ne l'avions supposé, quand augmente la distance aux stations.

Ainsi se trouvent surabondamment justifiées les prémisses d'où découle forcément notre évaluation du trafic que les chemins de fer d'intérêt local apportent, en moyenne, aux grandes lignes.

L'étude directe du trafic apporté aux grands réseaux par seize lignes appartenant aux régions de l'Ouest, d'Orléans, de P.-L.-M. et de l'Est a donné des résultats bien supérieurs à cette évaluation moyenne; mais, en tenant compte des conditions particulières à chaque ligne, on constate que les résultats de cette étude directe se concilient bien avec notre évaluation moyenne et qu'ils tendent à la corroborer.

(*La suite à la prochaine livraison.*)

BULLETIN

LE SYNDICAT DE VENTE DES HOUILLES DE WESTPHALIE.

Un syndicat vient d'être constitué par la plupart des mines de houille de Westphalie en vue de régulariser la vente des charbons.

Le but de cette association est triple : elle doit :

1° Mettre fin à une concurrence désastreuse ;

2° Établir un lien entre les propriétaires de mines en vue de la répartition des charbons sur l'ensemble du marché ;

3° Régulariser à la fois les questions de prix et les conditions de livraison.

La constitution de ce syndicat ne fut réalisée qu'après de longues et laborieuses négociations.

La constatation que les propriétaires de mines étaient en mesure de réaliser eux-mêmes ces desiderata les avait déjà conduits, il y a plus de dix ans, à en rechercher les moyens. Leurs efforts s'étaient principalement dirigés vers deux buts : le premier fut de grouper les charbonnages par grandes consolidations ; cette voie est de beaucoup la plus sûre, mais elle est très lente, et l'on dut par conséquent en poursuivre d'autres simultanément. D'abord furent conclues des conventions relatives à la production, mais les règlements n'en étaient pas assez rigoureux, la durée en était trop courte, la vente des charbons n'était pas réglée ; le marché ne fut pas étudié avec des vues d'ensemble, et les charbonnages craignirent de ne pouvoir placer leurs produits.

Ces conventions n'eurent pas un effet décisif. Aussi cherchat-on à former des associations de vente : le Syndicat des cokes, l'Association pour la vente des briquettes, l'Union des charbons à gaz, des houilles grasses et des houilles maigres. La production fut en même temps partiellement réglée, mais une fraction ne le fut pas, au moins dans son ensemble ; aussi les associations de vente n'ont-elles pas pris l'extension qu'elles auraient dû recevoir et n'ont-elles pas, par suite, atteint leur but.

C'est dans ces associations, toutefois, que s'est formée la commission qui devait ouvrir la voie à la réglementation de la production et de la vente. Dans la première moitié de l'année 1892, cette commission élabora un projet de contrat décennal : la production de 1891 devait être prise comme base, on devait tenir compte des arrêts de travail, autant que possible des nouvelles installations de puits, etc. Mais, dans l'assemblée du 30 juillet 1892, on constata que les charbonnages les plus récents voulaient obtenir une garantie d'un certain minimum de production. Il fut impossible dans cette assemblée de mesurer la portée de cette prétention, car la même garantie de minimum devait être accordée aux mines qui seraient restées en retard dans leur production. La commission reprit en conséquence son travail et admit comme base une production minimum de 400 tonnes par jour de travail pour les mines nouvelles et pour les mines anciennes dont le développement aurait été retardé. Il fut en outre décidé de limiter la durée du syndicat en ce sens que les charbonnages aient le droit de se retirer au bout de cinq ans si, à cette époque, la production des mines non syndiquées atteignait 15 p. 100 de la production totale. On adopta, de plus, comme base, au choix des charbonnages, la production de 1891 ou le double de celle du premier semestre 1892, que l'on connaissait dès cette époque. Ce nouveau projet eut un succès extraordinaire. Il réunit immédiatement l'adhésion de 80 p. 100 de la production totale ; mais quelques mines, et non parmi les moins importantes, ne se déclarèrent pas d'accord sur quelques-unes des conditions réglementaires. Dans la discussion, il fut constaté qu'on n'arriverait à obtenir leur adhésion qu'en réduisant à cinq années la durée du syndicat. La grande majorité de la commission était d'avis qu'il ne paraissait pas désirable de réduire la durée du syndicat, mais qu'une prolongation du syndicat interviendrait, selon toute apparence, si les résultats de l'expérience de cinq ans étaient favorables. La discussion dura longtemps, quelques membres durent quitter la séance, mais les autres se prononcèrent unanimement pour la modification.

Ce premier point admis, les négociations continuèrent sur ces nouvelles bases, et une réunion constitutive eut lieu le 16 décembre 1892.

Toutefois, cette réunion dut s'ajourner, faute d'un nombre suffisant d'adhérents (à peine 80 p. 100).

Les efforts persévérants des organisateurs, secondés par l'aggravation continue de la crise houillère et métallurgique, eurent raison de la plupart des hésitations et des prétentions spéciales ;

et, quelques satisfactions de détail ayant été accordées aux plus importants des dissidents, l'assemblée générale du 28 janvier, à Dortmund, put enfin constater qu'un résultat positif était sur le point d'être atteint.

C'est le 20 février, à midi, que le dernier délai étant échu, le syndicat des houillères de la province rhénane et de la Westphalie s'est trouvé définitivement constitué par l'adhésion de quatre-vingt-seize des plus importantes mines ayant ensemble une production de plus de 33 millions et demi de tonnes de houille.

A partir du 1er mars, et pour une durée minima de cinq ans, la vente de cette immense production sera entre les mains d'une seule personne, le directeur du syndicat.

La crainte d'une nouvelle crise houillère, plus terrible que les précédentes, a conduit la presque unanimité des compagnies houillères à faire abstraction de leur personnalité commerciale; elles abdiquent entre les mains du syndicat qui seul recevra et répartira les commandes, fixera les prix de vente et le tonnage à extraire.

L'intention formellement affirmée des promoteurs du syndicat est de tenir tout autant compte des intérêts des consommateurs que de ceux des producteurs. Ils disent hautement que cette préoccupation des besoins de l'industrie est la condition essentielle de vie et de succès de l'entreprise. Il faudra voir le syndicat à l'œuvre.

L'exemple du fonctionnement du syndicat des cokes n'est pas sans susciter bien des préoccupations même en Allemagne; l'importance qu'ont prise les exportations de coke vers la Belgique et la France depuis la constitution de ce syndicat aura sans doute pour résultat de jeter, à tous prix, sur les marchés étrangers, les excédents de production de houille.

C'est cet effet probable qui donne une telle importance à la constitution de cette association, qui est une véritable fusion commerciale de la presque unanimité des producteurs du bassin houiller westphalien.

Jusqu'au dernier instant, le succès restait problématique. Au moment où on allait procéder à la signature, le président fut obligé d'annoncer que la mine Mont Cenis (198.934 tonnes) refusait de s'engager. Tout était remis en question, car la retraite inattendue de cette compagnie avait pour conséquence la défection de plusieurs autres des principaux adhérents.

Dans cette circonstance, le président proposa de passer outre, et invita tous les délégués à apposer leur signature sur la convention notariée, sous la réserve formelle que toutes les signatures seraient nulles et non avenues si la mine Mont Cenis n'avait signé à son tour dans un délai de quelques jours. L'adhésion du Mont Cenis ayant été communiquée dans ce délai, le syndicat s'est donc trouvé définitif par l'apposition de cette dernière signature.

La ville d'Essen a été désignée pour siège du syndicat.

Le syndicat est constitué sous forme d'une société par actions au capital de 900.000 marcs divisé en 3.000 actions de 300 marcs, qui doivent être prises par les compagnies associées dans la proportion de leur production.

Cette société passe un traité avec chacun des syndiqués.

D'après la convention définitivement admise, chaque mine entre dans le syndicat pour la plus forte production obtenue par elle en 1891 ou 1892; c'est en adoptant cette convention qu'on arrive au chiffre total de 33.712.314 tonnes comme production syndiquée.

Nous donnons ci-après la traduction du texte des statuts du syndicat.

Statuts du Syndicat des houilles de Westphalie et des Provinces rhénanes.

Raison sociale, siège et durée de l'Association.

Art. 1er. — La Société par actions fondée sous la raison sociale « Syndicat des houilles de Westphalie et des Provinces rhénanes » a pour siège social Essen. L'exercice est compté du 1er janvier au 31 décembre.

Objet de l'entreprise.

Art. 2. — L'association a pour objet l'achat et la vente de charbons, cokes et briquettes.

Capital et actions.

Art. 3. — Le capital de fondation est de 900.000 marcs divisé en 3.000 actions nominatives de 300 marcs chacune. Le transfert d'une action ne peut se faire sans le consentement du Conseil d'administration et de l'assemblée générale. Il n'est valable qu'après qu'un acte notarié ou judiciaire aura agréé la personne de l'acquéreur.

Les noms des actionnaires seront inscrits dans le registre des actions.

Chaque propriétaire de mines souscrira un nombre d'actions du Syndicat proportionnel à sa production.

Art. 4. — Si des actions ont été perdues ou détruites, il devra en être fait signification par voie judiciaire à la Société. Ce n'est qu'après cette signification qu'une nouvelle action pourra être faite et délivrée.

Organes de l'Association.

Art. 5. — Les différents organes de la Société sont : (*a*) la Direction ; (*b*) le Conseil de surveillance ; (*c*) l'Assemblée générale.

Direction.

Art. 6. — La Direction se compose de deux ou de plusieurs membres nommés par le Conseil de surveillance. La signature du Syndicat est déléguée régulièrement soit à deux des membres de la Direction, soit à l'un de ces membres et à un fondé de pouvoir.

Conseil de surveillance.

Art. 7. — Le Conseil de surveillance se compose de neuf membres qui seront, sauf ceux du premier Conseil, élus par l'Assemblée générale pour une durée de trois ans. Tous les ans, au moment de l'assemblée générale, trois membres sortiront. Pour la première période, les noms des membres sortants seront tirés au sort ; mais, par la suite, ils seront pris par ordre d'entrée au Conseil. Les membres sortants sont rééligibles. A chaque membre du Conseil de surveillance sera adjoint un membre suppléant.

Si, par suite de circonstances spéciales, un des membres du Conseil de surveillance vient à disparaître avant l'assemblée générale, la place restera vacante jusqu'à la plus prochaine assemblée générale ; mais, si le nombre des membres du Conseil vient à tomber au-dessous de cinq, une Assemblée générale devra être convoquée d'urgence pour compléter le Conseil.

La nomination d'un membre en remplacement d'un membre démissionnaire n'est jamais valable que pour le laps de temps que le membre démissionnaire avait encore à parcourir.

Art. 8. — Le Conseil de surveillance ne peut émettre de décision valable que si tous les membres sont convoqués et si cinq membres au moins sont présents.

Art. 9. — Le conseil de surveillance se constitue immédiatement après l'assemblée générale en nommant au scrutin son président et son vice-président.

Assemblée générale.

Art. 10. — L'assemblée générale des actionnaires est convoquée par les soins de la direction, mais le droit de convocation de l'assemblée générale appartient aussi au Conseil de surveillance.

Cette convocation est adressée par lettre recommandée accompagnée de l'ordre du jour, au moins 15 jours à l'avance, à tous les actionnaires inscrits sur le registre des actions.

Le délai de deux semaines court à partir du jour d'envoi des lettres de convocation, et à cet effet, le timbre de la poste fait foi.

Art. 11. — Chaque action donne droit à une voix et le registre des actions sert de base à l'attribution du nombre des voix.

Chaque membre pourra, par pouvoir sur papier libre, déléguer ses droits de participation à l'assemblée générale.

Le mandataire n'a pas besoin d'être actionnaire.

Art. 12. — La présidence de l'assemblée générale appartient au président du Conseil de surveillance ou à son vice-président, et, en cas d'empêchement de ces deux personnes, à un président élu par l'assemblée générale. Le président ouvre et clôt la séance ; il nomme deux assesseurs et dirige les débats. Pour la validité des résolutions et des votes de l'Assemblée générale la majorité absolue des voix représentées suffit tant que les statuts n'ont pas prévu d'exception.

Art. 13. — L'assemblée générale ordinaire a lieu tous les ans dans les six premiers mois de l'année commerciale. Si le Conseil de surveillance ou la direction le juge nécessaire, ils peuvent convoquer des assemblées générales extraordinaires à condition d'accompagner la convocation de l'ordre du jour de la séance ; la même convocation peut avoir lieu si les possesseurs d'un cinquième au moins des actions le demandent au Conseil de surveillance ou à la direction.

Art. 14. — Les questions à présenter aux assemblées générales ordinaires pour qu'il soit statué à leur égard sont :

(*a*) Le rapport annuel ; (*b*) le bilan annuel avec le compte des profits et pertes, et la demande de décharge de la direction et du Conseil de surveillance ; (*c*) la répartition du bénéfice net ; (*d*) l'élection des membres du Conseil de surveillance ; (*e*) l'élection des censeurs aux comptes ; (*f*) la fixation du nombre d'actions que devra posséder chaque propriétaire de mine adhérent.

Art. 15. — L'assemblée générale peut approuver des changements aux statuts et l'augmentation du capital, à la simple majorité prévue à l'article 12. Pour tout ce qui concerne le changement du but de la Société, la réduction du capital primitif, la dissolution, la fusion ou la liquidation de la Société, une majorité des trois quarts du capital-actions est nécessaire.

Art. 16. — Le procès-verbal d'une assemblée générale n'a besoin d'être signé que par le président et par deux actionnaires ou par leurs représentants.

Bilan. — Répartition des bénéfices. — Fonds de réserve.

Art. 17. — La direction est tenue, dans les trois premiers mois de l'année commerciale, de fournir au Conseil de surveillance le bilan et le compte de profits et pertes relatifs à l'année écoulée, ainsi qu'un rapport sur la situation des biens de la Société et sur l'état des affaires (rapport annuel). Ces documents, accompagnés des observations du Conseil de surveillance, seront présentés à l'assemblée générale. Chaque actionnaire devra recevoir un extrait de ce rapport, ainsi que du rapport des censeurs aux comptes, au moins deux semaines avant l'assemblée générale.

Art. 18. — Sur le bénéfice net, un vingtième au mois sera prélevé pour constituer le fonds de réserve jusqu'à ce que celui-ci ait atteint le dixième du capital.

Art. 19. — Les publications de la Société qui doivent être faites par la voie des journaux ne seront insérées que dans le *Reichs-Anzeiger* (Feuille d'annonces de l'Empire), sous la rubrique : *Rheinisch-Westfälisches Kohlen-Syndicat* (Syndicat des houilles des provinces rhénanes et de la Westphalie), et signées : *La Direction* ou *Le Conseil de surveillance.*

(Extrait des Circulaires nos 669, 702, 712, 714, 732, 735, 763, 774, 781, 795, 705, du *Comité central des houillères de France.*)

M. B.

UTILITÉ

DES

CHEMINS DE FER D'INTÉRÊT LOCAL

TARIFS — FORMULE D'EXPLOITATION

EXAMEN

DES OBSERVATIONS FORMULÉES PAR M. COLSON

(Suite et fin.) (*)

ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSÉES BIBLIOTHÈQUE

CHAPITRE V.

NATURE DES EFFETS PRODUITS PAR LES CHEMINS DE FER D'INTÉRÊT LOCAL.

34. *Opinions en présence.* — Nous n'avons pas reculé devant une étude minutieuse et aride pour mettre hors de doute le fait capital qui est l'objet des chapitres précédents, parce qu'il sert de base à toute notre argumentation et qu'une fois établi, il permet de justifier facilement le surplus de nos conclusions.

Si nous avons réussi, nous pouvons regarder comme démontré que le trafic nouveau, créé par les lignes d'intérêt local, fait d'assez longs parcours sur les grands réseaux pour leur procurer des recettes importantes et même supérieures en moyenne à celles qu'il donne à ces petites lignes elles-mêmes.

Dans la note à laquelle nous répondons, M. Colson a

(*) Voir *suprà*, p. 45-107.

exprimé son opinion à ce sujet de la manière suivante, après avoir formulé des réserves sur la difficulté qu'on rencontre à faire des conjectures en pareille matière.

« S'il fallait absolument faire une hypothèse, nous inclinerions à croire que le trafic *créé* par l'embranchement ne doit effectuer sur la ligne principale qu'un parcours médiocre. »

Le mot médiocre n'est pas précis, mais on ne peut conserver aucun doute sur le sens que M. Colson lui donne lorsqu'on a achevé la lecture de son mémoire ; on reconnait que, dans ses conclusions, il tient peu de compte de l'augmentation de trafic que les petites lignes apportent aux grands réseaux, ce qui implique qu'il la trouve médiocre, au point d'être, en général, presque négligeable.

L'opinion de M. Colson est donc bien éloignée de la nôtre ; voici comment il la motive :

« Les marchandises qui vont au loin, sont surtout celles qui peuvent supporter des frais de transport élevés ; or, pour celles-là, l'économie qui résulte de la substitution d'un embranchement de chemin de fer au roulage sur un parcours de quelques kilomètres, n'a pas une très grande importance, et ne semble, par suite, pas devoir ajouter beaucoup au trafic préexistant. Le trafic nouveau, à la création duquel le chemin de fer est indispensable, est celui qui ne pouvait pas supporter les frais de camionnage, c'est-à-dire celui des produits de médiocre valeur, qui ne vont guère aux grandes distances.

« De même, pour les voyageurs, quelques kilomètres de plus ou de moins à faire en voiture, n'exercent pas une influence capitale sur le coût, sur la durée, et, par suite, sur le nombre des voyages à grande distance ; ce sont les relations avec la ville voisine que l'embranchement transforme, et que, par suite, il développe dans une très large mesure. »

La conclusion de M. Colson, relative à l'importance du

parcours que fait, sur les grandes lignes, le trafic créé par les embranchements, étant directement contraire aux *faits* que nous avons mis en lumière dans les chapitres précédents, nous pourrions ne pas examiner les raisonnements qui ont pour but de l'établir ; mais ils semblent, au premier abord, si plausibles, qu'en les négligeant, nous courrions le risque de laisser des doutes dans l'esprit des lecteurs.

L'argumentation dont il s'agit, peut se résumer en ces deux propositions :

1° L'économie qui résulte de la substitution d'un embranchement de chemin de fer au roulage sur un parcours de quelques kilomètres, n'a pas une très grande importance ;

2° Par suite, elle ne doit pas ajouter beaucoup au trafic à grande distance qui préexistait.

Ce sont la mineure et la conclusion d'un syllogisme dont la majeure, liaison nécessaire de l'une à l'autre, doit se formuler ainsi :

Tout ce qui ne produit pas d'économies importantes de transport, n'ajoute pas beaucoup au trafic à grande distance qui préexistait.

Et pourquoi, d'après M. Colson, en est-il ainsi ? Parce que les transports à grande distance entraînent des frais élevés, vis-à-vis desquels une faible économie a une importance si minime qu'elle ne peut les provoquer efficacement.

Si l'on veut remonter à la source de ces déductions, on trouve le principe suivant qu'elles supposent nécessairement :

L'économie de transport est la cause unique, ou, tout au moins, la cause absolument prépondérante des déterminations humaines, en pareille matière.

35. *La base de l'argumentation de M. Colson est incon-*

ciliable avec les faits. — Nous allons démontrer que ce principe est absolument inconciliable avec les faits que nous avons établis dans les chapitres précédents.

Nous avons rappelé et étayé de nouvelles preuves sur l'opinion universellement acceptée que le trafic fourni aux chemins de fer par une localité quelconque diminue très rapidement à mesure qu'augmente sa distance aux stations. Dans les cas que nous avons étudiés, on peut admettre, comme moyenne, que lorsque cette distance s'abaisse de 2.000 mètres à 500 mètres, par exemple, on voit augmenter le nombre de voyageurs par habitant dans le rapport de 1 à 3 et la recette dans le rapport de 1 à 2 environ. Or ce fait est inconciliable avec la proposition qui est la base implicite, mais nécessaire, du raisonnement qui nous est opposé. Quelle est, en effet, l'importance des économies qui résultent d'une diminution de parcours de 1.500 mètres? Presque rien. Les voyageurs valides franchissent généralement à pied cette distance et ils en parcourent très souvent de bien plus grandes sans motifs sérieux, pour se promener ou se distraire. Quant aux marchandises, il n'en coûte guère plus de les transporter à 2.000 mètres qu'à 500. La différence de durée du trajet est peu de chose auprès du temps employé au chargement, au déchargement et aux formalités qu'il faut remplir à la gare pour expédier la marchandise ou en obtenir livraison. Si l'on veut chiffrer la dépense qui correspond à cette différence de distance de 1.500 mètres, on ne peut pas l'évaluer, en général, à plus de 0ᶠ,20 ou 0ᶠ,30 par tonne, ce qui est bien minime auprès des frais de transport par chemin de fer qui sont, en moyenne, de 11 francs (*) par tonne pour le parcours total qu'ils effectuent.

(*) C'est la recette correspondante au parcours moyen de 180 kilomètres sur l'ensemble des réseaux que nous avons déterminé au paragraphe 18.

Si les économies de transport étaient la cause unique ou même simplement la cause prépondérante de l'influence que le voisinage des gares exerce sur le trafic, une réduction de 1.500 mètres sur cette distance n'aurait donc qu'un effet minime sur le trafic. Comme, au contraire, il est certain qu'elle l'augmente dans une proportion énorme, on est forcé de reconnaître qu'à côté des économies de transport, on doit prendre en considération d'autres influences dont nous allons chercher à préciser la nature et les effets.

36. *Effets de réclame et commodités résultant du voisinage des stations.* — On connaît la puissance de la réclame et le succès de certaines spécialités qui assurent des bénéfices énormes à ceux qui les vendent, bien qu'elles n'aient, sur les produits similaires, d'autre supériorité que celle d'être prônées avec art et, sans cesse, imposées à l'attention du public. Or le voisinage d'une station, le bruit et le mouvement des trains font aux chemins de fer la meilleure de toutes les réclames.

En outre, le voisinage de la station rend les déplacements faciles et commodes ; il permet à l'expéditeur et au destinataire des marchandises d'accomplir eux-mêmes les formalités nécessaires et de soigner personnellement leurs intérêts. Nous ne faisons que rappeler ici ces avantages, parce que nous les avons exposés longuement dans notre premier mémoire.

M. Colson a dû reconnaître que cette réclame et ces commodités produisent des effets, mais il pense que des causes si peu importantes ne peuvent provoquer que les transports d'intérêt minime, c'est-à-dire ceux qui se font à petite distance.

Il est certain que l'effet direct et immédiat de cette réclame et de ces commodités est surtout de développer les voyages à la ville et aux marchés voisins ; mais ces

voyages produisent, à leur tour, des effets considérables que l'expérience met hors de doute et dont M. Colson n'a pas tenu compte.

37. *Effets des voyages à courte distance.* — Les populations éloignées des chemins de fer voyagent peu et n'ont guère de relations avec le dehors. Elles ne participent que dans une faible mesure et bien tardivement, aux progrès incessants de la science, du commerce et de l'industrie. Elles sont obligées de recourir, pour tous les échanges, à de petits intermédiaires, qui ne peuvent eux-mêmes se mettre en rapport avec les centres de consommation et de production qu'en s'adressant à d'autres intermédiaires mieux placés et plus intelligents qu'eux. Le plus clair du bénéfice reste souvent entre les mains de ceux qui concourent ainsi aux transactions commerciales.

Aussi l'habitant des campagnes réduit-il ses échanges au minimum possible et est-il souvent amené à consommer des marchandises qui répondent imparfaitement à ses besoins et à faire des cultures mal appropriées au sol ou au climat, au lieu de produire les marchandises qui conviennent à la région et de les échanger contre celles dont il a besoin et que d'autres pays fournissent dans de meilleures conditions. Le pêcheur vit de sa pêche, le Breton boit son cidre, et, suivant que le sol fournit facilement le blé, le seigle, l'orge, le maïs ou le sarrasin, le paysan vit surtout de blé, de seigle, d'orge, de maïs ou de sarrasin.

Si le pays recèle des richesses naturelles qu'on ne peut exploiter qu'en cherchant des débouchés au loin et en déployant quelque initiative, on les laisse sans emploi, plus encore parce que l'on ne sait où et comment les vendre que parce qu'il en coûterait cher de les amener aux grandes voies de transport.

Telle est la situation des pays perdus loin des chemins de fer. Mais qu'on y fasse pénétrer une voie de communication rapide et commode et bientôt la situation se modifie profondément.

Dans ses fréquents voyages à la ville, le paysan ou le commerçant apprend que les produits locaux se vendent bien dans tel ou tel centre de consommation éloigné ; il s'y rend et se crée des relations directes à grande distance. Il n'y aurait même pas songé, s'il n'avait fait à la ville que de rares et courtes apparitions, pendant les quelques heures qui restent entre l'arrivée en charrette et le départ, après qu'on a mangé, bu et soigné son cheval.

En même temps qu'il s'habitue à expédier ses produits aux centres où ils se vendent le mieux, l'habitant des campagnes apprend à demander les marchandises dont il a besoin aux marchés éloignés, où il peut se les procurer dans les meilleures conditions. Il trouve en ville les renseignements, les journaux, les réclames, les étalages des magasins qui lui révèlent tout un monde ignoré, les outils et les instruments nouveaux de production, les marchandises étrangères dont il ne soupçonnait même pas l'existence. Les hommes qui ont toujours vécu au milieu de cette publicité, ont quelque peine à se rendre compte des révélations qu'elle fait aux habitants des campagnes et de la puissance qu'elle a pour provoquer les échanges à grande distance et pour tendre ainsi vers ce desideratum des économistes : *produire chaque marchandise dans le pays où cela est avantageux.*

Assurément, le bon marché des transports est une des conditions de ce progrès, chacun le sait; mais ce qui est moins universellement reconnu et ce que nous voulons mettre en lumière, c'est que, pour profiter de ce bon marché, il faut savoir ce que l'on peut, avec avantage, expédier ou demander au loin, que cette connaissance se répand surtout dans le voisinage des chemins de fer

et que, par suite, un embranchement qui la fait pénétrer plus avant, peut développer, dans une large mesure, les transports à grande distance, bien que l'économie produite par son emploi soit presque insignifiante par rapport au coût total du voyage ou du transport.

Telle est, à notre avis, l'explication de l'influence considérable que les embranchements exercent sur le trafic des grands réseaux. On peut la résumer en disant que *les relations fréquentes avec les villes que provoque le voisinage des chemins de fer, agrandissent l'horizon des populations rurales et la zone dans laquelle elles s'approvisionnent et expédient leurs produits et qu'elles provoquent ainsi des transports à grande distance.*

38. *Diminution d'importance des petites villes.* — Les considérations qui précèdent, peuvent soulever l'objection suivante : Si les rapports plus fréquents qu'il a avec les villes, amènent l'habitant des campagnes à agrandir le cercle de ses relations, il en aura moins avec le centre où il s'approvisionnait et où il vendait autrefois ses produits et le trafic que ce centre donnait aux chemins de fer, subira une diminution qui compensera, en partie, l'augmentation du trafic des régions voisines.

Assurément il y a quelques petites villes qui perdent ainsi une partie de leur importance et dont le trafic par chemins de fer subit une diminution qu'il faut retrancher des recettes données aux grands réseaux par les stations des embranchements ; mais ce fait est exceptionnel, s'il faut en croire un homme qui fait autorité en matière de chemins de fer :

« Pendant un certain temps, disait M. Jacqmin, on a pu croire que le commerce d'un grand nombre de petites villes allait disparaître au profit des villes plus importantes ». Ce ne serait encore qu'un déplacement, mais il n'en a rien été. « D'une part, les propriétaires de ces maisons de commerce, ont, à leur tour, profité des facilités que leur offraient les chemins de fer pour augmenter leurs approvisionnements ; d'autre part, la clientèle s'est étendue. Si on a perdu quelques clients de la bourgeoisie, on a gagné les clients de la campagne en bien plus grand nombre. En comparant la somme d'échanges qui s'effectuent aujourdhui dans une ville de 8.000 à 10.000 âmes à celle qui s'effectuait dans la même ville, il y a vingt ans, on trouverait une différence extraordinaire. »

Quoi qu'il en soit, lorsque l'ouverture d'un embranchement amène une diminution d'importance et de trafic pour une ville voisine, la réduction des recettes qui en résulte pour les chemins de fer, apparaît dans la colonne 12 de nos tableaux n° 1 et dans la colonne 13 des tableaux n° 2 qui indiquent les diminutions de recettes des stations influencées par l'ouverture de la ligne, et, par suite, il en est tenu compte dans les chiffres définitifs inscrits aux dernières colonnes et dans les valeurs de Z.

Les faits signalés par M. Jacqmin expliquent comment il peut arriver que les chiffres des colonnes 12 et 13 de ces tableaux accusent quelquefois une augmentation de recettes, au lieu d'une diminution. Ce fait se produit lorsque l'accroissement d'activité commerciale que l'ouverture d'un embranchement provoque dans la ville voisine de la bifurcation, procure à sa station un trafic nouveau compensant et au delà, la diminution des recettes provenant des transports qui, autrefois, lui arrivaient directement, par voie de terre, de la région que dessert le nouvel embranchement.

Quelque vraisemblables que semblent ces explications du mécanisme par lequel les embranchements provoquent des transports nouveaux à grande distance, elles le paraîtront plus encore si on les rapproche des observations que nous avons faites au sujet des différences que les parcours moyens présentent d'une localité à l'autre.

L'épure (*fig.* 1, p. 77) montre que, toutes choses égales d'ailleurs, les recettes moyennes par unité transportée et, par suite, les parcours moyens sont d'autant plus considérables que les localités desservies ont plus d'importance et qu'ils augmentent, par exemple, de 50 à 80 p. 100 lorsque la population agglomérée s'élève de 200 à 3.000 habitants. Ce fait prouve que l'horizon commercial et le rayon d'activité des habitants d'une localité sont d'autant plus étendus que celle-ci est plus importante et participe plus largement au mouvement économique du pays. Il est bien naturel que le voisinage du chemin de fer produise des résultats analogues, puisqu'il contribue, aussi efficacement que l'agglomération, à mettre les populations en contact plus intime et plus facile avec tous les éléments du progrès.

Toutes les considérations qui précèdent expliquent ce fait, si surprenant au premier abord, que les régions qui sont éloignées de 10 à 15 kilomètres des chemins de fer, ne leur donnent directement que le 1/10 environ du trafic qu'elles leur fourniraient, si elles en étaient très rapprochées, et qu'elles se renferment en elles-mêmes pour vivre de leurs propres produits, au lieu d'obéir largement à la grande loi de l'échange qui est assurément l'une des règles du monde moderne.

39. *Différence des méthodes d'étude suivies par M. Colson et par nous.* — Nous avons terminé l'étude du trafic commun aux grandes et aux petites lignes, et nous pouvons préciser la nature et les causes du profond dissentiment qui nous sépare de M. Colson.

D'après lui, l'économie qu'un chemin de fer permet de réaliser, est la cause absolument prépondérante des transports qu'il provoque. Sans doute, il reconnaît que la voie nouvelle procure, en outre, au public, de grandes commodités et produit sur lui une sorte d'effet de réclame.

Mais, en ce qui concerne les petites lignes, il pense qu'économies, commodités et réclames n'ont, toutes ensemble, qu'une importance disproportionnée à celle des transports à grande distance et qu'elles ne peuvent, par suite, en créer de nouveaux, en proportion notable.

M. Colson part donc d'un principe abstrait et en tire les conséquences. En quelques mots, il écarte les faits que mettent en lumière les études statistiques de notre premier mémoire et nous avons démontré plus haut qu'ils méritent cependant une très sérieuse attention.

Adoptant la marche opposée, nous nous sommes d'abord préoccupé des faits. A l'aide des statistiques, nous avons déterminé les recettes apportées aux grands réseaux contigus, par seize lignes englobées dans les réseaux de l'Ouest, d'Orléans, du Nord, de Paris-Lyon-Méditerranée et de l'Est, et nous avons constaté qu'elles avaient une importance considérable.

Reconnaissant que ce fait capital a deux causes prochaines : la longueur des parcours moyens et la rapidité avec laquelle décroît l'action d'un chemin de fer quand sa distance augmente, nous avons fait l'étude statistique de ces deux éléments pour vérifier et contrôler celle des augmentations de recettes des grands réseaux et nous avons trouvé des résultats concordants.

Les faits étant ainsi établis par la méthode expérimentale, nous en avons recherché les causes profondes, non pas pour prouver (on n'a pas à prouver les faits constants), mais pour expliquer ces faits, et c'est ainsi que nous sommes arrivé à la conception complexe que nous opposons à la conception simpliste de M. Colson et qui se résume ainsi :

40. *Différence des conclusions.* — L'homme n'est point une machine simple sur laquelle les causes produisent toujours des effets en rapport avec leur valeur intrin-

sèque. Très souvent il ne se rend pas un compte exact de ses véritables intérêts, surtout de ceux dont l'objet est loin de lui. En général, il connaît fort mal les ressources que les pays éloignés lui offrent pour l'échange de ses produits et le parti qu'il peut tirer des progrès de la science et de l'industrie. Les chemins de fer l'éclairent à ces divers points de vue, en le mettant en contact avec les foyers de lumière.

En outre, l'homme est inerte. Même lorsqu'il sait que son intérêt lui commande un mouvement, une démarche, il hésite et s'abstient souvent. Le voisinage du chemin de fer l'invite, le pousse et aide ainsi sa volonté, après avoir éclairé son intelligence, après l'avoir élevé dans la hiérarchie économique, après avoir agrandi son horizon et le cercle de ses relations.

Non seulement l'étude des statistiques met ces faits hors de doute, mais, à notre avis, elle démontre qu'en ce qui concerne les petites lignes, les influences psychologiques et morales ont des effets bien supérieurs à ceux des économies directes de transport, auxquelles M. Colson attribue une importance absolument prépondérante et presque exclusive.

Nous croyons pouvoir ajouter que l'âme et la société humaines sont si complexes, formées d'éléments si multiples et soumises à des influences si diverses qu'on ne court pas grand risque de se tromper en jugeant, *a priori*, erronées les synthèses basées sur un principe unique. En pareille matière, nous ne voyons qu'une seule méthode qui soit sûre : elle comporte d'abord la constatation précise des faits, puis leur étude analytique qui seule peut révéler les éléments multiples qui doivent figurer dans la synthèse si l'on veut la tenter ensuite.

Si donc notre travail est l'objet de nouvelles critiques, elles ne nous paraîtront concluantes que si elles nous opposent de nouveaux faits ou si elles démontrent que

ceux que nous avons constatés, sont mal observés ou mal interprétés ou qu'ils ont une signification différente de celle que nous leur avons attribuée. On ne peut s'incliner devant les conclusions tirées d'un principe abstrait que lorsqu'il est démontré qu'il tient compte de tous les éléments de la question.

41. *Frais de transbordement et tarifs communs.* — Les considérations développées dans le présent chapitre nous permettent de présenter quelques observations relatives à la question des tarifs communs que nous nous sommes borné à poser au paragraphe 21.

Il est universellement reconnu qu'une population quelconque fournit d'autant plus de transports aux chemins de fer, qu'elle est desservie à plus courte distance. Nous avons donné de nouvelles preuves de la surprenante rapidité avec laquelle le trafic diminue quand la distance augmente, et nous l'avons expliquée par la réclame que le voisinage des gares fait aux chemins de fer, par les facilités qu'il donne aux intéressés pour surveiller leurs transports et par l'agrandissement de l'horizon commercial qui résulte de leur contact fréquent avec les villes.

Si donc une population A (*fig.* 2) est notablement plus rapprochée d'une station B de l'embranchement CE que la grande ligne HI, il n'est nullement indifférent à la compagnie qui exploite celle-ci, que cette population prenne l'habitude de faire ses transports par une station ou par l'autre.

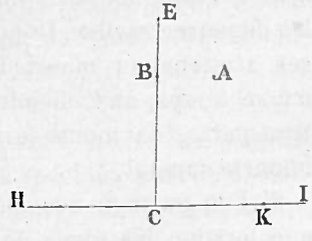


Fig. 2.

Lorsque le trafic dirigé vers I s'embarque en K, la grande compagnie perd le transport BCK si l'embranchement lui appartient, et le transport CK s'il ne lui appartient pas.

Mais ce qui est beaucoup plus important, c'est que si la population A se sert des stations C ou K dont elle est séparée par une grande distance, au lieu d'aller à la station B qui est bien plus proche, elle souffre des difficultés que produit l'éloignement et elle donne beaucoup moins de trafic aux chemins de fer.

Or, qu'est-ce qui peut empêcher de s'adresser à la station la plus proche? L'augmentation des délais et des frais de transport.

En ce qui concerne les délais, il y a un intérêt trop évident à les réduire pour qu'il y ait lieu de le démontrer.

La question des frais de transport est moins claire et sera tranchée dans un sens ou dans l'autre, suivant qu'on admettra, avec M. Colson, que l'économie est la cause unique ou, du moins, la cause très prépondérante de l'emploi des chemins de fer, ou qu'on reconnaîtra, avec nous, que divers mobiles d'ordre psychologique ont une influence égale, sinon prépondérante.

Dans le premier cas, on dira que, puisque les transbordements et les transports sur l'embranchement entraînent des dépenses relativement élevées, il n'y a aucune raison pour qu'il n'y ait pas une différence correspondante entre les prix de transport à partir des stations de l'embranchement et de celles de la grande ligne. On ajoutera que, les tarifs étant ainsi mis en harmonie avec les dépenses réelles, le public saura bien user des diverses stations au mieux de ses intérêts et donnera, en même temps, aux chemins de fer, sinon le maximum de transports, du moins le maximum de bénéfices, ce qui importe surtout.

Si l'on partage nos idées, on pensera, au contraire, que lorsque les tarifs de transport sont beaucoup plus élevés à partir des stations de l'embranchement qu'à partir de celles de la grande ligne, l'esprit d'économie

des populations rurales les pousse à adopter la combinaison qui fait sortir de leur bourse le moins possible de ce métal qui leur tient tant au cœur, sauf à acheter cette économie au prix d'un surcroît de travail de leurs attelages qui souvent a bien plus de valeur, et à souffrir des difficultés de tout genre qui résultent de l'éloignement.

Que ces difficultés leur soient imposées par une nécessité absolue ou qu'ayant le moyen de les éviter, les intéressés les acceptent néanmoins par esprit d'économie, cela n'a aucune importance au point de vue de leurs effets. Dans un cas comme dans l'autre, elles diminuent de beaucoup le trafic.

Si ces déductions sont exactes, les compagnies ont intérêt à réduire, dans une sage mesure, l'écart des prix de transport que l'on paye suivant qu'on use des stations des embranchements ou de celles des grandes lignes. Elles diminueraient ainsi l'obstacle qui empêche les populations d'adopter la solution la plus commode pour elles et, par conséquent, la plus favorable au développement du trafic.

C'est ce que font parfois les grandes compagnies pour les embranchements qui leur appartiennent, surtout pour les transports à grande distance dont chaque tonne leur laisse un bénéfice considérable. Ainsi, pour les légumes, la compagnie de l'Ouest demande le même prix total de transport de Morlaix à Paris que de Roscoff à Paris, bien qu'il y ait une différence de 28 kilomètres entre ces deux parcours.

Nous ignorons si cette faveur est la conséquence fortuite de la fixation de tarifs spéciaux pour Roscoff qui profitent aux stations intermédiaires, ou si la compagnie a pensé, comme nous, que la perte qu'elle subit sur la distance de Roscoff à Morlaix, est surabondamment compensée par les bénéfices que lui donne l'augmenta-

tion de trafic causée par l'habitude donnée aux populations d'user des stations les plus rapprochées et les plus commodes pour elles. Quoi qu'il en soit, nous croyons que cette mesure est pour beaucoup dans l'énorme accroissement de recettes que l'embranchement de Roscoff a procuré au réseau de l'Ouest et qui, pour les marchandises seules, s'est élevé à 207.000 francs en 1885 et à des chiffres bien plus élevés encore en 1888 et 1889.

Les arguments par lesquels nous avons cherché à démontrer que les compagnies ont intérêt à réduire l'écart des prix de transport qu'on doit payer à partir des stations des embranchements et à partir de celles des grandes lignes, s'appliquent évidemment aussi au cas où ces embranchements appartiennent à des sociétés d'intérêt local; mais alors il est plus difficile d'aboutir, parce qu'il faut que les deux parties se mettent d'accord. En principe, chacune d'elles doit faire des sacrifices en rapport avec les bénéfices qu'elle en retirera et, par suite, les grandes compagnies doivent être d'autant plus généreuses qu'il s'agit de transports à plus longue distance qui leur laisseront de plus grands bénéfices.

En général, on ne peut songer à l'égalisation absolue des tarifs, qui est réalisée pour les légumes de Roscoff; mais il semble que le moins qu'on puisse faire, c'est de sacrifier le transbordement dans les tarifs communs et que souvent les grandes compagnies auront intérêt à aller au delà, en exigeant une juste réduction des tarifs sur les lignes d'intérêt local, en retour des sacrifices qu'elles auront consentis.

Nous pensons qu'en étudiant chaque espèce et en marchant avec prudence dans cette voie de concessions réciproques, les Compagnies serviront leurs intérêts, en même temps que ceux du pays.

Il nous semble difficile de ne pas voir une confirmation

de ces idées dans la différence considérable des recettes que donnent aux grands réseaux les embranchements des grandes compagnies et les lignes d'intérêt local. Elle apparaît au premier examen des tableaux insérés au paragraphe 5 de notre premier mémoire et au paragraphe 3 de la présente note. Sans doute cette différence s'explique, en partie, par la différence d'importance des localités desservies, mais elle tient aussi à d'autres causes. En effet, les statistiques détaillées des stations le prouvent, l'influence que l'importance des agglomérations exerce sur la longueur des parcours moyens, est beaucoup plus forte pour le trafic des voyageurs que pour celui des marchandises. Par suite, si les embranchements ne différaient des lignes d'intérêt local que par l'importance des localités desservies, ce serait surtout pour les recettes des voyageurs qu'éclaterait leur supériorité. Or, c'est l'inverse qui se produit et dans une mesure telle qu'on ne peut guère y voir un simple hasard. En effet, le rapport moyen des valeurs de Z que donnent, d'une part, les embranchements des grandes compagnies, et, d'autre part, les lignes d'intérêt local, n'est que de 1,9 pour les voyageurs, tandis qu'il s'élève à 4,0 pour les marchandises.

N'est-il pas naturel de penser que cette énorme supériorité des premières sur les secondes, au point de vue des recettes apportées aux grands réseaux pour le trafic des marchandises, tient, en partie, à la rapidité des transbordements et à l'égalisation plus satisfaisante des tarifs, et que les grandes compagnies ont un puissant intérêt à faire des chemins de fer d'intérêt local des affluents aussi efficaces que leurs propres embranchements, en les faisant jouir des mêmes avantages ?

CHAPITRE VI.

ÉCONOMIES DIRECTES DE TRANSPORT.

42. *Définition des économies de transport.* — M. Colson n'ayant fait, au sujet des bénéfices d'exploitation, aucune autre critique de nos conclusions que celles qui sont la conséquence forcée de son opinion sur le peu d'importance du trafic que les embranchements procurent aux grands réseaux, nous ne reviendrons pas sur ce sujet, et nous nous occuperons ici des autres avantages que les chemins de fer procurent au public, et qui sont habituellement divisés en deux catégories sous les désignations d'économies directes de transport et d'avantages indirects.

L'importance relative de ces deux sortes d'avantages est l'objet d'un profond désaccord entre M. Colson et nous. Il regarde comme presque nuls les avantages indirects dont, au contraire, nous croyons l'importance bien supérieure à celle des économies de transport.

Nous nous demandons si un tel dissentiment ne tient pas, au moins, en partie, à un malentendu. Pour le dissiper, s'il existe, nous allons définir, de nouveau, ce que nous entendons par les mots : *Économies directes de transport.*

Certains auteurs et orateurs parlementaires ont exposé, à ce sujet, les idées suivantes :

Le coût du transport à 1 kilomètre sur les voies de terre est, en moyenne, de $0^f,10$ pour les voyageurs et de $0^f,25$ pour les marchandises. Les tarifs kilométriques correspondants des chemins de fer sont de $0^f,05$ et de $0^f,06$. Le public réalise donc une économie moyenne de $0^f,10 - 0^f,05 = 0^f,05$ par voyageur, et de $0^f,25 - 0^f,06 = 0^f,19$ par tonne de marchandise que les chemins de fer transportent à 1 kilomètre.

On arrive ainsi à des chiffres énormes pour les économies que les chemins de fer procurent au public, mais on se trompe gravement, car la plus grande partie des nouveaux transports qu'a provoqués le bon marché des chemins de fer, ne pourrait pas supporter les dépenses de camionnage sur route, parce qu'elle a une valeur inférieure à ces dépenses.

M. Colson n'est pas tombé dans cette erreur, et, comme nous, il admet que l'économie procurée au public par un transport est la différence entre la valeur de ce transport et la taxe dont on le paye.

Mais qu'est-ce qu'on entend par valeur d'un transport? Est-ce la somme des avantages dont il fait bénéficier la collectivité tout entière, directement ou indirectement? S'il en était ainsi, la différence entre cette valeur et la taxe payée représenterait bien la totalité des services rendus au public. Il n'y aurait rien en dehors d'elle, c'est évident.

Mais une telle définition serait une pure tautologie et serait en contradiction complète avec le langage des économistes qui, dans la valeur, ne comprennent pas les services rendus à d'autres qu'à l'acheteur, c'est-à-dire, dans le cas actuel, à celui pour lequel se fait le transport.

Appellera-t-on, du moins, valeur d'un transport la valeur vraie des avantages qu'il procure à l'expéditeur, telle que la jugerait une intelligence parfaite, capable de se rendre compte de toutes les conséquences prochaines ou éloignées que ce transport aurait pour l'expéditeur? Non encore; les économistes ne se préoccupent pas de cette notion qu'aucun phénomène extérieur ne permet de saisir sur le fait et de mesurer.

On nomme valeur d'un transport la valeur que lui

assigne l'expéditeur, c'est-à-dire le prix dont il consent à le payer et qu'il ne veut pas dépasser. C'est une notion bien nette qui correspond à un fait réel; c'est celle des économistes et de Dupuit, que nous avons adoptée dans notre premier mémoire. Il est certain que M. Colson l'admet également, bien qu'il ne l'ait pas dit avec une absolue netteté.

L'économie de transport est donc, pour M. Colson comme pour nous, la différence entre la taxe que paye l'expéditeur et la valeur qu'il assigne au transport.

Pour éviter toute confusion, on devrait l'appeler économie de transport procurée directement à l'expéditeur et reconnue par lui. Pour simplifier, nous l'appelons écomie directe de transport.

Par définition, les économies directes de transport ne comprennent donc ni les avantages procurés à d'autres que les expéditeurs, ni même les avantages dont les expéditeurs profitent sans s'en rendre compte.

43. *Utilité de l'étude des économies de transport.* — En lisant ce qui précède, plus d'un lecteur se sera sans doute demandé à quoi bon étudier, à part, les économies de transport ainsi définies qui ne donnent la mesure ni de l'utilité totale des chemins de fer, ni même des avantages dont bénéficient réellement ceux pour lesquels se font les transports.

A l'exemple de Dupuit, nous avons cru devoir étudier cette fraction de l'utilité totale des transports, parce que, seule, elle est susceptible d'une mesure précise et que c'est évidemment faire un pas vers la connaissance d'une somme que de déterminer l'un de ses éléments.

Actuellement nous avons une raison de plus pour revenir sur cette question, c'est que M. Colson s'en est servi pour chercher à démontrer que l'utilité totale des embranchements est fort peu importante, ce que nous regardons comme contraire à la vérité.

Nous examinerons successivement les objections que M. Colson a formulées, en ce qui concerne les grandes et les petites lignes.

44. *Économies de transport sur les grands réseaux.* — A l'aide de la méthode graphique dont Dupuit a, le premier, fait usage, nous avons démontré que si les grandes compagnies appliquaient les tarifs qui peuvent rendre maximum leur bénéfice net, les économies directes dont profiteraient ceux pour lesquels elles effectuent des transports, auraient une valeur, au plus, égale à la moitié de la recette brute qu'elles encaissent.

M. Colson n'a pas contesté cette démonstration géométrique, qui ne saurait être discutée; mais il a soutenu que diverses causes ont forcé les compagnies à abaisser les tarifs bien au-dessous des chiffres qui leur procureraient le maximum de bénéfice, et il a, en conséquence, émis l'opinion que les économies directes de transport procurées aux usagers des chemins de fer dépassent non seulement la moitié, mais la totalité de la recette.

Il est évidemment impossible d'apporter des preuves de fait à l'appui de l'une ou l'autre opinion. Tout ce que nous pouvons dire pour motiver la nôtre, c'est que nous avons trop bonne opinion de l'intelligence et de l'habileté des grandes compagnies pour admettre qu'elles se soient laissé imposer, au-dessous des limites que réclament leurs intérêts, des réductions de tarifs assez énormes pour doubler l'économie dont profite le public. Sans doute la pression de l'opinion et du gouvernement leur a fait accepter des sacrifices, mais nous les croyons moins considérables que ne le suppose M. Colson.

Nous n'insistons pas davantage sur ce point, qui n'a qu'un intérêt théorique. Ce qui nous importe, ce n'est

pas tant la distinction des avantages directs et indirects des chemins de fer, que l'évaluation de leur somme totale que nous rechercherons plus loin.

M. Colson ne peut pas se désintéresser comme nous de cette distinction, parce qu'à l'encontre de l'opinion générale, il réduit presque à néant l'importance des avantages indirects des chemins de fer. Il est, par conséquent, forcé d'admettre, comme valeur approximative de leur utilité totale, la valeur qu'il attribue à leurs avantages directs, et ses idées seraient convaincues d'erreur si cette valeur était évidemment disproportionnée aux effets constatés des chemins de fer.

45. *Économies de transport sur les petites lignes.* — Si M. Colson trouve insuffisante notre évaluation, en ce qui concerne les avantages directs des grands réseaux, il la déclare très exagérée pour le trafic qui se fait sur les petites lignes et même pour celui qu'elles développent sur les grands réseaux. Pour les transports qui se font sur les rails de l'embranchement, il fait observer, avec raison, que les camionnages occasionnent des dépenses dont il faut tenir compte, mais il n'a pas remarqué que nous l'avons fait, attendu que l'expéditeur fait entrer ces dépenses en ligne dans l'évaluation de la valeur du transport représentée par chaque ordonnée de la courbe de Dupuit qui nous a servi à faire notre démonstration. Nous n'insistons pas sur ce point, qui ne peut faire l'objet d'un doute après examen nouveau de notre étude.

En conséquence, nous persistons à considérer comme mathématiquement démontrée la conclusion à laquelle nous sommes arrivé et qui est la suivante :

Le rapport de l'économie directe de transport à la recette brute est aussi élevé pour les chemins de fer d'intérêt local que pour les grands réseaux, lorsque le rapport des tarifs appliqués sur les uns et les autres est égal au

rapport de leurs prix de revient partiels de transport, c'est-à-dire à 3/2 environ.

Cette condition est, dès maintenant, remplie pour toutes les lignes d'intérêt local, en ce qui concerne les voyageurs, et elle le sera, pour les marchandises, lorsque le tarif moyen ne dépassera pas 9 centimes. On ne peut douter qu'il en soit ainsi, dès qu'aux formules reconnues défectueuses qui régissent la plupart des conventions existantes, on aura substitué des formules rationnelles d'exploitation. Nous pensons que la lecture de notre premier mémoire ne peut laisser subsister de doutes à ce sujet.

Nous ne nous occuperons pas plus longuement de la question spéciale des économies que l'expéditeur réalise par rapport à la valeur qu'il assigne aux transports. Comme nous l'avons dit, il nous importe médiocrement d'en préciser la quotité, puisqu'à notre avis, elle ne représente que la moindre part de l'utilité des chemins de fer.

CHAPITRE VII.

AVANTAGES INDIRECTS ET UTILITÉ TOTALE DES CHEMINS DE FER.

46. *Opinions émises sur l'importance des avantages indirects.* — La réalité et l'importance des avantages indirects des chemins de fer ont été presque universellement reconnues par les hommes qui se sont occupés de ces questions. Maintes fois on les a exaltées dans les livres comme dans les discours prononcés à la tribune du Parlement. M. Picard croyait, sans doute, avancer une vérité incontestée en s'exprimant ainsi dans son magistral traité des chemins de fer, après avoir montré que les économies directes de transport ne suffiraient pas pour motiver l'établissement des chemins de fer à faible trafic :

« Heureusement, à l'utilité directe viennent s'ajouter

des avantages indirects de toute nature résultant de l'essor donné à la production agricole, à l'industrie et au commerce. »

M. Colson n'a pas craint de lutter presque seul contre l'opinion générale, ainsi que l'établissent les citations suivantes, où il expose d'abord et motive ensuite ses idées :

« Il faut bien s'entendre sur ce qu'on appelle bénéfices indirects dus à un chemin de fer. On désigne souvent ainsi, dans le langage courant, tous les avantages dus au chemin de fer en dehors de la recette nette, et notamment les bénéfices réalisés par le public, bénéfices que l'on peut classer en deux catégories : économies sur le prix des transports qui s'effectuaient avant le chemin de fer, mais en payant un prix plus élevé ; excédent, sur le prix nouveau, de la *valeur* des transports qui ne pouvaient pas s'effectuer aux anciens prix, et que le chemin de fer seul a rendus possibles. Or, ce sont là des avantages très directs, ceux précisément dont nous venons d'examiner l'importance. Les véritables bénéfices indirects, ceux auxquels M. Considère donne ce nom, avec beaucoup de raison, ce sont ceux qui résultent, en sus des recettes nettes, d'une part, et des bénéfices du public sur les transports, d'autre part, du développement industriel, agricole, commercial engendré par les chemins de fer. Or, ce développement, nous sommes très loin de le nier, mais nous croyons que le considérer comme *s'ajoutant* aux bénéfices directs, en tant que plus-value de la richesse sociale créée par le chemin de fer, c'est commettre une véritable confusion.

. . . . . .

« Un chemin de fer nouveau produit deux sortes de conséquences : il procure certains bénéfices à l'exploitant et au public sur les transports auxquels il sert ; il amène, par suite, des transformations industrielles, agricoles et commerciales. Mais, dans ces transformations, il n'y a

de bénéfices réellement *créés* par le chemin de fer que ceux qui résultent de l'économie sur les transports ; tout le reste n'est que *déplacement* de capitaux et de main-d'œuvre ; et ce déplacement s'opère dans des conditions de rémunération ne différant pas très notablement des conditions antérieures, car, nous le répétons, s'il eût été de nature à procurer des avantages très supérieurs à l'économie faite sur le transport, dans bien des cas, *sinon dans tous*, il n'eût pas attendu cette économie pour se produire. Il n'en est autrement que quand le chemin de fer agit par cette espèce d'action de présence que nous avons admise, c'est-à-dire quand les transports auxquels il sert, eussent parfaitement pu supporter les anciens prix, quand il est l'*occasion* et non la *condition* des transformations industrielles. C'est dans ce cas *exceptionnel* seulement qu'à l'économie réalisée sur les transports, s'ajoutent certains bénéfices que l'on peut qualifier d'indirectement dus au chemin de fer, savoir, ceux dont le manque d'initiative des particuliers empêchait seul la réalisation, même quand le chemin de fer n'existait pas. »

Ainsi donc, suivant M. Colson, les chemins de fer donnent à leurs propriétaires des bénéfices d'exploitation et procurent, en outre, au public, sur les transports qui s'effectuaient avant eux, une économie égale à la différence de leurs tarifs et des prix de transport sur les anciennes voies et, sur les transports nouveaux, une économie égale à la différence de leurs tarifs et de la valeur de ces transports. Et c'est tout ou presque tout. L'essor donné à la production agricole, à l'industrie et au commerce n'est que la manifestation de ces économies capitalisées. Si parfois les chemins de fer produisent, en outre, des avantages indirects, ce n'est que dans les cas *exceptionnels* où ils sont l'occasion et non la condition des transformations agricoles ou industrielles.

En ce qui concerne les transports qui s'effectuaient

avant l'établissement des chemins de fer, nous sommes d'accord avec M. Colson, sauf à relever l'omission involontaire qu'il a faite, en négligeant d'ajouter aux économies d'argent celles de temps et les commodités de tout genre que procurent les chemins de fer.

Nous sommes, au contraire, en profond désaccord avec lui pour les transports nouveaux que provoquent les chemins de fer et dont l'importance est, à notre avis, absolument prépondérante. La valeur que M. Colson leur attribue conformément au langage de Dupuit et des économistes, est bien celle que nous avons définie au paragraphe 42, c'est-à-dire celle que les intéressés consentent à payer et qu'ils ne veulent pas dépasser.

47. *Argumentation de M. Colson.* — Voici la démonstration que M. Colson donne à l'appui de son opinion. Après avoir dit qu'en dehors des économies de transport, les chemins de fer ne produisent qu'un déplacement de capitaux et de main-d'œuvre, il ajoute : « Si ce déplacement eût été de nature à procurer des avantages très supérieurs à l'économie faite sur le transport, *dans bien des cas, sinon dans tous*, il n'eût pas attendu cette économie pour se produire. »

Si, des mots imprimés en italiques, on ne conservait que les quatre premiers, nous accepterions à la rigueur, cette proposition, qui n'aurait alors qu'une minime importance. Mais il y a loin de leur signification à celle des trois mots qui les suivent et qui, seuls, donnent à la phrase la portée que son auteur lui attribue. Ce sont eux, en effet, qu'il faut conserver pour être conduit à nier presque absolument l'importance des avantages indirects des chemins de fer. Or, s'il y a quelque chose de vrai dans les considérations que nous avons exposées au chapitre V, cette proposition est erronée parce qu'elle suppose nécessairement :

1° Que les intéressés, desquels dépend l'exécution des transports, se rendent parfaitement compte de toutes les conséquences qu'ils auraient pour eux;

2° Qu'aucune cause, aucune inertie, ne les empêche de faire tout ce qu'ils savent favorable à leurs intérêts;

3° Que les transports ne procurent d'avantages qu'à ceux dont dépend leur exécution.

48. *Effets de l'ignorance des intéressés aux transports.* — Notre opinion sur ces trois points a déjà été exposée, lorsque nous avons expliqué l'importance du trafic que les embranchements apportent aux grands réseaux; nous devons y revenir parce qu'elle sert de base à la démonstration de l'importance des avantages indirects des chemins de fer.

Plus d'un lecteur a sans doute été surpris que nous contestions au public la parfaite intelligence de ses intérêts, et peut-être, en effet, se rend-on généralement bien compte, *après coup*, des avantages qu'on a retirés d'un transport réellement effectué. Mais, pour se décider à faire un transport, ce n'est pas après, c'est avant qu'il faut en comprendre l'importance, et nous pensons que les populations éloignées des voies ferrées n'ont aucune idée de la plupart des transports qu'elles pourraient faire, des échanges qui leur seraient avantageux et des voyages dont elles tireraient profit. Cette ignorance vient de ce qu'elles ne connaissent bien ni les conquêtes de la science, ni les progrès de l'industrie, ni la nature et les ressources des contrées lointaines. Certes le voisinage d'un chemin de fer n'a pas le pouvoir magique de dissiper cette ignorance comme par enchantement, mais il contribue puissamment à la combattre; nous l'avons expliqué au paragraphe 37.

49. *Inertie des intéressés.* — Nous avons dit aussi

comment les chemins de fer luttent contre le second obstacle qui s'oppose aux transports : l'inertie. Peut-être n'en a-t-on pas encore mesuré toute la puissance. On se rend bien compte qu'elle agit fortement sur les individus, surtout sur les habitants indolents des campagnes ; mais il semble qu'elle a peu d'action sur les hommes éclairés et, qu'en tout cas, elle n'a presque aucune prise sur les grandes sociétés industrielles qui n'ont qu'une raison d'être, qu'un but : la réalisation des bénéfices, et dont le personnel dirigeant est recruté, par sélection, parmi les hommes les plus intelligents et les mieux doués d'initiative. Eh bien, même là, l'intelligence imparfaite des intérêts et l'inertie produisent encore des effets dignes d'attention. Les exemples abondent, nous n'en citerons qu'un qui nous est bien connu.

A une époque déjà lointaine, il s'est formé dans la Loire des centres importants de production sidérurgique qui, pendant longtemps, ont prospéré et ont pris un grand développement. Mais les gisements de minerais voisins se sont graduellement épuisés et la nouvelle métallurgie de l'acier a exigé des matières premières plus pures qu'on a dû faire venir de l'île d'Elbe ou d'Algérie, au prix de dépenses énormes de transport. Dès 1871, il devenait évident que si les usines de la Loire pouvaient continuer à prospérer en se consacrant à la fabrication des produits ouvrés et de grande valeur, pour lesquels l'habileté de leur population ouvrière leur assurait un incontestable avantage, elles n'étaient pas à même de produire, dans de bonnes conditions, les rails d'acier et, en général, tous les métaux dont le coût du minerai représente une fraction très importante de la valeur totale.

Dès 1871, les sociétés métallurgiques de la Loire auraient eu avantage à transporter ailleurs leurs fabrications de ce genre; elles y auraient trouvé un bénéfice net considérable, même en tenant largement compte de

l'intérêt et de l'amortissement rapide des dépenses nécessaires à de nouvelles installations. Et cependant ce n'est que bien longtemps après, de 1880 à 1885, qu'elles ont pris courageusement leur parti et ont supprimé ou transporté ailleurs les fabrications qui n'étaient plus à leur place dans la Loire.

Cet exemple ne se rapporte pas directement aux transports, mais cela importe peu, car il suffit de montrer, d'une manière générale, les effets de l'inertie morale, pour avoir le droit d'en tenir compte dans tous les cas.

Si la méconnaissance de leurs véritables intérêts et l'inertie produisent de tels effets sur les sociétés industrielles que dirigent des hommes choisis dans l'élite intellectuelle du pays et assistés de conseils compétents, n'est-il pas évident que ces deux infirmités de l'esprit humain exercent, sur les actes des individus isolés, une influence dont l'importance est considérable, et que c'est les méconnaître singulièrement que d'en limiter l'effet à des cas *exceptionnels?* Nous n'en citerons plus qu'un exemple que nous choisissons parce qu'il s'applique presque à la majorité des Français. On sait combien la plupart des agriculteurs sont loin de mettre à profit les découvertes des sciences et les ressources que leur offrent, pour amender et engraisser leurs terres, les richesses du sol et les déchets de l'industrie? Alors même que les chemins de fer ne contribueraient que dans une mesure modeste à hâter le progrès, en luttant contre l'ignorance et l'inertie des agriculteurs, cela suffirait pour ajouter un service énorme à ceux qu'ils rendent directement à la société par les économies de transport.

50. *Effets constatés de l'ignorance et de l'inertie.* — Il suffit de regarder en soi et en dehors de soi pour reconnaître combien on se trompe en admettant que l'homme se rend parfaitement compte de ses intérêts et fait tout

ce qu'ils lui commandent. Mais ces considérations comportent un certain vague et ne peuvent donner la mesure de l'erreur que l'on commet ainsi. On peut faire un pas de plus vers la vérité.

Suivant que l'homme serait, ou non, une volonté parfaitement soumise à une intelligence souveraine, bien des choses se passeraient d'une manière fort différente. Si donc, parmi les faits qui en dépendent, on choisit ceux qui peuvent être observés exactement, l'écart qui sépare la réalité des conséquences qu'entraînerait forcément la perfection humaine à ce point de vue, donnera la mesure de l'infirmité intellectuelle de l'homme dans le domaine de ses intérêts matériels.

Or, si l'homme faisait tout ce que réclament ses intérêts bien compris, l'effet des embranchements serait tel que M. Colson, partant de cette hypothèse, estime qu'il est réellement. Les économies minimes que les petites lignes permettent de réaliser par rapport au coût du transport par terre, ne pourraient influer que sur les voyages d'importance minime aussi, de coût minime et, par suite, il n'en résulterait d'augmentation que pour les transports à petite distance. Or les faits démontrent que les embranchements provoquent très efficacement aussi les transports à grande distance.

Si l'homme faisait tout ce que réclament ses intérêts bien compris, les embranchements ne procureraient aux grands réseaux que de médiocres augmentations de recettes ; M. Colson l'a rigoureusement prouvé. Or, les faits démontrent qu'ils leur en donnent de considérables.

Si l'homme faisait tout ce que réclament ses intérêts bien compris, une légère augmentation de distance aux stations qui influe à peine sur le coût du voyage ou du camionnage jusqu'à elles, ne diminuerait pas sensiblement le trafic. Or, il est établi, qu'en général, le trafic diminue dans une mesure surprenante quand la distance aux stations augmente de 1 ou 2 kilomètres seulement et qu'il n'a plus qu'une importance très faible lorsque cette distance atteint 5, 6 ou 10 kilomètres, au plus.

Les faits constatés au sujet des parcours moyens, des recettes apportées aux grandes lignes par les embranchements et de l'influence exercée sur le trafic par la distance aux stations, diffèrent donc, non pas légèrement, mais considérablement de ce qui aurait lieu si l'homme se rendait compte de tous les avantages que lui procureraient les transports qu'il lui est loisible d'effectuer et s'il réglait exactement sa conduite sur son intérêt. Il faut en conclure que l'homme est, en moyenne, fort éloigné de cet idéal d'intelligence et de volonté, et, par suite, que l'on arrive forcément à des conclusions très erronées, au sujet des avantages indirects des chemins de fer, lorsqu'on part de l'hypothèse contraire qui est la base de toute l'argumentation de M. Colson (*).

51. *Avantages indirects proprement dits.* — En se

(*) Qu'on nous permette ici une rapide digression qui fera apercevoir les conséquences qu'ont, à d'autres égards, les idées que l'on se forme de l'humanité au point de vue qui nous occupe.

Si l'on pense que l'homme comprend parfaitement son intérêt et fait tout ce qu'il lui commande, on est conduit à admettre le laisser-faire, laisser-passer le plus absolu en économie politique ou, tout au moins, à n'en sacrifier la moindre parcelle qu'aux nécessités de la défense nationale. Logiquement on doit aussi limiter les devoirs de la société envers l'individu à la protection de ses droits contre les entreprises d'autrui et à l'exécution des services publics, qui ne peuvent être assurés ni par les particuliers, ni par les associations privées. Cette notion très simple de la société est fort séduisante, mais l'expérience de chaque jour démontre son insuffisance.

L'aveuglement de l'intérêt personnel empêche souvent de distinguer la ligne de conduite qu'il convient de suivre à l'époque où l'on vit et de reconnaître les leçons que donnent les faits contemporains, mais personne ne conteste, croyons-nous, qu'à des époques plus ou moins reculées, des souverains ou des ministres

reportant aux citations textuelles que nous avons faites au paragraphe 46, on verra que, suivant M. Colson, les chemins de fer ne produisent pas d'autres avantages que les économies qu'ils permettent de réaliser, parce que, s'il en était autrement, les transports qu'ils font, n'auraient pas attendu ces économies pour se produire. Nous croyons avoir réfuté cet argument ; mais, dans notre réponse, nous n'avons été conduit à nous occuper que des avantages qui profitent à ceux dont dépend l'exécution du transport, car ce sont évidemment les seuls qui puissent provoquer cette exécution, chacun ne se préoccupant que de ses propres intérêts.

L'argument que M. Colson oppose, d'une manière générale, à l'existence des avantages indirects, ne prouverait donc rien contre la réalité des avantages procurés à des tiers, alors même qu'en soi, il serait parfaitement exact. En ce qui concerne ces avantages qui méritent, au premier chef, la qualification d'indirects, nous sommes donc en présence d'une simple négation, sans aucun commencement de preuve. Nous n'en croyons pas moins néces-

éclairés aient rendus de signalés services au pays en allant chercher au loin et en protégeant des hommes capables de créer de nouvelles industries.

A un autre point de vue, on ne saurait méconnaître les services que rendent les encouragements à l'épargne, à la prévoyance, les comices agricoles, les expositions, etc., c'est-à-dire les moyens variés que l'on emploie pour combattre l'ignorance et l'inertie humaines.

Or tout cela est inconciliable avec l'hypothèse de la perfection de l'homme au point de vue des intérêts matériels.

On voit qu'il y a une connexion intime entre les opinions que l'on doit logiquement se former sur des sujets bien différents, et quoique cela puisse, au premier abord, sembler paradoxal, nous pensons que l'on ne peut nier que les transports rendent aux intéressés des services qu'ils n'avaient pas prévus ou dont ils n'avaient pas tenu compte, sans nier aussi l'opportunité de tout encouragement, de toute protection, de toute réserve au laisser-faire, laisser-passer le plus absolu.

saire d'apporter de nouveaux arguments à l'appui de notre opinion, bien qu'elle soit une conséquence forcée de l'idée généralement admise que, par suite du jeu des lois économiques, nul ne peut accomplir un échange qui lui procure un bénéfice légitime, sans qu'il en résulte des avantages pour d'autres membres de la société. Il y a là une grande loi de solidarité humaine que nous ne tenterons pas de démontrer dans sa généralité, mais dont il est facile d'apercevoir le jeu dans le cas particulier des transports.

Un nouvel embranchement est-il livré à l'exploitation, il se crée immédiatement un mouvement beaucoup plus intense des populations rurales qu'il dessert vers les centres d'attraction voisins ; ce sont les hommes les plus intelligents, les plus entreprenants qui voyagent le plus et qui vont le plus loin. Les bénéfices qu'ils en retirent personnellement, rentrent dans la catégorie des avantages directs, reconnus ou méconnus ; mais ce n'est point là le seul résultat de leur voyage. Les ignorants, les timides, les inertes, s'aperçoivent des bénéfices que d'autres ont retirés des transports ; ils profitent, plus ou moins, des lumières acquises par leurs voisins sur les progrès de la science et de l'industrie, sur les ressources des centres de production éloignés et sur les marchés où se consomment les produits de la région. Peu à peu, l'exemple produit son effet habituel de contagion et le mouvement en avant se propage.

Peut-on nier que, parmi les voyages que provoque un nouvel embranchement, certains produisent ainsi, pour d'autres que ceux qui les font, des avantages hors de proportion avec la misérable économie de quelques centimes qui est réalisée sur le transport à 10, 15 ou 20 kilomètres ?

En ce qui concerne le trafic des marchandises, le mécanisme de la solidarité humaine est moins simple,

mais il produit des effets aussi incontestables. Par suite des transports qu'ils provoquent, les embranchements apportent de nouvelles marchandises sur les marchés de consommation, ils augmentent l'offre et, par suite, provoquent des abaissements de prix qui finalement déterminent une augmentation de la consommation.

Pour qu'on consomme plus, il faut, de toute nécessité, que l'augmentation de production dans les régions qui viennent d'acquérir de nouveaux débouchés, l'emporte sur le ralentissement d'activité de celles qui avaient auparavant le monopole de l'approvisionnement des marchés envahis. Il y a donc forcément une augmentation définitive de la production des marchandises que transportent des embranchements quelconques.

Or, toute production a des répercussions sans nombre. S'il s'agit d'un produit fini, par exemple, d'une machine agricole dont le chemin de fer a provoqué l'achat et la fabrication, qui ne voit combien de capitaux et d'ouvriers ont concouru à la produire, depuis les mineurs qui extraient la houille et les minerais nécessaires pour donner le fer des axes, le bronze des coussinets et le minium de la peinture, jusqu'aux ajusteurs qui terminent la machine? S'ils ont plus de travail, ils ont plus de bénéfices.

52. *Effets des déplacements des capitaux et de la main-d'œuvre.* — M. Colson fera peut-être une objection contenue en germe dans un passage de son étude que nous avons cité. Sans aucun doute, il reconnaît que les embranchements augmentent la consommation et, par suite, la production des marchandises qu'ils transportent; mais, dit-il, tout cela « n'est que déplacement de capitaux et de main-d'œuvre, et ce déplacement s'opère dans des conditions de rémunération ne différant pas très notablement des conditions antérieures ».

Pour qu'il en fût ainsi, il faudrait que ces déplacements

ne modifiassent pas la proportion de l'offre et de la demande pour la main-d'œuvre et pour le capital, c'est-à-dire que l'augmentation de consommation de certains produits fût compensée par d'égales diminutions pour d'autres, ce qui nous semble impossible à soutenir. Nous avons vu, en effet, que pour toute marchandise que transporte un nouvel embranchement, il y a augmentation définitive de consommation, et il n'est guère de matières qui échappent aux transports par chemins de fer. Assurément il y a certains produits que les facilités d'échange font remplacer par d'autres, mais si le consommateur modifie ses habitudes c'est qu'il y trouve un avantage définitif au point de vue de la dépense ou d'une satisfaction plus complète de ses besoins.

En insistant sur ce point, nous démontrerions une chose évidente, et il est universellement reconnu qu'après balance des gains et des pertes, les chemins de fer de toute catégorie contribuent à provoquer une augmentation définitive de la production humaine et, par suite, de la demande de main-d'œuvre et de capitaux.

Comme personne ne conteste qu'en augmentant la demande, on augmente la rémunération du service demandé, on doit conclure de ce qui précède que toute ouverture d'un nouvel embranchement a pour effet d'augmenter les salaires et le revenu du capital sur tous les points du globe où l'on coopère, d'une manière quelconque, à la production médiate ou immédiate des marchandises qu'il transporte.

53. *Les chemins de fer créent de la richesse.* — On remarquera que, dans la démonstration que nous venons de donner de la réalité des avantages indirects produits par tout transport, nous avons provisoirement admis, avec M. Colson, que les chemins de fer déplacent simplement les capitaux et la main-d'œuvre, mais c'est là

une hypothèse inexacte, et nous allons voir combien, en la rectifiant, on ajoute de force à nos conclusions.

Chacun sait qu'il y a actuellement, en Europe, une énorme quantité de main-d'œuvre disponible. Non seulement un grand nombre de patrons sont contraints d'imposer aux ouvriers qu'ils emploient, une limite de travail, mais, à chaque pas, dans les villes et les campagnes, on rencontre des hommes qui désirent travailler et qui ne trouvent pas d'emploi. Pour s'excuser de leur refuser des secours, on prétend parfois que s'ils ne travaillent pas, c'est qu'ils ne le veulent point. Il est vrai que tout bon ouvrier qui veut énergiquement travailler à un prix quelconque, finit par y réussir; mais il est non moins vrai que si tous les inemployés prenaient à la fois cette résolution, il n'y en aurait qu'un bien petit nombre qui trouveraient du travail. Depuis qu'on a terminé les grandes lignes de chemins de fer et la transformation des usines que l'emploi de la vapeur a nécessitée, il y a rupture d'équilibre entre la production et la consommation, et on constate, d'une part, pour la main-d'œuvre, l'insuffisance de travail que nous venons d'indiquer; d'autre part, pour les capitaux que l'économie accumule sans cesse, une difficulté d'emploi qui produit leur exode partiel et l'avilissement du revenu de ceux qui restent en France.

Si une cause quelconque venait à augmenter la consommation, c'est-à-dire la demande des produits de tout genre, cette situation fâcheuse serait profondément modifiée. Une plus grande fraction de la main-d'œuvre trouverait un emploi, *des machines humaines qui actuellement s'usent et dépensent sans effet utile, concourraient à la production nationale et une somme considérable de travail et, par suite, d'utilité serait ainsi faite de rien, c'est-à-dire créée, au vrai sens du mot.*

A quelle somme peut-on estimer la valeur de l'accroissement de travail que la population de la France pourrait

fournir, ou, si l'on veut s'en tenir à des faits concrets, quelle est la différence de valeur du travail que produisent les Français dans les époques de crise et dans celles de prospérité? Nous ne chercherons pas à l'apprécier, mais nous croyons que ce n'est pas par millions, mais par centaines de millions, et sans doute par milliards qu'il faut la chiffrer.

Il va de soi que l'augmentation de la consommation produirait des effets de création analogues, en ce qui concerne les capitaux. Rallumer des hauts fourneaux, remettre en mouvement des machines inoccupées qui se détérioraient sans produire, c'est créer une utilité égale à l'excès de la valeur de leur production sur l'augmentation de dépenses qu'elle entraîne. Retenir en France des capitaux qui iraient s'employer au loin, ce n'est plus créer, il est vrai, mais c'est conserver au pays les avantages indirects que produit leur emploi, en sus du revenu que touchent leurs propriétaires.

Ce n'est point tout encore. On sait que, tout en subissant d'autres influences, l'accroissement de la population est intimement lié à la prospérité du pays. Si l'ouvrier et même le bourgeois savent que tout enfant qui leur naîtra, trouvera sa place dans la ruche humaine et deviendra pour lui, au sortir de l'enfance, une richesse au lieu d'être une charge, il y aura augmentation des naissances, et, par suite, accroissement de valeur du capital par excellence, du capital humain.

Ainsi donc l'augmentation de la consommation et de production, résultant de l'exploitation de tout chemin de fer assure une meilleure rémunération aux capitaux et à la main-d'œuvre déjà employés, fait produire du travail et, par conséquent, de l'utilité aux capitaux et à la main-d'œuvre inoccupés et provoque l'accroissement du capital humain.

54. *D'où vient la richesse ainsi créée?* — Il est naturel

de se demander si ces avantages dont bénéficient tous les producteurs sauf de rares victimes du progrès, n'ont pas ailleurs leur contre-partie. Mais on la chercherait vainement du côté des consommateurs, puisque c'est précisément la baisse des prix, dont ils profitent, qui est la cause de l'augmentation de consommation et, par suite, de tous les avantages que nous venons de signaler.

On constate donc ce fait surprenant au premier abord, que les producteurs, les consommateurs et les tiers recueillent, à la fois, le bénéfice des transports.

Comment se peut-il faire qu'il en soit ainsi et d'où viennent ces avantages qui se déversent, à la fois, sur tous ? Nous l'avons déjà expliqué dans notre premier mémoire ; si des intérêts, habituellement antagonistes, peuvent recevoir ainsi une satisfaction simultanée, c'est parce que le bon marché des transports et, plus encore peut-être, la diffusion des lumières produite par un échange plus actif des connaissances et des idées conduisent l'humanité à puiser beaucoup plus largement à celles des sources d'utilité que la nature a faites abondantes et faciles à exploiter à peu de frais, et font abandonner celles qui ne peuvent donner que de maigres produits en échange d'un rude labeur.

Telle est la nature des avantages qui méritent réellement la qualification d'indirects, et nous ne voyons pas comment on peut penser, avec M. Colson, qu'ils ne font qu'un avec les économies directes de transport et que, suivant son expression, c'est commettre une véritable confusion que de les considérer comme s'ajoutant à ces économies. Ils sont, en effet, créés de rien et profitent à des membres de la société qui ne sont ni les expéditeurs, ni les destinataires du transport et dont la plupart en sont si éloignés qu'ils ne les connaîtront jamais.

55. *Définition des divers avantages produits par les*

chemins de fer. — L'étude des avantages produits par les chemins de fer nous conduit, en somme, à distinguer :

1° *Les bénéfices d'exploitation* qui profitent au propriétaire de la ligne ;

2° Les économies que les tarifs de chemins de fer permettent de réaliser par rapport aux valeurs des transports mesurées par les prix maxima dont les intéressés consentent à les payer. Ce sont les *économies de transport directes et reconnues ;*

3° Les avantages que les transports procurent aussi à ceux dont dépend l'exécution des transports, mais dont, par ignorance ou inertie, ils ne tiennent pas compte dans la fixation des prix maxima qu'ils consentiraient à payer. On peut les appeler *avantages directs et méconnus ;*

4° Les avantages dont bénéficient des membres de la Société autres que ceux dont dépend l'exécution des transports. Ce sont les *avantages indirects* proprement dits.

Après avoir ainsi précisé les résultats de l'analyse que nous avons faite dans notre premier mémoire, nous allons rechercher comment ils s'accordent avec les effets constatés des chemins de fer existants.

56. *Utilité totale des grandes lignes.* — Ce serait faire une œuvre vaine que de démontrer, à l'aide des considérations précédentes, l'utilité des grandes lignes qui éclate à tous les yeux ; mais il est utile de faire l'inverse, c'est-à-dire de prendre comme pierre de touche des thèses en présence, leur accord plus ou moins parfait avec les résultats constatés des grands réseaux.

On a vu que, d'après M. Colson, les avantages produits par les chemins de fer se réduisent presque aux bénéfices d'exploitation et aux économies de transport, et l'on sait que les bénéfices d'exploitation des grands réseaux ne représentent pas 4 p. 100 des dépenses de

premier établissement, c'est-à-dire moins que n'ont produit, en moyenne, les capitaux placés en France et à l'étranger depuis l'origine des chemins de fer.

Si l'utilité des voies ferrées n'était réellement formée que de ces deux éléments, elle ne surpasserait donc celle des placements les moins avantageux pour le pays, par exemple de ceux qui sont faits à l'étranger, que de la valeur des économies de transport. Or nous croyons avoir démontré que cette valeur ne peut pas excéder sensiblement la moitié de la recette brute, c'est-à-dire 600 millions par an ; soit, au plus, 1/40 de la production nationale. On n'arriverait guère qu'au 1/20 si, contrairement à ce que nous croyons établi, on acceptait, pour ces économies, l'évaluation de notre contradicteur.

Peut-on vraiment admettre qu'une cause de si faible importance ait produit les résultats considérables qui frappent les yeux?

L'opinion générale attribue aux chemins de fer une très large part dans le développement étonnant de prospérité qui s'est produit depuis qu'on a commencé à les construire; elle admettra difficilement que leur effet se mesure par un chiffre si modeste, car c'est relativement bien peu de chose qu'une plus-value de 1/40 ou même de 1/20 dans la production nationale. Des écarts beaucoup plus importants se produisent d'une année à l'autre, par suite des variations qu'éprouvent la valeur des récoltes et l'activité de l'industrie et du commerce, même en dehors des grandes crises.

Dans notre premier mémoire, nous avons recherché quelle valeur il faut assigner aux avantages produits par les chemins de fer pour expliquer leurs effets et, dans ce but, nous avons admis, d'après M. Picard, que l'on pouvait attribuer à ces voies de communication le tiers, au moins, de l'augmentation qui s'est produite, depuis trente ans, dans la valeur de la production nationale.

Par des déductions que nous ne voulons pas répéter ici, on déduit logiquement de cette hypothèse que l'on peut évaluer au triple de la recette brute la valeur des avantages de tout genre que les grands réseaux procurent au pays, en sus des bénéfices nets d'exploitation.

Cette appréciation vaut ce que vaut l'hypothèse de M. Picard, dont elle est la conséquence forcée et dont il est impossible de démontrer péremptoirement la justesse ou l'erreur. Sans lui attribuer une valeur absolue qu'elle ne saurait avoir, nous sommes d'autant plus porté à la croire modérée qu'elle est inférieure aux évaluations de MM. de Freycinet et Krantz et concorde complètement avec celle de M. Varroy.

D'après M. Colson, l'utilité totale des grandes lignes serait deux à trois fois moindre que nous ne l'admettons avec ces divers auteurs. Le désaccord entre nous est donc considérable sur ce point; il l'est plus encore au sujet des petits embranchements dont l'étude est le but principal de notre travail. Nous allons le préciser.

57. *Utilité des petits embranchements.* — On l'a vu, M. Colson pense qu'en dehors du bénéfice net d'exploitation, les chemins de fer ne produisent guère que des économies de transport qui profitent directement à l'expéditeur ou au destinataire, qui influent sur sa décision et que, pour préciser, nous avons appelées économies directes et reconnues; il estime d'ailleurs et a voulu démontrer que les économies réalisées sur de faibles parcours sont peu importantes et, de ces deux propositions, il a tiré logiquement la conclusion que les embranchements ne peuvent pas rendre de grands services au public.

On sait déjà que les deux prémisses de ce raisonnement nous semblent inexactes. A notre avis, les chemins de fer, grands ou petits, produisent des avantages absolument distincts des économies de transport et plus

importants qu'elles et, d'autre part, si la brièveté des parcours réduit les économies que les embranchements permettent de réaliser, elle réduit aussi les recettes qu'ils encaissent et, pour que le rapport des économies directes aux recettes soit aussi élevé pour un embranchement que pour une grande ligne, il suffit que le rapport des tarifs soit égal au rapport des prix de revient partiels de transport, ce qui se produira dès que les lignes d'intérêt local seront régies par des conventions rationnelles; nous l'avons démontré.

Pour ces deux raisons, nous avons soutenu une thèse bien éloignée de celle de M. Colson et, dans notre premier mémoire, nous avons admis 2,5 pour rapport moyen de l'utilité totale des chemins de fer d'intérêt local à leur recette, le chiffre correspondant étant de 3,0 pour les grands réseaux. L'opinion si différente, exprimée par M. Colson, nous a amené à faire une étude complémentaire, dont nous allons indiquer le résultat.

Nous continuerons à employer des chiffres, parce que, même dans les questions où ils ne peuvent prétendre à la certitude, ils donnent le seul moyen que nous connaissions de préciser la pensée et rendent possible une critique vraiment profitable. Comment, en effet, sans chiffres, qualifiera-t-on l'utilité d'un transport? On pourra dire qu'elle est faible, médiocre, grande ou énorme; mais ces mots vagues n'ont pas exactement le même sens pour tous les lecteurs et ne permettent pas de formuler des conclusions pratiques.

Il est, d'ailleurs, bien entendu que les chiffres que nous indiquerons, ne prétendent nullement à l'absolu et représentent, en quelque sorte, le centre de gravité des valeurs probables, le point qui nous semble avoir autant de chances de pécher par excès que par défaut.

Ces réserves faites, nous allons rechercher de quels éléments se compose, d'une part, le trafic des embranchements, d'autre part, celui des grandes lignes, et nous étudierons l'utilité de ces divers éléments.

58. *Nature du trafic des grandes et des petites lignes.* — Une population située hors de la zone de puissante attraction des grandes lignes leur fournit cependant un certain trafic par l'intermédiaire des voies de terre. Elle importe ainsi les objets de première nécessité et échange, dans les deux sens, les marchandises ayant assez d'utilité ou de valeur pour que la dépense et les incommodités du camionnage n'en empêchent pas le transport. Nous avons vu que le trafic que donnent ainsi aux chemins de fer les populations qui en sont éloignées, n'est qu'une très faible fraction de celui qu'elles leur fourniraient si elles étaient convenablement desservies. Pour les régions dont la distance aux grandes lignes motive la construction d'embranchements, il est constant qu'on ne peut pas évaluer cette fraction à plus de 1/10, en moyenne, ce chiffre étant un peu fort pour les voyageurs et un peu faible pour les marchandises. Nous désignerons par A la nature de ce trafic qui se fait malgré la distance.

Si l'on construit un embranchement qui desserve bien les régions en question, il aura un premier effet : il amènera à la grande ligne la plus grande partie du trafic A, pour laquelle il procurera au public une économie égale à la différence des dépenses par la voie nouvelle et par la voie de terre. Bien que cette économie ne soit pas sans importance, nous la négligerons en présence d'avantages de plus grande valeur.

Le second effet de l'embranchement sera de donner au trafic de la région qu'il desservira l'activité totale que peut développer le voisinage des chemins de fer, c'est-à-dire de créer un nouveau trafic B qui n'existait pas auparavant et qui forme les 9/10 du trafic possible, puisque le trafic préexistant A n'en était que le 1/10.

Telle est la composition du trafic qui emprunte les embranchements.

Voyons maintenant quelle est la nature du trafic qui fréquente les grandes lignes.

En premier lieu, elles desservent le trafic total des nombreuses et importantes localités groupées près de leurs stations, dans leurs zones de puissante attraction, et ce trafic total peut se décomposer en deux parties.

Les régions qui ont la bonne fortune d'être traversées par les grandes lignes, ne sont pas d'une autre essence que celles dont nous parlions tout à l'heure ; elles n'en diffèrent que par l'importance de leur richesse et des agglomérations de population qu'elles renferment. Leur trafic possible se compose donc aussi de deux parties dont l'une se ferait malgré la distance aux stations, tandis que l'autre doit sa naissance à leur voisinage. Ces deux sortes de trafic sont de nature identique aux trafics A et B donnés par les régions que desservent les embranchements.

Quelle est, pour les régions desservies par les grandes lignes, le rapport des trafics A et B? On le sait par les résultats que donnaient, avant d'être traversées par des chemins de fer, certaines de ces régions, et c'est aussi bien pour elles que pour les contrées moins riches que le trafic A, capable de naître malgré la distance, ne dépasse pas, en moyenne, le dixième du trafic qui se produit dans le voisinage des stations.

Telle est la composition du trafic que les grandes lignes transportent pour les zones qu'elles desservent très efficacement; mais elles jouent encore un autre rôle. Les régions éloignées leur envoient, par voie de terre, leurs transports les plus utiles, ceux qui sont de la nature A, et augmentent ainsi, dans le trafic total, la proportion de celui qui est de première utilité. Peut-on

admettre qu'elles le doublent et en élèvent, par suite, la proportion du 1/10 au 1/5 du total? Assurément non, car les régions éloignées dont il s'agit, sont beaucoup moins importantes, moins peuplées que la zone voisine des grandes lignes et fournissent, par conséquent, beaucoup moins de trafic de toute nature. Néanmoins, pour prévenir les objections, nous concéderons qu'elles doublent la fraction A du trafic de grands réseaux et nous admettrons, par suite, que les 4/5 seulement du trafic des grandes lignes soient de même nature que le trafic B créé par les embranchements et que 1/5 soit formé de transports de nature A, assez utiles pour se produire malgré la distance aux stations.

La comparaison de l'utilité des grandes lignes et des embranchements est ainsi ramenée à celle de l'utilité du trafic A qui se produit à des distances de 15, 20, 30 kilomètres des chemins de fer et du trafic B qui ne se développe que dans leur voisinage.

La seconde comparaison est aussi difficile que la première, et cependant nous croyons avoir fait un pas vers le but en ramenant l'une à l'autre, parce que l'erreur que nous pourrons commettre, ne portant que sur 1/5 du total, son influence sur la conclusion finale sera divisée par 5.

La fraction du trafic des grandes lignes qui est de la nature A, peut, à son tour, être décomposée en deux parties. Parmi les voyages et les transports dont elle est formée, il y en a de tellement utiles que si les chemins de fer n'existaient pas, ils se feraient par voie de terre, comme il y a 50 ans. On ne peut évaluer exactement le quantum de ces transports, mais on acquiert la conviction qu'il est grand lorsqu'on remarque que le tonnage transporté sur les routes nationales en 1851, époque du premier recensement de la circulation, était égal au 1/7 du tonnage que transportent actuellement tous les che-

mins de fer français, et était ainsi très voisin de la fraction de ce tonnage qui est de la nature A, fraction que nous avons évaluée au 1/5 du total.

Par suite du progrès naturel de la richesse générale, les transports sur routes dépasseraient actuellement ce chiffre de beaucoup, si les chemins de fer n'existaient pas, et ils seraient, en partie, consacrés à échanger, entre les différentes régions, les objets de première nécessité : marchandises précieuses, vêtements, épiceries, boissons de prix, porcelaines, cristaux, métaux chers, etc.

La fraction A du trafic des grandes lignes comprend évidemment toutes ces marchandises qui, à défaut de chemins de fer, s'échangeraient par voie de terre, et pour lesquelles, par suite, la voie ferrée ne produit qu'un seul avantage : l'économie de transport proprement dite, différence entre le coût du camionnage qu'on peut évaluer à $0^f,25$, en moyenne, et les tarifs de chemins de fer qui, en moyenne aussi, sont de $0^f,10$ pour les marchandises de cette nature.

On ne peut donc pas évaluer à plus de $0^f,25 - 0,10 = 0^f,15$ par tonne, l'avantage total que les chemins de fer procurent au public par le transport des matières de première utilité qu'on transporterait, en tous cas, par voie de terre. C'est une fois et demie la recette, c'est-à-dire deux fois moins que la valeur moyenne que, d'accord avec la plupart des auteurs, nous avons assignée à l'utilité des transports des grands réseaux.

Nous arrivons donc à constater ce fait que, parmi les transports A des marchandises de première utilité que font les chemins de fer, il y a une importante fraction qui ne rend au pays que des services très modestes. Ce n'est que le surplus des transports A qui sont vraiment plus utiles que les transports effectués par les embranchements. Quel est le quantum de ce surplus? Il est

évidemment impossible de le préciser. Supposons cependant qu'il forme les 3/4 des transports A, ce qui semble un maximum, et voyons ce qui en résulterait.

Les transports A formant le 1/5 du trafic total des grandes lignes, leurs 3/4 seraient le 1/7 environ du trafic. L'hypothèse que nous venons de faire, conduirait donc finalement à penser que le trafic des grandes lignes comprend 6/7 qui ne sont pas plus utiles que le trafic B créé par les embranchements et 1/7 qui présente une plus grande utilité.

Soit x le rapport de l'utilité de ces deux sortes de trafic A et B, le rapport de l'utilité du trafic des grands réseaux à l'utilité du trafic créé par les embranchements serait :

$$\frac{x}{7} + \frac{6}{7} = \frac{x+6}{7},$$

et on voit immédiatement qu'il faudrait que x eût une valeur très élevée pour que $\frac{x+6}{7}$ s'éloignât beaucoup de l'unité.

Pour que l'expression $\frac{x+6}{7}$ eût la valeur 1,5, il faudrait que x fût égal à 4,5, c'est-à-dire que les transports qui se font malgré l'éloignement des stations, fussent 4 fois et demie plus utiles que les transports créés par les embranchements. Cette hypothèse nous semble favorable au trafic A, au point d'être presque inadmissible; nous l'accepterons néanmoins et nous admettrons, par conséquent, 1,5 comme maximum du rapport de l'utilité du trafic des grandes lignes à l'utilité du trafic *créé* par les embranchements.

Le rapport de l'utilité des chemins de fer à la recette du trafic qu'ils créent, ayant été évalué plus haut à 3 pour les grandes lignes, nous devons donc admettre

finalement qu'il est égal à $\frac{3}{1,5} = 2$, au moins, pour les embranchements et les lignes d'intérêt local.

59. *Conclusion relative aux petites lignes.* — Dans notre premier mémoire, nous avions admis 2,5, au lieu de 2, pour le rapport de l'utilité des petites lignes à la recette du trafic qu'elles créent. L'adoption d'un chiffre plus faible nous force à rectifier le tableau inséré au paragraphe 57 de ce travail, dans lequel nous avons calculé l'utilité totale que produiraient des embranchements donnant diverses recettes et placés dans des conditions moyennes, au point de vue des avantages procurés au public et aux grands réseaux.

Soit R la recette kilométrique d'un tel embranchement, nous avons dit, dans notre premier mémoire, qu'*en moyenne*, ses frais réels d'exploitation par kilomètre sont voisins de $1.000^f + \frac{R}{2}$ et que, par suite, le bénéfice ou la perte annuelle qu'il donne, est égal à

$$R - \left(1.000^f + \frac{R}{2}\right) = \frac{R}{2} - 1.000^f.$$

Ailleurs nous avons démontré qu'*en moyenne*, un tel embranchement donnerait aux grands réseaux des augmentations de recettes égales à 1,40 R qui, avec un coefficient d'exploitation de 0,50, laisseraient aux grandes compagnies un bénéfice net de 0,70 R.

La recette totale du trafic qu'un embranchement créerait sur des rails quelconques, serait donc, *en moyenne*, de R + 1,40 R = 2,40 R, et l'utilité que les transports correspondants procureraient au public, aurait une valeur égale au double de la recette totale, c'est-à-dire à 4,80 R, d'après les conclusions rectifiées que nous venons de formuler.

L'utilité totale procurée par l'embranchement, tant à

ses exploitants qu'à ceux des grands réseaux et au public qui bénéficie directement ou indirectement des transports, serait donc conforme aux chiffres du tableau suivant, *si la ligne en question était dans des conditions moyennes :*

RECETTE propre de l'embranchement	BÉNÉFICE propre de l'embranchement	BÉNÉFICE d'exploitation des grands réseaux	AVANTAGES procurés au public	UTILITÉ totale de l'embranchement	RAPPORT de son utilité à sa dépense de premier établissement
R	$\frac{R}{2} = 1.000$	0,70 R	4,80 R	6 R = 1.000	
1.000 fr.	— 500 fr.	700 fr.	4.800 fr.	5.000 fr.	10 p. 100
1.500	— 250	1.050	7.200	8.000	16
2.000	0	1.400	9.600	11.000	22
2.500	+ 250	1.750	12.000	14.000	28
3.000	+ 500	2.100	14.400	17.000	34

L'utilité totale inscrite dans la cinquième colonne est la somme des chiffres partiels qui figurent dans les trois colonnes précédentes, et la sixième colonne indique, en taux p. 100, le rapport de cette utilité à la dépense de premier établissement qui a été évaluée au chiffre de 50.000 francs, largement suffisant, en moyenne, pour les lignes d'intérêt local qu'il y a lieu de construire, ainsi que nous l'avons établi dans notre premier mémoire.

Si l'on comparait les chiffres inscrits dans la dernière colonne aux taux ordinaires des revenus des capitaux, on les trouverait assurément excessifs ; mais nous avons fait remarquer, dans notre première étude, que cette comparaison serait illégitime. En effet, on a vu, au paragraphe 51, que, par suite de la solidarité économique des membres de la société, chacun procure involontairement aux autres des avantages indirects, en poursuivant son propre intérêt et il serait facile de démontrer que les capitaux employés dans l'agriculture, le commerce et l'industrie, qui donnent à leurs propriétaires des revenus de 3, 4, 5, 6 p. 100 ou même plus, font bénéficier le public d'avan-

tages, au moins, équivalents. Ce serait abuser du lecteur que d'exposer ici l'étude graphique que, depuis lors, nous avons faite de cette intéressante question.

L'utilité totale des capitaux employés par les particuliers est donc bien supérieure aux taux d'intérêt qu'on est habitué à prendre seuls en considération. Il en est de même, à plus forte raison, des capitaux que l'État consacre à des emplois judicieux d'utilité publique.

Si l'on se place au point de vue exclusivement national, on remarquera qu'il en est tout autrement des placements faits à l'extérieur : c'est aux pays étrangers que profitent tous les avantages indirects qu'ils produisent, et les Français n'en tirent d'autre bénéfice que les arrérages d'intérêt qu'ils reçoivent.

On arrivera donc à des conclusions bien différentes suivant que l'on supposera que les capitaux consacrés à la construction des chemins de fer d'intérêt local seraient prélevés sur ceux qui pourraient être employés en France ou sur les placements à l'étranger. Si l'on adopte la première de ces hypothèses, qui est la moins favorable, on conclura que la construction d'une ligne ne sera vraiment profitable au pays que si son utilité annuelle représente 8, 10, 12 ou 15 p. 100 du capital de premier établissement. En se reportant au tableau précédent, on verra que cette condition serait, en général, très largement remplie par les lignes donnant une recette kilométrique de 1.500 francs.

On ne devrait exiger qu'une recette bien moindre si l'on admettait, au contraire, que les capitaux consacrés à la construction des petites lignes seraient détournés des placements à l'étranger.

60. *Avis de M. Colson.* — Il s'en faut que tel soit l'avis de M. Colson. Il estime que, pour qu'une ligne soit certainement profitable à la collectivité, il faut que

ses recettes soient suffisantes pour couvrir les dépenses d'exploitation et rémunérer, en outre, la part du capital fourni par les concessionnaires, qu'on est généralement d'avis de fixer au 1/4 du capital, soit, en moyenne, à 12.500 francs par kilomètre. Pour remplir ces conditions, il faudrait que la recette s'élevât à 3.000 francs, de manière à dépasser de 500 francs la dépense d'exploitation.

M. Colson exige donc, comme critérium d'utilité, une recette précisément double de celle qui nous paraît suffisante. L'écart n'est pas minime et il a des conséquences pratiques d'autant plus importantes que, parmi les lignes possibles, il y en a peu dont l'on doive attendre, à bref délai, une recette de 3.000 francs par kilomètre, tandis qu'un très grand nombre donneraient immédiatement 1.500 francs.

61. *Avis du Conseil d'État.* — Un fait postérieur à la rédaction de notre premier mémoire augmente la conviction que nous avions de n'avoir point exagéré l'utilité des petites lignes à faible trafic.

Le 21 janvier 1892, le Conseil d'État a adopté un projet de loi sur les chemins de fer d'intérêt local, actuellement soumis au Parlement, qui renferme la phrase suivante :

En aucun cas, les subventions de l'État et du département ou de la commune ne peuvent couvrir les insuffisances d'exploitation au delà de 750 francs par kilomètre.

Cette seule phrase permettrait de conclure que, suivant le Conseil d'État, il peut être utile à l'intérêt général que l'on construise des lignes laissant un déficit d'exploitation de 750 francs par kilomètre, mais il n'est plus permis de douter que telle soit son opinion, après la lecture de l'avis qui accompagne et motive le projet de loi en question. On y lit ce qui suit :

« Considérant qu'en outre, dans l'intérêt des départements comme de l'État, il y a lieu de limiter la portion de la subvention correspondant aux insuffisances de l'exploitation à 750 francs par kilomètre pour les chemins de fer, et à 500 francs pour les tramways, afin d'écarter les concessions de lignes qui constitueraient des charges trop lourdes pour l'État et les départements; **que ces chiffres sont d'ailleurs assez élevés pour permettre d'entreprendre toutes les lignes vraiment utiles.** »

On pourrait supposer que si le Conseil d'État est d'avis de porter jusque-là les charges de l'État, des départements et des communes, ce n'est qu'au début de l'exploitation des nouvelles lignes, pendant les premières années où elles ne donnent pas encore leur produit normal; mais cette interprétation, que rien n'autorise dans le texte du projet, ne saurait être soutenue en présence du passage suivant du même avis :

« Considérant, d'une part, qu'il paraît difficile, dans l'intérêt du crédit des compagnies, d'assigner au concours de l'État une durée moins longue que celle de la concession... »

Le Conseil d'État estime donc qu'il peut être utile de construire des lignes laissant un déficit d'exploitation annuel de 750 francs par kilomètre. Cette opinion se concilie bien avec celle que nous avons exprimée, car les lignes donnant une recette kilométrique de 1.500 francs, dont nous avons indiqué la construction comme généralement utile, ne laissent, à notre avis, qu'un déficit réel de 250 francs par kilomètre si elles sont exploitées économiquement. L'insuffisance totale que doivent couvrir le département et l'État, est formée de ce déficit réel et du bénéfice légitime qui doit rémunérer les peines de l'exploitant; elle ne saurait dépasser 400 à 500 fr.; elle est donc notablement inférieure au chiffre de 750 fr. que le Conseil d'État admet, comme limite, il est vrai, pour l'insuffisance d'exploitation des chemins de fer d'intérêt local.

Il est inutile d'insister pour montrer quelle distance sépare l'opinion de M. Colson de l'avis formulé par le Conseil d'État. L'un exige, comme critérium d'utilité, un bénéfice net d'exploitation de 500 francs, tandis que l'autre admet que l'insuffisance peut atteindre 750 francs. La différence est de 1.250 francs pour le chiffre des bénéfices d'exploitation et elle est nécessairement plus forte encore pour celui des recettes brutes.

On voit que nos idées peuvent être soutenues sans témérité, quelque éloignées qu'elles soient de celles qui ont généralement cours et on jugera, sans doute, que nous sommes resté dans les limites de la plus grande prudence lorsqu'on relira la réserve suivante qui figure dans notre premier mémoire et que nous maintenons entièrement :

... « On doit évidemment commencer par construire les lignes les plus utiles, c'est-à-dire, en général, par celles qui doivent donner le plus de recettes et de bénéfices d'exploitation, et nous croyons qu'on peut en trouver assez dont les recettes couvrent les dépenses d'exploitation, pour employer les capitaux disponibles pendant bien des années. On aura donc tout le temps de réfléchir avant d'entreprendre les lignes qui donneraient une perte d'exploitation et de vérifier, en toute rigueur, l'exactitude de nos conclusions... »

62. *Modifications faites à la suite des critiques de M. Colson.* — Après avoir cherché à réfuter ce qui nous semble mal fondé dans les critiques que M. Colson a faites de notre étude au sujet de l'utilité des chemins de fer, nous tenons à bien marquer ce qu'elles nous paraissent avoir de fondé et ce que nous avons gagné à les recevoir.

En premier lieu, de nouvelles réflexions nous ont

amené à reconnaître que le trafic des voyageurs des petites lignes exerce une influence considérable sur la diffusion des lumières, l'augmentation des parcours moyens, les recettes nouvelles dont bénéficient les grands réseaux et finalement sur les services rendus par les chemins de fer. Dans notre premier mémoire, nous n'avions pas suffisamment apprécié ces utiles effets du transport des voyageurs sur les petites lignes et nous avions laissé apparaître une préférence trop marquée en faveur du trafic des marchandises.

En second lieu, les critiques de M. Colson nous ont amené à faire une analyse plus minutieuse des éléments qui composent le trafic des petites lignes et à reconnaître qu'il est prudent de réduire de 2,5 à 2,0 le rapport de leur utilité totale à la recette du trafic qu'elles créent, tant sur leurs rails que sur ceux des grandes lignes. Malgré cette correction notable, nous restons bien loin de l'opinion de notre éminent contradicteur.

M. Colson a fait observer aussi que c'est au trafic et non à la recette qu'il serait préférable de comparer l'utilité des chemins de fer. Il a assurément raison; mais lorsqu'on ne s'occupe que de moyennes, il n'y a pas grand inconvénient à prendre, avec la plupart des auteurs, comme terme de comparaison, la recette qui, *en moyenne*, varie presque dans la même proportion que le trafic. Nous avons d'ailleurs fait observer, dès le début, que nos chiffres étaient établis en vue de l'application des tarifs actuels, et que si l'on venait à les abaisser, le rapport de l'utilité à la recette augmenterait par ce seul fait.

CHAPITRE VIII.

QUESTION DES TARIFS.

63. *Utilité des abaissements de tarifs.* — M. Colson a consacré le chapitre III à la critique des considérations que nous avons développées au sujet des tarifs.

Il débute ainsi :

« Attribuant aux transports par chemins de fer une utilité indirecte aussi considérable, M. Considère en déduit que l'intérêt général commande un grand abaissement des tarifs, et que c'est augmenter les services rendus au pays par une ligne que de provoquer même des transports qui feraient perdre à l'exploitant plus qu'ils ne feraient gagner directement à l'expéditeur et au destinataire. Si l'on admet, comme nous croyons l'avoir établi ci-dessus, que c'est fausser les calculs sur l'utilité des chemins de fer que d'y faire entrer ces prétendus avantages indirects, cette dernière proposition se trouve réfutée par cela même ».

Dans ce passage, M. Colson expose nettement le désaccord qui nous sépare et le rattache si logiquement à ceux que nous avons avons examinés dans le chapitre précédent que nous pouvons nous borner à une réponse très brève.

Oui, l'opinion que l'on doit se former au sujet de l'utilité des réductions de tarifs, est indissolublement liée à celle que l'on a de l'utilité des transports. M. Colson a donc raison de s'opposer à ces réductions si les chemins de fer ne produisent d'autre effet utile que des économies directes de transport, mais il a tort si, à ces économies directes, s'ajoutent des avantages indirects de grande importance. On adoptera forcément son opinion ou la nôtre au sujet des réductions de tarifs, suivant celle qu'on

se sera formée sur les avantages indirects que nous avons étudiés dans le chapitre précédent. Nous n'avons pas à insister sur ce premier point.

64. *Critique relative à la théorie de Dupuit.* — Pour donner une idée exacte de la seconde critique que nous adresse M. Colson, nous ne pouvons mieux faire que de la citer textuellement :

« On sait, dit-il, que la théorie de Dupuit peut se résumer ainsi : pour chaque transport, il y a un tarif prohibitif, c'est-à-dire une limite maxima du prix que l'expéditeur et le destinataire peuvent payer, limite au-dessus de laquelle le transport ne s'effectuera pas, parce que le prix que les intéressés auraient à payer, serait supérieur à la valeur que ce transport a pour eux, aux avantages qu'ils en attendent. D'autre part, pour le détenteur d'une voie de communication, chaque transport, par les frais qu'il entraîne, est une cause de dépenses; indépendamment des charges constantes....., il y a des dépenses corrélatives de chaque augmentation de transport..... La portion de ces dépenses provenant d'un transport déterminé est ce que M. Considère appelle *prix de revient partiel de ce transport*, ce que d'autres ont appelé *prix de la tonne en sus*.....

« Si l'on applique, entre deux points, un tarif unique, et si ce tarif s'abaisse progressivement à partir du chiffre qui serait prohibitif pour tous les transports, chaque abaissement nouveau rend possibles certains transports, pour lesquels la taxe précédente était prohibitive; et Dupuit a démontré que l'utilité de la voie allait constamment en croissant, tant que l'abaissement provoquait des transports d'une valeur supérieure à leur prix de revient partiel. C'est donc aux environs du prix de revient partiel moyen que se trouverait le tarif unique répondant au maximum d'utilité. Mais Dupuit a démontré aussi que, si

on applique aux diverses marchandises des tarifs différents, calculés de manière à n'atteindre, pour aucune d'entre elles, le tarif prohibitif, la voie, servant exactement aux mêmes transports, rend exactement les mêmes services que si on abaissait uniformément tous les tarifs jusqu'au minimum; seulement, les particuliers pour qui s'effectuent ceux des transports qui ont une grande valeur, sont obligés de payer un prix élevé, c'est-à-dire d'abandonner à l'exploitant une partie notable du bénéfice qu'ils en retirent. Celui-ci encaisse ainsi, en sus de la taxe minima couvrant le prix de revient partiel de chaque transport, des sommes variant d'un transport à l'autre, et dont l'ensemble lui sert à couvrir, en totalité ou en partie, les charges indépendantes du trafic, lesquelles, sans cela, devraient nécessairement être couvertes intégralement par des subventions et retomberaient à la charge des contribuables.

Or, *M. Considère nie qu'il soit possible d'appliquer ainsi, aux divers transports, des prix en rapport avec leur valeur*, et il en conclut que (A) la seule manière de tirer d'une voie de communication tous les services qu'elle peut rendre, c'est, si on ne tient pas compte des avantages indirects, d'abaisser tous les tarifs au prix de revient partiel, et si on tient compte des avantages indirects, de descendre au-dessous de ce prix de revient »..... Du dernier alinéa, il semble résulter que nous sommes en contradiction avec Dupuit et cependant il n'en est rien. Sans doute, cet éminent ingénieur a démontré que, pour faire produire à une voie de communication tous les services qu'elle peut rendre, il suffirait que chaque transport fût frappé d'un tarif en rapport avec sa valeur et assez réduit pour ne pas l'empêcher de naître; mais il n'a nullement dit qu'il fût possible d'appliquer ainsi, à tous les transports, des tarifs en rapport avec leur valeur. Il n'y a pas de dissentiments, à cet égard, entre lui et nous.

Après avoir lu la citation qui précède, tout lecteur croira, assurément, qu'à défaut de Dupuit, M. Colson, du moins, est en désaccord avec nous sur le point qu'elle vise. En poursuivant la lecture, on verra qu'il n'en est rien. En effet, après avoir parlé des efforts que font les compagnies pour établir l'harmonie entre les tarifs et les prix maxima que le public est disposé à payer pour chaque transport, M. Colson s'exprime ainsi :

« Il est certain que cette harmonie est loin d'être complète. Nous irons jusqu'à admettre, si l'on veut, que *chaque expédition pourrait supporter une taxe différente, et qu'il est impossible d'essayer d'appliquer à chacune cette taxe, sans tomber dans le but arbitraire* ».

Et plus loin il ajoute :

« Nous admettrons, si on veut, que (A) pour toute marchandise, tout abaissement de prix donne un développement de trafic ».

On va voir que, dans ces deux passages, M. Colson se rallie complètement à l'une des propositions qu'il semble combattre et qu'il donne le moyen de démontrer l'autre d'une façon irréfutable.

Le premier point est évident et il apparaît, à la première lecture qu'il y a identité absolue de sens entre les phrases imprimées en italique dans la première et dans l'avant-dernière citation du présent paragraphe. Or, dans ces deux phrases, c'est M. Colson lui-même qui a précisé son avis et le nôtre sur l'impossibilité d'appliquer à chaque transport un tarif en rapport avec sa valeur.

Il est facile de se rendre compte que, des deux propositions précédées de la lettre A, la seconde conduit moins directement, mais tout aussi sûrement à accepter la première.

En effet, M. Colson reconnaît que tout abaissement de tarif donne un développement de trafic, c'est-à-dire provoque de nouveaux transports et il a rappelé plus haut,

après Dupuit, que l'utilité de la voie va constamment en croissant tant que l'abaissement des tarifs provoque des transports d'une valeur supérieure à leurs prix de revient partiels. Donc tout abaissement de tarif *jusqu'au prix de revient partiel de transport* augmente l'utilité du chemin de fer, puisque les transports qu'il provoque toujours, ont forcément une valeur, au moins égale, au tarif dont le public consent à les payer, lequel est lui-même, au moins, égal au prix de revient partiel de transport.

En quoi donc consiste le désaccord qui nous sépare de M. Colson ? A notre avis, dans une simple nuance d'appréciation que nous allons indiquer.

Nous avons fait observer que les transports provoqués par un abaissement de tarif n'ont qu'une importance minime quand il s'agit de marchandises de grande valeur. Les frais de transport ne forment alors qu'une faible fraction du prix de vente et, par suite, leur réduction ne peut augmenter de beaucoup la consommation et les transports.

M. Colson insiste sur la justesse de cette observation et l'étend aux marchandises de moyenne valeur pour lesquelles elle est cependant moins exacte. Remarquant ensuite qu'il y a, dans le tarif général, beaucoup de marchandises de grande ou de moyenne valeur, il conclut que très souvent les abaissements de tarifs n'augmenteraient guère l'utilité des chemins de fer.

Au lieu de compter les tarifs, nous en mesurons l'importance et nous faisons observer que si les marchandises de grande et de moyenne valeur sont nombreuses et occupent beaucoup de lignes dans les tarifs, elles ne donnent cependant que la moindre partie des recettes de la petite vitesse et qu'en dehors d'elles, par conséquent, il reste place à de nombreux dégrèvements qui provoqueraient une grande augmentation des transports et accroîtraient l'utilité des chemins de fer dans une large mesure.

Le désaccord qui nous sépare de M. Colson, au sujet de la théorie de Dupuit et des effets des dégrèvements sur l'utilité générale des chemins de fer, se réduit donc à une différence d'appréciation sur un fait que les statistiques permettent d'apprécier. En lisant son mémoire, on ne peut deviner que tel est l'unique objet d'une argumentation à laquelle son auteur paraît attacher tant d'importance. On va voir qu'il donne une opinion bien plus inexacte encore de notre travail à un point de vue plus grave.

65. *Des tarifs qu'il convient d'appliquer.* — M. Colson s'exprime ainsi : « M. Considère arrive à cette conclusion que l'intérêt des contribuables est que les lignes d'intérêt local soient exploitées à des tarifs voisins des prix de revient partiel de transport ». Jusque-là il reproduit très exactement notre opinion, mais il en conclut que nous sommes d'avis d'exploiter à de tels tarifs et c'est une erreur complète.

Nos conclusions finales sont si loin de là que nous croyons indispensable de les établir par des citations textuelles.

Le premier chapitre de la seconde partie de notre mémoire, celui-là même auquel M. Colson a emprunté les considérations relatives à l'utilité générale des chemins de fer, contient ce qui suit, au paragraphe 98 :

..... « On a vu que, dans certains cas, on n'augmenterait le trafic, et, par suite, l'utilité publique que dans une très faible mesure, en abaissant les tarifs au-dessous de ceux qui peuvent donner le maximum de bénéfice d'exploitation. Il importe d'adopter un type de convention qui en tienne compte et qui provoque le concessionnaire à réduire d'autant plus chaque tarif qu'il en résultera une plus grande augmentation des services rendus..... »

Cette phrase est nettement contraire à la conclusion

que nous prête M. Colson; toutefois, elle peut, à la rigueur, échapper, mais il est plus difficile de comprendre que le malentendu subsiste après la lecture du chapitre IX où l'on voit, en maint endroit, que la formule forfaitaire d'exploitation que nous proposons, a pour principal mérite de réaliser le desideratum exprimé dans le passage cité plus haut, c'est-à-dire de tenir compte de l'inégalité des avantages que produirait l'abaissement des tarifs des diverses marchandises. Le paragraphe 186, notamment, se termine par la conclusion suivante, dont une partie y est imprimée en italique, pour mieux appeler l'attention :

« **La formule à six termes conduit à abaisser les tarifs au-dessous des chiffres qui donnent le maximum de bénéfice d'exploitation, d'autant plus que leur réduction doit augmenter davantage la progression du trafic et, par conséquent, d'autant plus qu'elle est plus utile à l'intérêt général. Elle ne provoque que des détaxes négligeables ou nulles, lorsque des sacrifices plus grands n'auraient pas d'effets avantageux pour l'intérêt général.**

« La formule à six termes atteint donc, à ce point de vue, l'objectif que nous avons défini au paragraphe 98, et dont l'utilité est d'ailleurs évidente par elle-même. Elle n'impose de sacrifices au propriétaire des chemins de fer que lorsqu'ils sont utiles à la collectivité et dans une mesure d'autant plus large qu'ils rendront de plus grands services ».

Enfin, au sixième alinéa du paragraphe 193, le résumé final de notre mémoire contient un passage qui est conçu presque dans les mêmes termes et que, pour ce motif, nous nous abstenons de citer.

Il y a loin de là aux opinions radicales que doivent forcément nous attribuer tous ceux qui n'ont lu que la note de M. Colson.

Comment expliquer un pareil malentendu?

Nous nous empressons de reconnaître que, dans une certaine mesure, il vient de notre faute. N'ayant fait, dans le chapitre I, qu'une étude théorique de l'utilité totale des chemins de fer et des intérêts des contribuables, nous n'avons pas pensé que le lecteur pût ne pas remarquer qu'elle n'embrassait que deux des côtés de la question complexe des tarifs; nous ne l'avons pas dit et nous constatons que certaines phrases rendent imparfaitement notre pensée et peuvent en donner d'abord une idée fausse au lecteur. Nous aurions trouvé très naturel que l'on relevât ce vice de rédaction de notre travail et la contradiction apparente de certaines parties, mais nous comprenons difficilement qu'après avoir terminé la lecture de notre mémoire, on ait pu mal interpréter nos conclusions.

Comment expliquer que tel ait été le cas de M. Colson, qui joint à un esprit attentif et circonspect une loyauté universellement reconnue et une courtoisie à laquelle nous nous plaisons à rendre hommage? Nous ne le désobligerons pas en en donnant l'explication que nous croyons plausible.

M. Colson appartient depuis longtemps au Conseil d'État, où il a eu l'occasion de constater les conséquences désastreuses des conventions basées sur la garantie d'intérêt ou sur certaines formules forfaitaires d'exploitation. Il en a été vivement frappé et il les a signalées dans un remarquable mémoire inséré aux *Annales des ponts et chaussées* et aux *Annales des mines*.

D'autre part, il a été à même de comparer les recettes de la plupart des embranchements aux prévisions émises avant l'exécution et il a constaté que très souvent le déficit était considérable.

Il y a là de quoi rendre prudent et même peut-être craintif. M. Colson semble l'être devenu; il appréhende qu'on entraîne l'État dans des aventures et cette crainte

lui fait redouter qu'on évalue trop haut l'utilité des chemins de fer d'intérêt local, d'une part, celle des abaissements de tarifs, d'autre part. Il appréhende non seulement les théories fausses, mais même peut-être les conclusions erronées que des hommes inattentifs ou de mauvaise foi pourraient tirer de théories qui, tout en ne renfermant rien d'absolument inexact, mettraient surtout en relief les beaux côtés de ces questions. Il a jugé que tel était le cas des nôtres et il a voulu placer les choses au point, en en montrant le revers.

Assurément l'intention était excellente et dictée par un sentiment élevé du devoir, mais il n'est personne dont la vision intellectuelle soit absolument indépendante des impressions de l'âme, et c'est sans doute la sollicitude extrême que lui font éprouver les dangers du budget, qui a concentré, à un degré excessif, l'attention de M. Colson sur les passages de notre mémoire jugés par lui susceptibles de recevoir une interprétation dangereuse pour les finances de l'État et qui l'a empêché de prendre garde à notre conclusion finale dont la netteté absolue élucide le sens des quelques phrases qui rendent mal notre pensée.

Le lecteur jugera si, de notre côté, nous avons, à notre insu, cédé à l'influence des préoccupations habituelles et des fonctions d'ingénieur qui appellent constamment l'attention sur l'utilité des voies de communication et peuvent prédisposer à les exagérer.

Nous avons cru devoir faire ces observations parce qu'elles nous ont semblé de nature à faciliter aux lecteurs le choix entre des opinions contraires dont elles expliquent la diversité et à leur permettre de juger les nombreux dissentiments de détail que révèle la note de M. Colson, en sus des questions principales que nous avons seules examinées.

Après avoir répondu aux critiques qu'a soulevées notre étude des tarifs, nous croyons utile, pour les lecteurs qui

ne connaissent pas notre premier mémoire, de résumer nos conclusions à ce sujet. Les numéros entre parenthèses indiquent les paragraphes où chaque proposition est établie :

Si l'on n'avait à se préoccuper que de faire produire aux chemins de fer le maximum d'utilité générale dont ils sont capables, sans tenir compte d'aucune autre considération, on devrait abaisser les tarifs au niveau des prix de revient partiels de transport et même au-dessous (96).

Pour respecter, en outre, les exigences de la justice distributive, il faudrait maintenir des tarifs un peu plus élevés, quoique encore voisins des prix de revient partiels de transport (102).

Mais les abaissements des divers tarifs jusqu'à ces limites présentent un intérêt très inégal, parce qu'ils produiraient des développements de trafic d'importance fort différente (98).

En conséquence, vu l'intérêt évident qu'il y a à concilier, autant que possible, avec l'intérêt général, la juste rémunération du capital de premier établissement et la prospérité des budgets départementaux, il importe de réduire d'autant plus chaque tarif qu'il en résultera une plus grande augmentation des services rendus (114).....

Nous n'avons rien à changer à ces conclusions, et nous ne pouvons qu'exprimer le regret de n'avoir pas réussi à rendre tout malentendu impossible.

CHAPITRE IX.

FORMULE D'EXPLOITATION.

66. *Opinion de M. Colson.* — M. Colson consacre le dernier chapitre de sa note à l'examen de la formule

nouvelle que nous avons proposée pour fixer la valeur des dépenses d'exploitation. Il déclare que, bien qu'en désaccord complet avec nous sur l'utilité des chemins de fer d'intérêt local et sur les tarifs qu'il convient d'y appliquer, il approuve le type de notre formule et le croit capable de réaliser, mieux qu'aucun des types connus, l'accord désirable des intérêts du public, de l'État et des départements avec ceux des concessionnaires qui tiennent dans leurs mains l'avenir des chemins de fer et qui exercent notamment une influence prépondérante sur la fixation des tarifs.

Toutefois, M. Colson est d'avis qu'on peut simplifier notre formule, sans avantages réels, il est vrai, mais sans inconvénients sérieux, et il pense qu'on doit adopter, pour les coefficients numériques, d'autres valeurs que celles que nous avons indiquées à titre d'exemples.

La simplification serait la conséquence d'une indication que nous avons nous-même donnée.

67. *Simplifications proposées.* — Le quatrième terme de notre formule générale est $d\,V^k$; V^k y représente le nombre des voyageurs kilométriques, et d est un coefficient numérique. Ce terme n'a pas seulement pour but, comme le dit M. Colson, de tenir compte au concessionnaire de la légère augmentation de dépenses que lui occasionne l'accroissement du nombre des voyageurs qui montent dans les trains existants. En lisant notre mémoire, on voit qu'il est aussi destiné à inciter les concessionnaires à l'abaissement des tarifs des voyageurs. Toutefois, vu la concurrence des voitures qui empêche l'exagération des tarifs sur les petites lignes, nous avons reconnu, dès l'origine, que le terme $d\,V^k$ peut, en général, être supprimé sans inconvénients sérieux. M. Colson a adopté cet avis et est allé plus loin. Remarquant avec nous que, pour compenser la disparition de ce terme, il faut aug-

menter la fraction de la recette des voyageurs R^V que le deuxième terme attribue aux concessionnaires, il a pensé que cette fraction peut être la même que pour la recette des marchandises R^M et que, par suite, le second et le troisième terme $b\,R^V$ et $c\,R^M$ peuvent être remplacés par un terme unique $b\,R$, R étant la recette totale $R^V + R^M$.

Cette simplification est précisément celle que nous avons faite dans la formule à quatre termes que nous avons imaginée avant la formule à six termes. Nous pensons donc qu'il y a des cas où elle ne peut présenter aucun inconvénient, mais il y en a d'autres où elle serait inopportune.

Quel est, en effet, le but qu'on doit se proposer avant tout? C'est de faire en sorte que les concessionnaires tirent, d'un trafic quelconque, une recette proportionnée aux dépenses qu'il leur occasionne. Or il est facile de se rendre compte que les frais qu'entraînent les transports des voyageurs et ceux des marchandises, ne sont pas toujours dans une égale proportion avec les recettes qu'ils produisent.

S'il s'agit d'une ligne à très fortes pentes, de 30 à 40 millimètres, par exemple, munie de faibles rails et desservie, par suite, par de petites locomotives remorquant des trains légers, le transport d'une tonne de marchandises sera très onéreux, et pour couvrir les dépenses de l'exploitant, il faudra lui abandonner une fraction considérable des recettes de ce trafic. Cette fraction devra d'ailleurs être d'autant plus forte que les transports de marchandises seront plus intermittents, varieront plus avec les saisons et auront une importance plus inégale dans les deux sens.

Sans doute, le coût du transport des voyageurs sera, lui aussi, augmenté par les conditions défectueuses de la ligne mais dans une proportion bien moindre, puisqu'un voyageur qui donne les deux tiers environ de la recette

moyenne d'une tonne de marchandises, exige le remorquage d'un poids brut sept à huit fois moindre.

Pour les lignes d'exploitation coûteuse, à trafic très variable, la fraction de recette abandonnée aux concessionnaires devra donc être beaucoup plus élevée pour les marchandises que pour les voyageurs.

On comprend qu'il en sera tout autrement pour les lignes à très faibles pentes ayant une voie solide, de puissantes locomotives et un trafic de marchandises régulier et bien équilibré dans les deux sens.

Les fractions de R^V et de R^M qu'il conviendra d'abandonner à l'exploitant, seront donc, entre elles, dans des rapports très différents suivant les circonstances, et, par suite, il importe de séparer les deux termes $b\,R^V$ et $c\,R^M$ dans le type général de la formule d'exploitation, sauf à les confondre en un seul dans les cas particuliers où l'on pourra le faire sans inconvénient.

On voit, par ce qui précède, que M. Colson s'est mépris en pensant que c'est dans le but de favoriser le trafic des marchandises plus que celui des voyageurs que, dans une formule étudiée en vue de lignes à fortes pentes et à trafic intermittent telles que celles du Finistère, nous avons proposé d'accorder à l'exploitant une part plus forte de la recette des marchandises que de celle des voyageurs.

Quelle utilité présenterait la simplification dont il s'agit? Aucune autre que de faire une concession à ceux qui redoutent la complication de la forme sans se demander si, au fond, elle présente quelque inconvénient. M. Colson le reconnaît expressément, et il est évident que, dans le calcul de la somme à allouer à l'exploitant, calcul qu'on fait une seule fois par an, il ne faut pas cinq minutes de plus pour multiplier la recette des voyageurs et celle des marchandises par deux coefficients différents et faire la somme des produits que pour multiplier la somme des recettes par un coefficient unique.

Il nous semble inopportun de sacrifier des avantages sérieux à des considérations si futiles.

68. *Valeurs des coefficients numériques.* — Au sujet des coefficients numériques que nous avons indiqués comme pouvant convenir à des lignes analogues à celles du Finistère, M. Colson a fait diverses observations. La première porte sur le sixième terme fK, dans lequel K représente le parcours kilométrique des trains et dont le coefficient $0^f,40$ lui semble exagéré. A l'appui de son opinion, il fait remarquer qu'un train supplémentaire, portant 60 tonnes de marchandises, rapporterait aux concessionnaires $1^f,12$, par l'effet du cinquième et du sixième termes, alors même que la recette correspondante serait nulle. En raisonnant ainsi, M. Colson ne tient pas compte qu'un train complètement chargé qui porterait un poids utile de 60 tonnes pèserait 90 tonnes, machine non comprise, et que, pour le remorquer sur des pentes de 25 millimètres et dans des courbes de 150 mètres de rayon, il faudrait des locomotives bien lourdes pour circuler sur des voies légères. En outre, et c'est le point capital, il oublie que, le plus souvent, les trains sont très loin d'être pleins. Si, pour ne pas rester dans le vague, on consulte les statistiques officielles de 1888, on reconnaît que le nombre moyen de tonnes par train a été de $34^t,9$ pour une ligne des Ardennes, de $21^t,8$ pour l'Est de Lyon, de 16 à 17 tonnes pour deux autres lignes et qu'il tombe ensuite à 14, 12 tonnes, $10^t,5$ et même moins pour tous les autres chemins de fer d'intérêt local français. La moyenne générale est de $7^t,9$. Il est vrai que, sur ces lignes, il y a de nombreux trains mixtes, et que M. Colson a en vue les trains supplémentaires que l'on organise seulement lorsqu'ils ont une charge suffisante dans un sens; mais, même pour ces trains, nous persistons à penser qu'en raison de l'inégalité des transports dans les deux sens

sur les lignes telles que celles du Finistère prises comme exemple, on ne doit pas compter, en moyenne, sur une charge utile supérieure à 20 tonnes. C'est le tiers du chiffre admis par M. Colson.

Dans ces conditions, nous ne pouvons trouver fondés les motifs qui sont invoqués pour réduire de $0^f,40$ à $0^f,30$ le coefficient du sixième terme de notre formule d'exploitation; nous acceptons néanmoins cette réduction pour les lignes analogues à celles du Finistère par les motifs suivants. Nous avons longtemps pensé que l'augmentation de dépenses qu'entraîne un train kilométrique supplémentaire, doit être évaluée à $0^f,60$, y compris le bénéfice légitime de l'exploitant; des faits récents nous font croire qu'elle peut être ramenée à $0^f,50$ par une exploitation économique et, par suite, que le coefficient du parcours kilométrique K doit être réduit de $0^f,40$ à $0^f,30$, ou même peut-être à $0^f,25$.

Nous n'étudierons pas en détail les autres modifications de coefficients que propose M. Colson. Pour mettre le lecteur à même d'en apprécier l'opportunité, il nous suffira de lui en faire connaître le motif.

Nous avons longuement démontré, dans notre premier mémoire, que lorsqu'en dehors d'une constante kilométrique, on n'abandonne qu'une fraction de la recette brute au concessionnaire qui supporte la totalité de la dépense, il fait une perte sèche sur les transports à bas prix et qu'il a tout intérêt à maintenir des tarifs très élevés. Au paragraphe 178 notamment, il est rigoureusement établi que, pour des marchandises dont le prix de revient partiel de transport serait de 4 centimes et dont le trafic, régulièrement décroissant quand le tarif s'élève, cesserait complètement s'il atteignait 14 centimes, un concessionnaire auquel la formule d'exploitation abandonnerait la moitié de la recette brute, aurait intérêt à ne pas abaisser les tarifs au-dessous de la limite presque prohibitive de 11 centimes.

Au contraire, si, en dehors d'une constante kilométrique, on n'abandonnait au concessionnaire, par unité transportée, qu'une somme fixe dépassant, si peu que ce fût, l'augmentation de dépenses que lui occasionne ce transport, il est évident qu'il aurait intérêt à abaisser indéfiniment les tarifs pour développer le trafic, malgré le préjudice qui en résulterait pour les budgets du département et de l'État.

Suivant l'importance relative qu'auront, d'une part, les coefficients des deuxième et troisième termes qui allouent au concessionnaire des fractions des recettes des voyageurs et des marchandises et, d'autre part, les coefficients des quatrième et cinquième termes qui lui accordent une somme déterminée par unité transportée, il aura donc intérêt à maintenir les tarifs à un niveau plus ou moins élevé.

M. Colson pense qu'il n'y a pas lieu d'abaisser les tarifs sensiblement au-dessous de la limite assez élevée qui produit le plus grand bénéfice net d'exploitation; il doit, par conséquent, donner une valeur relativement forte aux coefficients du deuxième et du troisième terme et réduire à peu de chose celui du cinquième. Quant au quatrième, nous avons vu qu'il l'annule complètement.

Nous nous arrêtons nécessairement au parti contraire, puisque nous estimons que les tarifs doivent être abaissés très notablement au-dessous de ceux qui donnent le maximum de bénéfice net d'exploitation.

69. *Épure représentant les résultats des divers tarifs.* — Il serait trop long de reproduire ici les longues considérations par lesquelles nous avons motivé les valeurs adoptées, à titre d'exemple, pour les divers coefficients; toutefois, il semble nécessaire de donner une idée suffisante de la question à ceux qui n'ont pas lu notre premier

mémoire, en reproduisant une épure qui en rend sensibles aux yeux les points principaux (*fig.* 3).

Sur une ligne Ox on a porté, en abscisses, les tarifs que l'on peut appliquer. Chaque ordonnée de la courbe RBP représente le bénéfice net d'exploitation que donnerait l'application d'un tarif égal à l'abscisse correspondante, dans certaines hypothèses moyennes que nous jugeons inutile d'indiquer et de justifier ici. Le bénéfice serait nécessairement remplacé par une perte égale aux dépenses constantes d'exploitation OE, si l'on appliquait soit le tarif prohibitif Op qui supprime tout transport, soit un tarif Or, égal au prix de revient partiel de transport. Entre ces deux limites, le bénéfice passe par un maximum correspondant à un tarif On.

La courbe PU^d a pour ordonnées l'utilité directe des transports, c'est-à-dire la somme des bénéfices nets d'exploitation et des économies directes, reconnues par les expéditeurs, que procurent les seuls transports effectués sur la petite ligne. Nous avons démontré que son maximum correspond à l'abscisse Or, égale au prix de revient partiel de transport.

Enfin la courbe PU^t a pour ordonnée les valeurs de l'utilité totale que procurent à tous les membres de la société, non seulement les transports effectués sur la petite ligne, mais aussi ceux qu'elle provoque sur les grands réseaux et qui n'auraient pas lieu si elle n'existait pas; cette utilité totale comprend le bénéfice net d'exploitation que les grands réseaux retirent du trafic nouveau créé par la petite ligne.

Cette épure ne diffère de celle qui figure au paragraphe 113 de notre premier mémoire qu'en ce que, conformément aux conclusions du paragraphe 58 de la présente note, nous avons réduit de 2,5 à 2,0, pour les chemins de fer d'intérêt local, le rapport de l'utilité totale à la recette brute du trafic créé sur tous les rails.

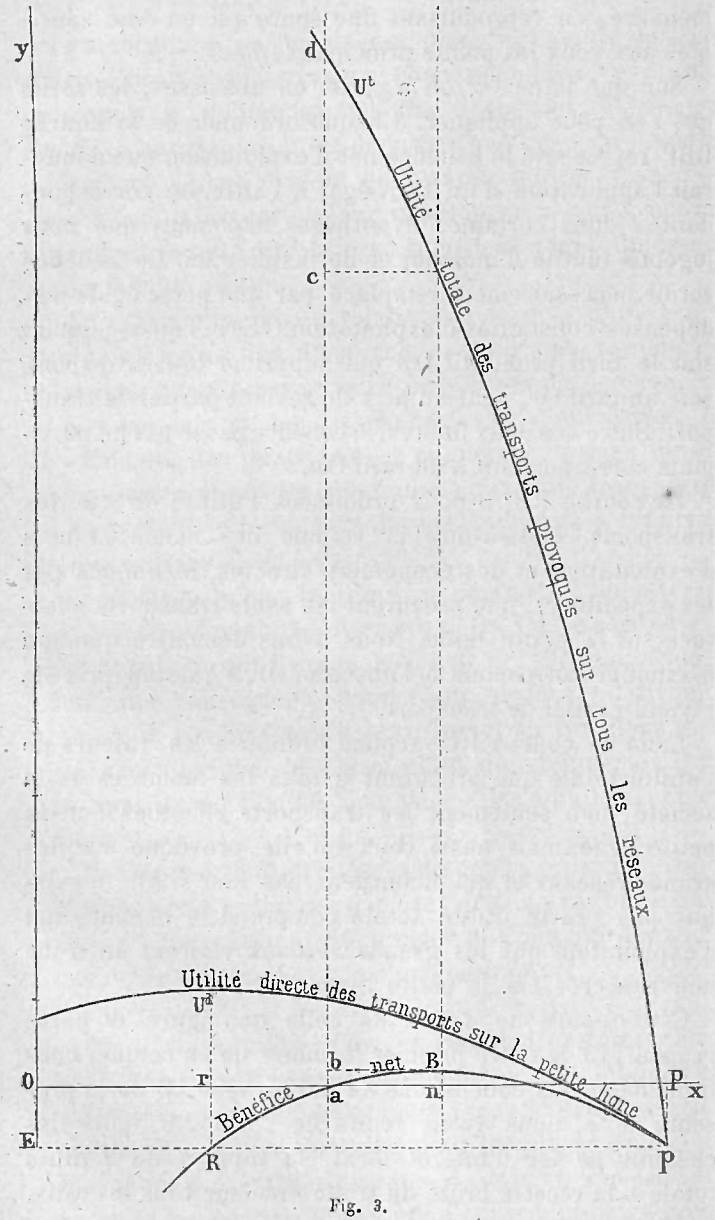


Fig. 3.

On l'a vu au cours de cette note, M. Colson estime que l'utilité d'une petite ligne se réduit presque au bénéfice net d'exploitation et aux économies directes que procurent au public les transports effectués sur ses propres rails. S'il en était ainsi, cette utilité serait représentée par les ordonnées de la courbe PU^d. A notre avis, ce sont, au contraire, les ordonnées de la courbe PU^t qui représentent l'utilité totale de la ligne. En présence d'un tel désaccord, on comprendra sans peine que M. Colson demande le maintien des tarifs dans le voisinage de On, tandis que nous croyons opportun de les abaisser notablement au-dessous, parce que la faible diminution du bénéfice net d'exploitation qui en résulterait pour le département, ne saurait être mise en balance avec l'augmentation correspondante de la somme des avantages dont bénéficie la société.

Les valeurs que nous avons adoptées, à titre d'exemple, pour les coefficients de la formule d'exploitation conduiraient le concessionnaire à maintenir des tarifs aussi éloignés, en moyenne, du prix de revient partiel de transport Or et du tarif On qui donnerait le maximum de bénéfice net d'exploitation. Il suffit d'examiner la *fig.* 3 pour se rendre compte des avantages qui résulteraient d'un tel abaissement des tarifs. Le bénéfice net d'exploitation serait réduit de la quantité presque négligeable qui est représentée par ab, tandis que l'utilité totale de la ligne serait augmentée de cd, c'est-à-dire d'une valeur environ quinze fois plus forte, en moyenne.

Tel serait, pour les marchandises de valeur moyenne, le résultat de la formule que nous avons proposée ; mais, pour se rendre complètement compte de ses conséquences, il faut se reporter au tableau inséré au paragraphe 178 de notre mémoire :

On y trouvera les chiffres suivants pour le cas où les transports exigent une augmentation du parcours des

trains et dans certaines hypothèses qui correspondent à des cas moyens.

	PRIX de revient partiel de transport Or	TARIF qui donne le maximum de bénéfice net d'exploitation On	TARIF le plus avantageux au concessionnaire dans le cas où l'on applique notre formule
Matières de peu de valeur	3c,3	6c,1	4c,6
Marchandises de valeur moyenne. .	4c,0	9c,0	7c,6
Marchandises de grande valeur . . .	6c,5	18c,2	17c,5

La formule que nous proposons, conduit donc le concessionnaire à abaisser, à tel point, les tarifs des matières de peu de valeur qu'ils ne dépassent plus que de 40 p. 100 le prix de revient partiel de transport et ce dégrèvement nous semble bien motivé, parce qu'il exerce forcément une grande influence sur le développement du trafic de ces matières dont les frais de transport forment une fraction importante du prix de vente.

Au contraire, en ce qui concerne les marchandises de grande valeur, pour lesquelles la réduction des tarifs aurait peu d'utilité, la formule en question ne provoque pas de dégrèvements appréciables et conduit à appliquer des tarifs presque triples des prix de revient de transport.

Cette remarque achève de montrer combien M. Colson s'est trompé sur nos conclusions pratiques et définitives en nous attribuant l'idée de réduire uniformément tous les tarifs jusqu'aux prix de revient partiels de transport.

MINERAIS DE MANGANÈSE

ANALYSÉS

AU BUREAU D'ESSAI DE L'ÉCOLE DES MINES

DE 1845 A 1893

Par M. ADOLPHE CARNOT,
Professeur à l'École nationale supérieure des mines,
Directeur du Bureau d'essai.

AVANT-PROPOS.

Le Bureau d'essai de l'École des mines, fondé en 1845, aura bientôt cinquante années d'existence. Durant ce long intervalle de temps, il a exécuté gratuitement, sur la demande des particuliers aussi bien que des administrations publiques, un nombre très considérable d'analyses de substances minérales diverses.

Les renseignements fournis par ces analyses ont pu être immédiatement mis à profit par les personnes qui les avaient demandés, mais par elles seulement; car ils ne sont jamais communiqués, avant un délai assez long, à d'autres que les intéressés eux-mêmes, qui peuvent tenir à les conserver quelque temps secrets.

Tout en continuant à observer cette règle de discrétion pour les analyses nouvelles, nous avons pensé qu'il pourrait être utile de mettre à la disposition du public différentes parties des travaux antérieurs du Bureau

d'essai, relatives aux gîtes minéraux de la France et de l'étranger.

Nous avons déjà publié, en 1879, dans les *Annales des mines*, les tableaux des essais de combustibles minéraux, anthracites, houilles et lignites, au nombre de 840.

En 1885, nous avons donné une série de 255 analyses complètes de sources minérales du territoire français, publication que nous pourrons continuer bientôt par une série nouvelle.

En 1890, nous avons présenté, sous forme de tableaux, les analyses complètes et les renseignements géologiques que nous avions pu recueillir relativement à 1.796 échantillons de minerais de fer provenant d'exploitations ou de recherches entreprises en France, en Algérie et en Tunisie.

Nous nous proposons de poursuivre ainsi la publication des documents du Bureau d'essai, qui paraissent de nature à servir la science ou l'industrie.

Nous allons donner ici les analyses de 207 minerais de manganèse. Dans ce nombre figurent 145 échantillons d'origine française et 62 de provenance étrangère.

On sait que les minerais de manganèse sont principalement employés : 1° dans la *métallurgie*, pour la fabrication des fontes manganésées et pour celle des ferromanganèses ; 2° dans les *industries chimiques*, pour la préparation de l'oxygène, du chlore et des chlorures décolorants ; 3° dans la *verrerie*, pour l'affinage des verres colorés par le silicate ferreux.

Pour la métallurgie, il importe à la fois de connaître la teneur des minerais en manganèse et en fer et la proportion des autres éléments fixes, qui peuvent influer sur la marche des fours et sur la qualité de la fonte ou du ferromanganèse.

Comme *savon des verriers*, le minerai de manganèse agit en partie par son oxygène, en partie par son métal ; mais, pour cet usage, on a particulièrement intérêt à savoir s'il ne renferme pas d'oxydes colorant le verre, comme ceux de cuivre ou de cobalt, et si l'oxyde de fer, les terres alcalines et les gangues n'atteignent pas des proportions telles qu'ils puissent être nuisibles. C'est donc encore une analyse complète qu'il convient de faire pour la verrerie.

Quant aux industries chimiques, elles ont longtemps attaché une importance toute spéciale au dosage de l'*oxygène disponible*, c'est-à-dire existant dans l'oxyde de manganèse naturel en sus de celui contenu dans le protoxyde MnO, ce dosage permettant de calculer le chlore libre, qui se produit sous l'action de l'acide chlorhydrique. Mais le point de vue a beaucoup changé, depuis que l'on sait régénérer le bioxyde, après un premier emploi de l'oxyde naturel ; on peut dire qu'aujourd'hui la teneur en manganèse est devenue, pour cette industrie comme pour les autres, le principal élément d'appréciation de la valeur du minerai.

Pour satisfaire aux demandes de renseignements faites au Bureau d'essai et éclairer les intéressés sur la valeur des échantillons qu'ils avaient envoyés, on a dû examiner les minerais à un point de vue spécialement industriel, en laissant de côté certaines recherches, qui n'auraient eu qu'un intérêt théorique.

On s'est notamment abstenu de doser séparément les différentes substances volatiles contenues (eau hygrométrique, eau combinée, matières organiques ou bitumineuses, acide carbonique...). L'oxygène disponible lui-même a été rarement déterminé et l'on s'est borné, presque toujours, à donner, en bloc, la perte du poids totale produite par une calcination à température élevée, comprenant, avec les matières volatiles proprement dites,

l'oxygène combiné au manganèse en sus de l'oxyde rouge Mn^3O^4.

On a, au contraire, déterminé avec soin, en vue de l'utilisation des minerais dans la métallurgie et la verrerie, les oxydes métalliques de fer, de cuivre, de cobalt, et les terres alcalines, baryte, chaux, magnésie. On a également indiqué la teneur en argile et silice. Enfin on a donné le dosage de l'acide phosphorique, qui mérite d'attirer l'attention, depuis que le manganèse est couramment employé dans la métallurgie de l'acier.

Les tableaux d'analyses ont été complétés par l'indication de la teneur calculée en *manganèse métallique*, afin de faciliter la comparaison et l'appréciation des minerais.

MINERAIS DE MANGANÈSE DE LA FRANCE.

DÉPARTEMENT DE L'ALLIER.

Arrondissement de Montluçon. — Canton de Cérilly, commune de Saint-Bonnet-le-Désert; forêt de Trouçais (1, 2).

Arrondissement de Moulins. — Canton de Moulins, commune de Coulandon (3).

	(1)	(2)	(3)
Silice et argile	42,50	16,50	4,00
Peroxyde de fer	4,33	4,00	10,00
Oxyde rouge de manganèse	37,00	57,60	75,42
Chaux	6,00	9,66	»
Acide phosphorique	0,20	0,30	»
Perte par calcination	9,66	11,90	10,30
Total	99,69	99,96	99,72
Manganèse métallique	26,64	41,17	54,30

DÉPARTEMENT DES ALPES-MARITIMES.

Arrondissement de Grasse. — Canton d'Antibes, commune de Biot (1, 2). Canton et commune de Vence (3).

	(1)	(2)	(3)
Silice et argile	19,30	15,90	4,00
Peroxyde de fer	6,60	17,00	1,30
Oxyde rouge de manganèse	56,30	50,00	58,30
Chaux	0,60	0,60	11,30
Magnésie	1,30	1,20	4,30
Acide phosphorique	»	»	0,04
Perte par calcination	15,30	15,00	20,60
Total	99,40	99,70	99,84
Manganèse métallique	40,54	36,00	41,98

DÉPARTEMENT DE L'ARDÈCHE.

Arrondissement de Privas. — Canton de Pierreville, commune de Marcols.

Silice et argile	29,00
Peroxyde de fer	13,80
Oxyde rouge de manganèse	36,60
Chaux	2,30
Perte par calcination	18,00
Total	99,70
Manganèse métallique	26,35

DÉPARTEMENT DE L'ARIÈGE.

Arrondissement de Foix. — Canton et commune d'Ax (1).

Arrondissement de Saint-Girons. — Canton de Saint-Girons, commune d'Esplas (2). Canton de Castillon, commune de Seutein (3). Canton et commune de Riverenert.

Nature du minerai : Oxydes avec carbonate de manganèse.

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Silice et argile	0,90	4,00	4,90	2,30	10,00	3,00	6,00
Peroxyde de fer	4,50	15,00	21,00	2,60	2,60	0,60	4,60
Oxyde rouge de manganèse.	73,10	70,50	59,40	68,60	56,60	69,60	66,60
Chaux	4,40	»	»	7,80	10,60	4,00	6,60
Perte par calcination	16,70	10,00	14,60	18,30	20,00	22,60	16,00
Total	99,60	99,50	99,90	99,60	99,80	99,80	99,80
Manganèse métallique	52,63	50,76	42,77	49,25	40,75	50,18	48,02

DÉPARTEMENT DE L'ARIÈGE (Suite).

Arrondissement de Saint-Girons. — Canton et commune de Riverenert.

Nature du minerai : Oxydes avec carbonate de manganèse.

	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
Silice et argile	3,00	3,80	5,00	1,60	3,00	1,60
Peroxyde de fer	10,00	7,60	2,30	0,80	0,50	1,20
Oxyde rouge de manganèse.	60,30	33,30	63,30	76,00	69,00	61,30
Chaux	10,40	26,60	3,00	6,00	5,30	2,60
Magnésie	0,10	0,33	»	»	»	»
Acide phosphorique	0,12	0,07	traces	traces	traces	traces
Perte par calcination	16,00	28,30	26,30	15,30	22,00	33,00
Total	99,92	100,00	99,90	99,70	99,80	99,70
Manganèse métallique	43,42	23,98	47,57	54,62	49,68	44,14

DÉPARTEMENT DE L'AUDE.

Arrondissement de Carcassonne. — Canton de Conques, commune de Limousis (1, 2, 3). Canton de Mouthoumet, commune de Bouisse (4). Canton de Peyriac-Minervois, commune de Caunes; Villerembert (5 à 9).

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
Silice et argile	0,60	2,20	3,00	1,10	3,33	1,66	6,30	10,00	1,60
Peroxyde de fer	2,60	16,00	18,00	2,30	0,80	2,00	10,00	6,00	0,60
Oxyde rouge de manganèse.	78,60	63,80	61,00	78,05	74,59	70,60	70,60	37,17	86,30
Chaux	3,10	3,50	1,70	3,08	8,10	13,76	»	25,00	»
Perte par calcination	14,30	14,30	15,60	15,47	12,66	11,66	13,00	20,73	11,30
Total	99,20	99,80	99,30	100,00	99,48	99,68	99,90	99,90	99,80
Manganèse métallique	56,59	45,94	43,92	58,16	53,71	50,83	50,83	26,75	62,13

DÉPARTEMENT DE L'AUDE (Suite).

Arrondissement de Limoux. — Canton de Saint-Hilaire, commune de Villardebelle (10 à 12); Saint-Andrieu (13); la Ferronnière (14); la Buchère-de-Clauzels (15).

	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
Silice et argile	3,00	7,00	1,00	27,60	2,00	8,00
Peroxyde de fer	3,00	8,00	2,40	6,60	8,00	8,00
Oxyde rouge de manganèse.	74,74	70,00	71,00	52,66	74,00	64,00
Chaux	2,80	3,20	8,00	»	1,66	6,00
Magnésie	»	»	»	»	1,00	0,30
Perte par calcination	16,40	11,50	17,00	12,80	13,33	13,00
Total	99,94	99,70	99,40	99,66	99,99	99,30
Manganèse métallique	53,81	50,40	50,83	37,92	53,35	46,14

DÉPARTEMENT DE L'AVEYRON.

Arrondissement de Villefranche :

Canton de Montbazens. { Com. de Compolebat; le Mas (1). Com. de Privezac; Montagnac (2).

	(1)	(2)
Silice et argile	32,00	21,60
Peroxyde de fer	4,30	3,30
Oxyde rouge de manganèse.	53,50	64,00
Chaux	»	»
Perte par calcination	10,00	11,00
Total.	99,80	99,90
Manganèse métallique.	38,53	56,08

DÉPARTEMENT DU CANTAL.

Nature du minerai : Psilomelane. — Plomb du Cantal.

	(1)
Silice	1,30
Peroxyde de fer.	traces
Oxyde rouge de manganèse.	67,80
Baryte	10,80
Perte par calcination	19,50
Total.	99,40
Manganèse métallique	48,82

DÉPARTEMENT DE LA CHARENTE.

Arrondissement de Confolens. { Canton de Saint-Claud, commune de Saint-Laurent-de-Céris (1 à 4).

Nature du minerai : Psilomelane.

	(1)	(2)	(3)	(4)
Silice et argile	3,50	14,40	10,60	5,10
Peroxyde de fer	3,40	8,10	18,20	5,40
Oxyde rouge de manganèse.	74,60	54,90	48,80	63,00
Baryte	5,20	»	»	6,70
Perte par calcination	13,30	21,60	21,50	19,10
Total.	100,00	99,00	99,10	99,30
Manganèse métallique.	53,71	39,53	35,13	45,36

DÉPARTEMENT DU CHER.

Arrondissement de Bourges. { Canton de Charost, commune de Saint-Florent.

Silice et argile	24,00
Peroxyde de fer.	6,00
Oxyde rouge de manganèse.	54,45
Chaux	»
Perte par calcination.	15,50
Total.	99,95
Manganèse métallique.	39,20

DÉPARTEMENT DE LA CORSE.

Arrondissement de Bastia. { Canton de Bastia.

Silice et argile.	23,30
Peroxyde de fer.	14,60
Oxyde rouge de manganèse.	50,70
Chaux	»
Perte par calcination.	11,00
Total.	99,60
Manganèse métallique.	36,50

DÉPARTEMENT DE LA DORDOGNE.

Arrondissement de Bergerac. — Canton de Lalinde, commune de Saint-Caprais (1, 2).

Arrondissement de Nontron. { Canton de Thiviers, commune de Saint-Martin-de-Fressengeas (3, 4). Canton de Jumilhac-le-Grand, commune de Saint-Paul-Laroche; Chadeuil (5).

Arrondissement de Périgueux (6, 7).

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Silice et argile	1,33	18,60	22,20	2,00	2,60	25,60	18,00
Peroxyde de fer.	0,85	11,30	10,60	1,20	3,30	11,00	14,00
Oxyde rouge de manganèse.	55,00	55,70	59,80	80,00	72,00	38,00	42,00
Chaux	18,00	»	»	»	4,00	3,60	3,30
Magnésie	0,30	»	»	»	»	»	»
Acide phosphorique	traces	»	»	0,02	»	»	»
Perte par calcination	24,00	14,30	7,00	16,60	18,00	21,50	22,50
Total.	99,48	99,90	99,60	99,82	99,90	99,70	99,80
Manganèse métallique.	39,60	40,10	43,05	57,60	51,84	27,36	30,24

DÉPARTEMENT DE LA DORDOGNE (Suite).

Arrondissement de Sarlat. { Canton de Carlux (8 à 10). Canton de Sarlat (11 à 14).

	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)
Silice et argile	1,60	15,00	0,30	1,30	1,20	5,00	11,80
Peroxyde de fer	2,60	2,20	1,30	0,60	0,80	3,60	3,60
Oxyde rouge de manganèse	32,60	65,60	83,60	90,60	86,30	36,60	66,30
Chaux	30,30	2,60	0,60	»	»	28,00	2,90
Perte par calcination	32,30	14,60	14,00	7,10	11,50	26,50	14,80
Total	99,40	99,90	99,80	99,60	99,80	99,70	99,40
Manganèse métallique	23,40	47,23	60,19	65,23	62,13	26,35	47,74

DÉPARTEMENT DE LA DORDOGNE (Suite).

Arrondissement de Sarlat. { Canton de Belvès, commune de Siorac-de-Belvès (15). Canton de Villefranche-de-Belvès (16 à 18), commune de Besse (19).

	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)
Silice et argile	5,00	44,00	3,00	11,00	5,60
Peroxyde de fer	5,40	8,00	1,30	20,00	10,00
Oxyde rouge de manganèse	65,80	30,00	81,20	52,00	69,80
Chaux	9,00	9,00	1,00	3,00	»
Magnésie	0,20	»	0,25	0,30	»
Acide phosphorique	»	»	0,12	»	traces
Perte par calcination	14,30	8,20	13,00	13,60	14,00
Total	99,70	99,20	99,87	99,90	99,40
Manganèse métallique	47,38	21,60	58,46	37,41	50,26

DÉPARTEMENT DE LA DORDOGNE (Suite).

Arrondissement de Sarlat. { Canton de Domme : communes de Groléjac (15, 16); Macorne (17). Canton de Saint-Cyprien, commune de Tursac (18 à 20).

	(20)	(21)	(22)	(23)	(24)	(25)
Silice et argile	18,30	24,60	2,60	5,60	16,40	1,80
Peroxyde de fer	3,30	4,60	0,30	8,00	4,90	1,60
Oxyde rouge de manganèse	71,30	65,30	81,00	59,30	67,30	80,30
Chaux	»	»	»	»	»	»
Acide phosphorique	»	»	0,04	0,04	0,02	0,06
Perte par calcination	6,80	5,40	16,00	27,50	16,00	16,00
Total	99,70	99,90	99,94	99,84	99,62	99,76
Manganèse métallique	51,33	47,00	58,32	42,69	48,46	57,82

DÉPARTEMENT DE LA HAUTE-GARONNE.

Arrondissement de Saint-Gaudens. { Canton de Bagnères-de-Luchon (1, 2); commune du Portet (3); pic de l'Antecade (4, 5). Canton de Saint-Béat, commune d'Argut (6, 7). Canton et commune de Saint-Martory (8).

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Silice et argile	8,20	11,20	22,00	14,30	15,00	15,00	5,60	2,00
Peroxyde de fer	3,20	1,20	2,60	3,00	2,30	6,00	4,00	2,00
Oxyde rouge de manganèse	70,88	70,70	60,00	68,60	78,20	68,70	83,60	83,20
Chaux	»	»	2,60	0,90	0,60	»	»	2,10
Magnésie	»	»	»	traces	traces	»	»	0,10
Acide phosphorique	»	»	»	0,01	0,01	»	»	»
Perte par calcination	17,69	16,60	12,30	13,00	13,60	9,80	6,60	11,50
Total	99,97	99,70	99,50	99,81	99,71	99,50	99,80	99,90
Manganèse métallique	51,03	50,90	43,20	49,25	56,30	49,46	60,19	59,90

DÉPARTEMENT DE L'HÉRAULT.

Arrondissement de Lodève . . { Canton de Clermont-l'Hérault, commune de Villeneuvette (1).

Arrondissement de Saint-Pons. { Canton de Saint-Pons : Artenac (2, 3, 4, 5, 6, 7). Canton d'Olargues, commune de Vieussan (8).

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Silice et argile	6,00	6,00	4,50	3,00	1,00	0,60	1,00	4,00
Peroxyde de fer	3,30	6,20	3,40	6,00	1,30	3,10	2,30	2,80
Oxyde rouge de manganèse	65,30	76,50	66,00	66,00	73,00	52,80	85,00	82,30
Chaux	4,30	»	3,60	6,60	6,70	21,50	»	»
Magnésie	»	»	1,20	»	»	traces	»	»
Oxyde de nickel	»	»	»	»	1,05	»	»	»
Acide phosphorique	»	»	»	»	»	»	0,09	»
Perte par calcination	21,00	11,00	21,00	18,00	16,00	21,60	11,60	10,70
Total	99,90	99,70	99,70	99,60	99,05	99,60	99,99	99,80
Manganèse métallique	47,00	55,08	47,52	47,52	52,56	38,00	61,20	57,26

DÉPARTEMENT DE L'INDRE.

Arrondissement du Blanc. { Canton de Saint-Benoist-du-Sault, comm. de Sacierges-St-Martin (1).

Arrondissement de Châteauroux. { Canton d'Argenton-sur-Creuse, commune de Celon (2).

	(1)	(2)
Silice et argile	30,00	3,50
Peroxyde de fer	7,00	2,15
Oxyde rouge de manganèse	48,30	80,10
Baryte	5,60	»
Magnésie	»	»
Acide phosphorique	»	0,10
Perte par calcination	9,00	14,00
Total	99,90	99,85
Manganèse métallique	34,78	57,67

DÉPARTEMENT DE LA HAUTE-LOIRE.

Arrondissement de Brioude. { Canton de Blesle, commune de Lorlange.

	(1)
Silice et argile	5,60
Peroxyde de fer	8,00
Oxyde rouge de manganèse	62,60
Chaux	3,00
Magnésie	1,00
Oxyde de cobalt	2,00
Acide phosphorique	traces
Perte par calcination	17,60
Total	99,80
Manganèse métallique	45,07

DÉPARTEMENT DU LOT.

Arrondissement de Figeac. { Canton de Figeac, commune de Béduer ; Sainte-Néboule.

Silice et argile	22,30
Peroxyde de fer	10,00
Oxyde rouge de manganèse	54,60
Chaux	0,80
Magnésie	0,40
Acide phosphorique	»
Perte par calcination	4,50
Total	99,60
Manganèse métallique	39,31

DÉPARTEMENT DE LA LOZÈRE.

Arrondissement de Marvejols. { Canton de la Canourgue, commune d'Auxillac ; Salletz.

Silice et argile	6,60
Peroxyde de fer	0,40
Oxyde rouge de manganèse	80,00
Chaux	»
Magnésie	»
Acide phosphorique	0,02
Perte par calcination	12,60
Total	99,62
Manganèse métallique	57,60

DÉPARTEMENT DE LA NIÈVRE.

Arrondissement de Château-Chinon. — Canton de Luzy (1 à 5).

Arroudissement de Cosne. — Canton de Cosne, commune d'Alligny (6).

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Silice et argile	2,60	50,80	21,00	6,60	8,00	24,30
Peroxyde de fer	2,30	16,00	24,00	28,50	26,60	19,60
Oxyde rouge de manganèse	78,00	11,60	32,80	40,90	42,30	34,30
Chaux	2,80	3,80	2,60	2,60	1,80	»
Magnésie	0,10	0,30	0,50	0,10	traces	»
Acide phosphorique	0,03	»	»	0,04	»	»
Perte par calcination	14,00	17,00	29,00	21,00	21,00	21,60
Total	99,83	99,50	99,90	99,74	99,70	99,80
Manganèse métallique	56,16	8,35	23,61	29,45	30,46	24,70

DÉPARTEMENT DU PUY-DE-DOME.

Arrondissement de Clermont-Ferrand : Canton d'Aubière.

Silice et argile	38,00
Peroxyde de fer	11,00
Oxyde rouge de manganèse	33,30
Chaux	»
Perte par calcination	17,60
Total	99,90
Manganèse métallique	23,98

DÉPARTEMENT DES BASSES-PYRÉNÉES.

Silice et argile	15,90
Peroxyde de fer	20,00
Oxyde rouge de manganèse	38,40
Chaux	2,25
Magnésie	0,60
Oxyde de cobalt	0,10
Acide phosphorique	»
Perte par calcination	22,50
Total	99,75
Manganèse métallique	27,47

DÉPARTEMENT DES HAUTES-PYRÉNÉES.

Arrondissement de Bagnères-de-Bigorre. { Canton de Bordères, commune d'Adervielle (9). Canton et commune de la Vieille-Aure (10, 11).

	(9)	(10)	(11)
Silice et argile	20,00	4,00	15,00
Peroxyde de fer	8,60	27,00	50,00
Oxyde rouge de manganèse	62,00	33,30	18,30
Chaux	0,60	16,30	8,30
Magnésie	0,30	0,20	0,20
Perte par calcination	8,30	21,00	8,00
Total	99,80	99,80	99,80
Manganèse métallique	44,64	23,98	13,18

DÉPARTEMENT DES PYRÉNÉES-ORIENTALES.

Arrondissement de Céret. — Canton de Céret, commune et montagne du Boulou (1 à 8).

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Silice et argile	17,40	6,80	12,00	14,00	9,80	20,10	25,50	25,00
Peroxyde de fer	traces	2,50	4,50	2,40	7,00	3,30	5,60	3,30
Oxyde rouge de manganèse	66,50	71,00	70,70	65,80	59,60	50,00	49,60	53,30
Chaux	4,00	0,60	0,70	0,50	1,40	10,20	4,30	3,70
Perte par calcination	12,10	19,00	12,00	17,30	22,00	16,20	14,30	14,30
Total	100,00	99,90	99,90	100,00	99,80	99,80	99,30	99,60
Manganèse métallique	47,88	51,12	50,90	49,38	42,92	36,00	35,71	38,37

DÉPARTEMENT DES PYRÉNÉES-ORIENTALES (Suite).

Arrondissement de Perpignan. { Canton de Latour-de-France, commune de Rasiguères (9).

Arrondissement de Prades. { Canton de Prades. { Villefranche (10). Ambouillac (11). Corneilla-de-Conflent (12, 13). Canton d'Olette, commune de Serdinya (14).

	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)
Silice et argile	4,60	2,50	3,00	3,00	4,00	7,30
Peroxyde de fer	2,80	5,00	8,00	12,00	3,80	4,00
Oxyde rouge de manganèse	76,60	33,00	76,60	13,00	79,00	47,60
Chaux	0,50	30,30	2,20	37,50	»	16,60
Magnésie	»	1,30	0,20	»	»	0,30
Oxyde de cobalt	»	»	»	0,15	»	»
Perte par calcination	15,20	27,60	9,60	34,00	13,00	24,00
Total	99,70	99,70	99,60	99,75	99,80	99,80
Manganèse métallique	55,15	23,77	55,15	9,34	56,88	34,24

DÉPARTEMENT DE SAÔNE-ET-LOIRE.

Arrondissement de Mâcon. { Canton de la Chapelle-de-Guinchay, commune de Romanèche (1, 2) ; Saint-Julien (3).

Nature du minerai : Psilomelane.

	(1)	(2)	(3)
Silice et argile.	0,60	8,00	1,00
Peroxyde de fer.	8,00	9,00	10,20
Oxyde rouge de manganèse. .	65,00	56,20	63,60
Baryte.	13,68	13,50	13,30
Perte par calcination	12,40	12,66	11,90
Total.	99,68	99,36	100,00
Manganèse métallique	46,80	40,66	45,78

DÉPARTEMENT DE LA HAUTE-SAÔNE.

Arrondissement de Gray. — Canton de Gy, commune de Frasne-le-Château (1, 2).

Arrondissement de Lure. — Canton et commune de Faucogney (3, 4).

	(1)	(2)	(3)	(4)
Silice et argile	5,00	56,00	7,30	50,60
Peroxyde de fer.	3,00	12,00	3,00	1,80
Oxyde rouge de manganèse .	77,20	20,20	78,60	36,30
Chaux.	1,70	1,70	»	»
Perte par calcination	12,10	10,00	11,00	11,00
Total.	100,00	99,90	99,90	99,70
Manganèse métallique. . . .	55,58	14,34	56,59	26,26

DÉPARTEMENT DE LA SAVOIE.

Arrondissement de Saint-Jean-de-Maurienne. { Canton de Saint-Jean-de-Maurienne, commune du Jarrier (1 à 4).

	(1)	(2)	(3)	(4)
Silice et argile.	30,60	60,60	35,30	27,30
Peroxyde de fer.	10,00	6,00	8,00	3,60
Oxyde rouge de manganèse.	56,60	30,30	53,30	61,00
Chaux.	»	»	»	»
Perte par calcination. . . .	3,30	3,00	3,30	7,60
Total.	99,90	99,90	99,90	99,50
Manganèse métallique. . . .	40,31	21,82	38,30	43,92

DÉPARTEMENT DE LA HAUTE-SAVOIE.

Arrondissement de Bonneville. { Canton de Chamonix, commune des Houches, Pont-Sainte-Marie.

Silice et argile.	3,30
Peroxyde de fer.	18,00
Oxyde rouge de manganèse.	61,00
Chaux	»
Perte par calcination.	17,60
Total.	99,90
Manganèse métallique.	43,92

DÉPARTEMENT DU TARN.

Arrondissement de Castres. — Canton de Montredon, commune de Montcouyoul.

Silice et argile	8,33
Peroxyde de fer.	11,33
Oxyde rouge de manganèse.	68,90
Chaux	»
Acide phosphorique	0,25
Perte par calcination.	11,00
Total	99,81
Manganèse métallique	49,61

DÉPARTEMENT DE TARN-ET-GARONNE.

Arrondissement de Montauban. { Canton et commune de Saint-Antoine (1). / Canton de Montclar, commune de Bruniquel (2).

	(1)	(2)
Silice et argile	13,00	60,60
Peroxyde de fer	3,60	11,00
Oxyde rouge de manganèse.	65,45	22,20
Chaux	»	»
Perte par calcination	17,80	6,00
Total	99,85	99,80
Manganèse métallique	47,12	16,00

DÉPARTEMENT DES VOSGES.

Arrondissement. de Saint-Dié. { Canton de Gérardmer (1 et 2).

	Affleurement (1)	A 10m,50 (2)
Silice et argile	40,00	14,00
Peroxyde de fer	2,80	4,10
Oxyde rouge de manganèse	48,60	68,70
Chaux	0,80	1,20
Magnésie	traces	traces
Acide phosphorique	0,03	0,05
Perte par calcination	7,50	11,80
Total	99,73	99,85
Manganèse métallique	35,04	49,53

DÉPARTEMENT DE L'YONNE.

Arrondissement d'Auxerre.

	(1)
Silice et argile	6,30
Peroxyde de fer	8,80
Oxyde rouge de manganèse.	72,00
Chaux	»
Perte par calcination	12,60
Total	99,70
Manganèse métallique	51,84

ALGÉRIE.

Arrondissement d'Alger. — Commune de Bouzareah (1).

Arrondissement de Constantine. — Commune de Biskra, montagnes de l'Aurès (2).

	(1)	(2)
Silice et argile	»	2,60
Peroxyde de fer	»	0,40
Oxyde rouge de manganèse.	47,50	83,50
Chaux	»	»
Oxyde de cobalt	»	0,06
Acide phosphorique	»	0,03
Perte par calcination	»	13,20
Total	»	99,79
Manganèse métallique	34,20	60,12

MINERAIS DE MANGANESE ETRANGERS.

ALLEMAGNE.

Hesse-Darmstadt. — Giessen, Battemberg.

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Silice et argile	2,00	8,00	4,00	19,00	20,50	15,60	10,60
Peroxyde de fer	3,00	16,10	14,40	0,40	1,40	6,30	40,00
Oxyde rouge de manganèse.	71,60	51,20	56,20	69,60	63,30	39,60	35,50
Chaux	8,00	8,60	9,10	»	»	16,20	0,80
Magnésie	»	»	»	»	»	»	0,30
Acide phosphorique	»	»	»	»	»	»	0,64
Perte par calcination	15,00	15,50	16,00	10,00	13,80	22,20	12,00
Total	99,60	99,40	99,70	99,00	99,00	99,90	99,84
Manganèse métallique	51,62	36,92	40,52	50,18	45,64	28,55	25,60

ESPAGNE.

Province de Huesca (1).

Province de Navare. — Elizondo (2).

Province de Lerida (3 à 5); vallée d'Arran (6).

Bords du Guadiana (7).

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Silice et argile.	8,09	23,00	22,00	35,00	33,00	4,80	24,00
Peroxyde de fer.	10,00	10,00	1,00	2,30	4,60	5,60	13,30
Oxyde rouge de manganèse.	54,00	55,10	67,30	53,80	52,10	74,00	49,10
Chaux	6,60	»	»	»	»	1,60	»
Magnésie.	3,00	»	»	»	»	»	»
Perte par calcination. . . .	18,00	10,80	9,40	8,50	10,00	13,60	13,30
Total.	99,60	99,20	99,70	99,60	99,70	99,60	99,70
Manganèse métallique. . . .	38,88	39,88	48,46	38,74	37,51	52,28	35,30

ESPAGNE (Suite).

Province de Zamora. — Loracino (8 et 9).

Province de Burgos. — Esquerra y villa Galijo (Maria) (10); Castrillo de la Reina (Realidad) (11).

Province d'Estramadure (12 à 14).

	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)
Silice et argile.	9,00	3,20	34,30	8,00	0,20	4,20	0,40
Peroxyde de fer.	8,30	3,60	9,60	4,00	0,50	0,50	0,30
Oxyde rouge de manganèse.	70,00	79,60	46,00	70,00	84,60	80,00	84,60
Chaux.	2,00	»	2,60	8,00	1,40	1,50	1,80
Magnésie.	0,30	»	0,30	0,80	»	»	»
Perte par calcination	10,30	13,30	7,00	8,60	12,50	12,80	12,50
Total.	99,90	99,70	99,80	99,40	99,20	99,00	99,60
Manganèse métallique. . . .	50,40	57,30	32,12	50,40	60,80	57,60	60,80

ESPAGNE (Suite).

Province de Séville (15).

Province d'Huelva (16 à 19); oliva de la Sierra (20).

	(15)	Valverde (16)	(17)	(18)	(19)	(20)
Silice et argile.	6,00	13,90	9,00	16,00	16,60	24,60
Peroxyde de fer	4,00	9,00	13,00	13,00	8,30	3,00
Oxyde rouge de manganèse.	79,00	71,00	62,90	56,00	55,20	58,16
Chaux.	2,00	»	»	»	»	»
Perte par calcination.	8,50	16,00	15,00	14,60	19,60	14,20
Total.	99,50	99,90	99,90	99,60	99,70	99,96
Manganèse métallique	56,88	52,12	45,29	40,34	39,74	41,80

ESPAGNE (Suite).

Province d'Almeria (21 à 25); Ulloa (26 à 28).

	S. Jose (21)	Maria (22)	Isabella (23)	Joaquilla (24)	Sierra de Alhamilla (25)	(26)	(27)	(28)
Silice et argile	3,30	15,50	21,30	25,50	3,50	16,00	10,00	10,00
Peroxyde de fer.	11,00	10,00	14,60	13,30	2,00	11,00	12,60	11,00
Oxyde rouge de manganèse.	79,20	68,20	56,70	53,40	70,00	57,88	60,10	67,30
Chaux	»	»	»	»	3,00	»	»	»
Magnésie.	»	»	»	»	1,50	»	»	»
Acide phosphorique	»	»	»	»	0,60	»	»	»
Perte par calcination. . . .	6,00	6,00	7,10	7,60	19,00	15,00	17,00	11,30
Total.	99,50	99,70	99,70	99,80	99,60	99,88	99,70	99,60
Manganèse métallique. . . .	57,00	49,00	40,60	38,43	50,40	41,67	43,30	48,46

GRÈCE.

Perachora (1); Laurium (2).

	(1)	(2)
Silice et argile	2,60	9,40
Peroxyde de fer	0,60	49,20
Oxyde rouge de manganèse	79,60	23,70
Chaux	0,80	2,50
Magnésie	»	0,33
Acide sulfurique	»	0,18
Acide phosphorique	0,55	0,37
Perte par calcination	15,60	13,80
Total	99,75	99,48
Manganèse métallique	57,04	17,09

HONGRIE.

Comitat d'Arad.

	(1)
Silice et argile	14,00
Peroxyde de fer	5,30
Oxyde rouge de manganèse	70,00
Chaux	1,60
Magnésie	0,30
Perte par calcination	8,60
Total	99,80
Manganèse métallique	50,47

ITALIE.

Piémont. — Vallée d'Aoste (1 et 2).

Environs de Gênes (3).

Sardaigne. — Arrondissement de Cagliari. — Porto Torrès (4); Irisi (5).

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Silice et argile	8,00	4,00	20,30	13,60	10,30
Peroxyde de fer	11,00	5,60	4,80	0,60	17,50
Oxyde rouge de manganèse	62,50	80,00	58,40	73,60	49,20
Chaux	3,00	0,50	0,60	»	5,30
Perte par calcination	15,30	9,60	15,70	12,0	17,50
Total	99,80	99,70	99,80	99,80	99,80
Manganèse métallique	45,06	57,60	42,11	53,70	35,30

RUSSIE.

Caucase. { Buleg Kloustch (1 à 3); Koutaïs (4 et 5); Abkhasie (6).

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Silice et argile	3,00	3,00	10,60	5,60	6,00	8,30
Peroxyde de fer	0,80	2,80	5,00	1,05	0,80	1,80
Oxyde rouge de manganèse	72,60	51,60	69,00	81,30	79,36	78,60
Chaux	3,30	10,00	1,30	»	»	»
Perte par calcination	20,00	32,50	14,00	12,00	13,60	11,00
Total	99,70	99,90	99,90	99,95	99,70	99,70
Manganèse métallique	52,34	37,20	49,74	58,62	57,20	56,59

SUISSE.

Canton des Grisons. { Belluna (1); Alp Er (2); Alp Platz-Raffna (3).

	(1)	(2)	(3)
Silice et argile	10,60	30,60	30,00
Peroxyde de fer	2,00	3,00	6,60
Oxyde rouge de manganèse	73,00	60,00	58,60
Chaux	4,60	2,30	»
Magnésie	1,00	0,60	»
Perte par calcination	8,60	3,30	4,50
Total	99,80	99,80	99,70
Manganèse métallique	52,63	43,26	42,25

TURQUIE D'EUROPE.

Bosnie. — Province de Kressowo. — Semernica (1).
Thrace. — Mont Rhodope (2 et 3).

	(1)	(2)	(3)
Silice et argile	7,80	5,00	3,30
Peroxyde de fer	6,60	0,60	1,60
Oxyde rouge de manganèse	74,50	82,30	82,00
Chaux	»	»	»
Acide phosphorique	»	»	»
Perte par calcination	10,80	12,00	12,80
Total	99,70	99,90	99,70
Manganèse métallique	53,71	59,26	59,12

TURQUIE D'ASIE. — VILLAYET DE SMYRNE.

Arrondissement d'Aïdin. — Canton de Serdikeni. — Gumuldar (antique Lebedos).

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Silice et argile	2,30	4,60	12,60	2,00	17,00	7,00	21,00
Peroxyde de fer	4,60	4,80	0,80	6,00	16,00	9,30	6,30
Oxyde rouge de manganèse	75,30	78,30	72,30	73,00	49,50	64,00	61,00
Chaux	3,00	»	»	traces	traces	2,30	traces
Magnésie	»	»	»	0,30	0,80	0,60	traces
Acide phosphorique	»	»	0,04	0,03	0,03	0,03	traces
Perte par calcination	14,60	19,00	14,00	18,50	16,50	16,60	11,00
Total	99,80	99,70	99,74	99,83	99,83	99,83	99,80
Manganèse métallique	54,10	56,45	52,00	52,56	35,51	56,08	43,32

L'EXPLOITATION DE L'ANTHRACITE EN PENNSYLVANIE ET SES DÉCHETS

D'APRÈS LE RAPPORT OFFICIEL AMÉRICAIN

Par M. Ed. SAUVAGE, Ingénieur des mines.

De nombreuses publications ont décrit l'exploitation du grand bassin anthracifère de Pennsylvanie. L'une des plus importantes et des plus complètes est celle de M. H. M. Chance, avec un atlas et de nombreuses figures dans le texte, éditée en 1883 par le service de la carte géologique de l'État (*Report on the Mining Methods and appliances used in the anthracite Coal-fields*). M. Ch. de Sinner, ancien élève de l'École des mines de Paris, a publié en 1886, à Lausanne, une brochure sur l'*Industrie des anthracites aux États-Unis*, riche en renseignements fort bien condensés, sur l'exploitation et la préparation de ce combustible, la statistique de la production, les quantités perdues dans les travaux ou en menus non utilisés. Je rappellerai que les *Annales des mines* (*) ont donné, en 1875, une notice que j'avais rédigée sur l'anthracite de Pennsylvanie.

On se préoccupe beaucoup aux États-Unis des pertes

(*) 7e série, t. VII, p. 222.

considérables qui se produisent dans l'exploitation de ce précieux combustible ; l'État de Pennsylvanie a nommé une Commission pour étudier la question et les moyens d'utiliser les déchets d'anthracite. Cette Commission, composée de MM. Eckley B. Coxe, ancien élève de l'École des mines de Paris, Heber S. Thompson et W. Griffith (ces deux derniers en remplacement de MM. J.-A. Price et P. W. Sheafer, décédés pendant le cours du travail) vient de publier (mai 1893) un important rapport ; nous pensons qu'un extrait de ce grand travail intéressera les lecteurs des *Annales*.

La production de l'anthracite est énorme en Pennsylvanie : elle dépasse, non seulement la production, mais même la consommation de la France entière. D'après la statistique officielle, la France a produit, en 1891, 26 millions de tonnes, et en a consommé 36.500.000. Or les expéditions du seul bassin anthracifère de Pennsylvanie se sont élevées, dans la même année, à 40.500.000 tonnes. Il faudrait y ajouter la consommation sur le carreau des mines. Il est vrai, qu'aux erreurs inévitables d'une telle statistique, s'ajoute une incertitude sur la valeur de la tonne aux États-Unis, qui est tantôt de 2.000 livres ou 906 kilogrammes (*net ton*) ou de 2.240 livres ou 1.016 kilogrammes (*gross ton*).

Le tableau qui suit montre l'accroissement rapide de la consommation d'anthracite, depuis le début de l'exploitation en 1820. Les causes que nous venons de signaler peuvent expliquer pourquoi les chiffres de ce tableau ne sont pas exactement d'accord avec ceux des statistiques déjà publiées, notamment dans les *Annales*. Les chiffres indiquent seulement les expéditions annuelles ; ils doivent être majorés d'un dixième, pour tenir compte de la consommation à pied d'œuvre. On estime d'ailleurs qu'on n'a utilisé que les quatre dixièmes des parties de gîtes exploitées.

	Milliers de tonnes.		Milliers de tonnes.
1820.	0,365	1881.	28.500
1825.	35	1882.	29.120
1830.	175	1883.	34.793
1835.	561	1884.	30.718
1840.	864	1885.	31.624
1845.	2.013	1886.	32.136
1850.	3.359	1887.	34.641
1855.	6.609	1888.	38.146
1860.	8.513	1889.	35.408
1865.	9.652	1890.	35.855
1870.	16.182	1891.	40.448
1875.	19.712	1892.	41.893
1880.	23.437		

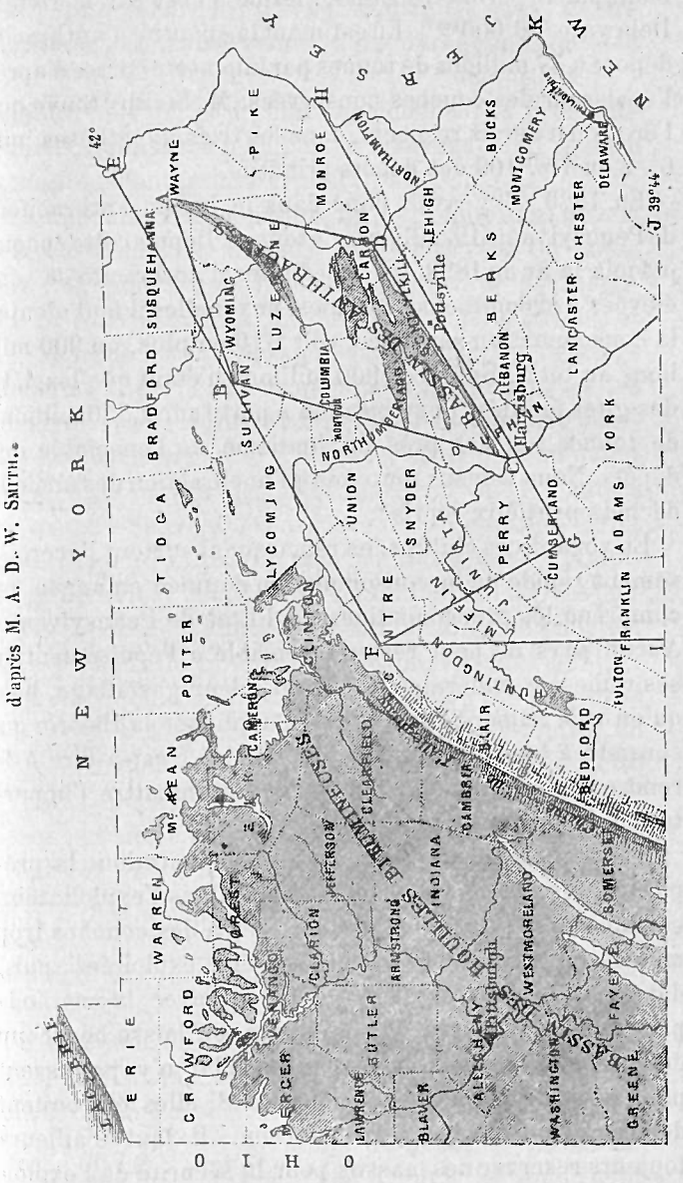
Cette énorme consommation s'explique non seulement par les emplois industriels, mais par l'usage de l'anthracite pour le chauffage dans une grande partie des États-Unis. Des transports à prix très bas, par eau et par chemin de fer, amènent le combustible à une énorme distance des mines. Pour donner une idée de cette diffusion, sur une vaste surface, j'extrais quelques chiffres d'un tableau, que M. E. B. Coxe a bien voulu dresser pour moi, du prix au détail de l'anthracite dans les diverses villes.

Le prix s'applique à la tonne de 2.000 livres (906^{kg}) rendue à domicile, mais non mise en cave, pour la qualité *stove*. Le *chesnut* coûte généralement le même prix, quelquefois un quart de dollar en moins. Les chiffres sont déjà un peu anciens, car ils s'appliquent à l'année 1886 ; mais il est probable que depuis cette époque ils ont dû conserver à peu près la même proportion. La conversion en francs a été faite en prenant le dollar égal à 5 francs. Enfin les distances sont estimées en ligne droite depuis le centre du bassin anthracifère ; les distances parcourues sont donc en général plus grandes :

			Fr.
Harrisburg	(100km)	. . . . .	25,00
Philadelphie	(130km)	. . . . .	26,00
Baltimore	(150km)	. . . . .	28,75
New-York	(190km)	. . . . .	23,75 à 26,25
Buffalo	(340km)	. . . . .	23,75
Portsmouth	(480km)	. . . . .	27,50
Boston	(500km)	. . . . .	25,00
Portland (Maine)	(550km)	. . . . .	27,50
Dayton (Ohio)	(670km)	. . . . .	32,50
Cincinnati	(700km)	. . . . .	30,00
Chicago	(1.000km)	. . . . .	31,25
Saint-Louis	(1.250km)	. . . . .	31,25
Kansas City	(1.550km)	. . . . .	43,75
Omaha	(1.650km)	. . . . .	45,00
Colombus (Nebraska)	(1.800km)	. . . . .	50,00
Yankton (Dakota)	(1.800km)	. . . . .	50,00
Grand Island (Neb.)	(1.850km)	. . . . .	50,00

La Commission s'est d'abord demandé quelles étaient les ressources totales du bassin mises à la disposition de l'homme. Elle a eu recours aux évaluations du géologue A. D. W. Smith. Les terrains anthracifères couvrent actuellement (voir la petite carte de Pennsylvanie ci-contre) 1.240 kilomètres carrés ; d'après un grand nombre de relevés faits dans les différentes mines, leur contenance, avant le début de l'exploitation, aurait été de 19 milliards 500 millions de tonnes. La Commission croit ce chiffre un peu trop fort ; elle pense notamment, à la suite des recherches de M. E. B. Coxe, que les chiffres admis pour la densité de l'anthracite en place (souvent 1,55) dépassent un peu les moyennes réelles.

Quelles ont été les quantités d'anthracite primitivement déposées ? M. Smith a fait trois hypothèses : les dépôts primitifs n'auraient couvert que le quadrilatère ABCD (voir la carte) dont la surface est de 8.500 kilomètres carrés ; ils auraient été limités par le périmètre EFGH, sur une superficie de 23.000 kilomètres carrés ;



ESQUISSE DE LA CARTE DES BASSINS HOUILLERS DE PENNSYLVANIE
d'après M. A. D. W. Smith.

enfin par le périmètre EFIJK, fermé à l'est par la rivière Delaware (46.000$^{km^2}$). En estimant la quantité d'anthracite déposé à 37 millions de tonnes par kilomètre carré, d'après l'épaisseur des couches conservées, M. Smith trouve que l'érosion n'aurait respecté, dans les trois hypothèses, que 6, 2 ou 1 p. 100 des dépôts primitifs.

En 1820, il y avait donc dans le bassin anthracifère de Pennsylvanie 19 milliards de tonnes. Depuis cette époque jusqu'à la fin de 1892, les expéditions d'anthracite se sont élevées à 820 millions de tonnes, auxquelles il faut ajouter la consommation sur place, soit 1/10 en plus, ou 900 millions au total. Enfin ces 900 millions n'étant que les 4/10 des gîtes fouillés, l'exploitation a porté sur 2.250 millions de tonnes, ou sur près du huitième de l'ensemble des dépôts. Nous verrons toutefois qu'une fraction des anciens déchets peut être reprise.

En voyant ces chiffres, en remarquant surtout l'accroissement rapide de la consommation d'année en année, on comprend les préoccupations de l'État de Pennsylvanie. Aucun pays ne peut rester insensible à l'épuisement de ses richesses minérales ni surtout à leur gaspillage, bien qu'on voie aujourd'hui des États appliquer la théorie qui consiste à *protéger* le travail national, c'est-à-dire à le rendre moins productif, au point de combattre l'importation des houilles étrangères !

Les déchets se produisent dans l'exploitation, la préparation et l'emploi des anthracites. Dans l'exploitation, certaines pertes sont inévitables : il y a des couches trop minces ou trop tourmentées pour être exploitées ; puis, dans les couches exploitées, surtout avec la méthode par piliers adoptée en Pennsylvanie, on laisse beaucoup de charbon ; les méthodes par remblai n'y paraissent pas aisément applicables : en général, elles élèveraient démesurément le prix du charbon. Il faut d'ailleurs toujours réserver des massifs pour la sécurité de l'exploitation, pour défendre les travaux contre les eaux, contre le grisou, ou pour conserver certains ouvrages à la surface du sol.

La nature du toit et du mur des couches, la proximité des veines, leur forte inclinaison, peuvent aussi réduire les quantités d'anthracite exploitables.

Dans une mine bien conduite, on détermine dès l'ouverture des travaux les massifs ainsi réservés. On laisse ensuite aux piliers une dimension suffisante pour supporter le toit jusqu'à la fin du traçage du quartier, et on en reprend la plus grande partie par un dépilage méthodique. Les piliers trop minces s'écrasent et les éboulements prématurés font perdre beaucoup de charbon. Il faut bien se garder d'attaquer seulement au début les meilleures parties des gîtes, en réservant les autres pour l'avenir. Souvent les ateliers de préparation n'ont pas une capacité suffisante pour permettre une exploitation régulière ; leur insuffisance conduit à délaisser les portions des couches où l'anthracite est mélangé de schistes.

Nous parlions de la difficulté d'exploiter par remblai : le rapport cite une méthode curieuse qui a été employée avec succès, près de Shenandoah City, pour mettre fin aux éboulements qui menaçaient une partie de cette ville : d'anciennes haldes des exploitations, composées de matières pulvérulentes, en partie de poussiers d'anthracite, ont été entraînées par un courant d'eau dans les vieux travaux, et ont si bien rempli les vides, qu'on peut reprendre l'exploitation de piliers abandonnés.

La préparation de l'anthracite est, de son côté, cause de déchets considérables. Pour que le combustible brûle bien, il convient que tous les fragments soient de même grosseur. Ce travail se fait dans de vastes ateliers dits *Breakers* ou concasseurs. On distingue (voir *Annales*, mém. précité, p. 232) le *lump* ou gros, le *steamboat* (pour bateaux), le *broken*, l'*egg* (œuf), le *stove* (pour

poêles), le *chesnut* (châtaigne), le *pea* (pois), le *buckwheat* (sarrasin), qui se subdivise en trois catégories. Les poussiers et les dernières catégories ont été pendant longtemps rejetés.

A la sortie de la mine, la proportion des quatre plus grosses sortes est en général bien plus forte que celle qui est demandée, tandis que les catégories *stove* et *chesnut* font défaut. Il faut alors concasser une portion des gros morceaux, ce qui produit en outre des menus (*pea, buckwheat*) et poussiers difficiles à vendre.

Ce concassage est une cause importante de déchets : l'opération doit être faite avec soin, à l'aide d'appareils convenables. Le mieux paraît être de concasser par degrés successifs, en passant seulement d'une catégorie à la suivante, à l'aide de cylindres munis de dents d'acier rapprochées et toujours entretenues en bon état. Suivant la nature des charbons, d'autres sortes de concasseurs peuvent être préférables : c'est un travail qu'il faut toujours suivre avec attention.

Le criblage est aussi une cause de déchets par le frottement des morceaux entre eux : il faut disposer les appareils de manière à réduire autant que possible ce frottement (cribles de faible largeur, cribles superposés, trommels). De même les coulottes et trémies doivent éviter les chocs et les chutes de fragments d'anthracite. Il est difficile de bien disposer à cet effet les trémies de chargement dans les wagons, à cause de la différence de la hauteur des wagons , et surtout dans les bateaux.

Une cause importante de déchet provient de l'abondance des anthracites barrés ou mélangés de schistes, qu'on a longtemps rejetés. Depuis quelques années, on a commencé à les traiter avec succès : les morceaux qu'on jetait sont parfois pour les trois quarts de leur poids du bon combustible, qu'on peut séparer : l'introduction des bacs à piston et des cuves à feldspath, des nettoyeurs

automatiques, a permis de préparer sans beaucoup de peine des matières bien plus pauvres.

Les cribles ont aussi été perfectionnés, surtout par l'emploi des tôles perforées en acier ou en cuivre, au lieu de toiles métalliques. Ces tôles s'usent moins et la dimension des ouvertures ne varie pas autant.

La commission attache une grande importance au traitement de ces charbons impurs, qui donne aux exploitants l'avantage d'augmenter la production de leurs mines et de tirer meilleur parti de leurs coûteuses installations, sans immobiliser de nouveaux capitaux.

Afin d'étudier de près les résultats de la préparation dans un atelier muni des derniers perfectionnements pour recueillir les menus, M. E. B. Coxe a suivi la marche du grand *Breaker* de Drifton (voir la description de cet atelier dans les mémoires de l'*American institute of mining engineers*, septembre 1890, p. 398) depuis le 20 septembre (à 4 heures de l'après-midi) jusqu'au 24 (à 9 heures du matin.)

Pendant cette période, le *Breaker* a reçu 8.160 tonnes (probablement de 2.000 livres) et il a produit :

Lump	662	tonnes.
Steamer	294	—
Broken	1.086	—
Egg	1.081	—
Stove	813	—
Chesnut	771	—
Pea	636	—
Buckwheat n° 1	511	—
— n° 2	440	—
— n° 3	452	—
Total du charbon marchand.	6.746	tonnes.
Déchets	1.414	—
Total	8.160	tonnes.

Les déchets, qui forment les 17/100 de l'extraction totale, se composent de gros morceaux de schistes, de

morceaux mélangés de schiste et d'anthracite, de fragments d'anthracite pur, enfin de menus passant à travers des trous ronds de $2^{mm},4$ de diamètre. La proportion des morceaux d'anthracite mélangé ou pur qui sont rejetés augmente avec la finesse des fragments. Les menus forment à peu près les 4/10 de l'ensemble de ces matières et ces menus contiennent environ 75 p. 100 d'anthracite. Enfin la proportion totale d'anthracite dans les 1.414 tonnes de déchets est de 48 p. 100 : on rejette donc 680 tonnes, environ le dixième de la production. Ce charbon est en partie utilisable, sur le carreau de la mine, ou dans le voisinage.

La perte due au traitement était autrefois bien plus considérable, et les anciennes haldes renferment une plus forte proportion d'anthracite. Sauf à la surface, ce combustible ne s'est pas trop altéré, et peut être repris. Malheureusement, bien souvent les roches stériles, les morceaux barrés, les menus ont été jetés pêle-mêle, souvent avec d'autres matières, telles que les cendres des foyers; parfois le feu s'est mis dans les tas; d'autres fois les eaux les ont ravinés, et ont entraîné les menus. En quelques endroits, notamment à Northumberland sur la Susquehanna, ces menus ont formé des alluvions exploitables. En hiver, on les dragues à la main en perçant un trou dans la glace.

Quelques précautions, faciles à prendre, éviteraient à l'avenir ces inconvénients pour les matières qu'on rejette encore aujourd'hui comme stériles, et la Commission recommande ces précautions.

Aux pertes dans la préparation, il faut joindre celles qui sont dues aux manutentions subséquentes, aux déchargements et rechargements des wagons en bateaux et réciproquement, à la mise en entrepôt. Pendant l'été, on fait de grands approvisionnements des anthracites expédiés au loin. Ces déchets de transport sont au total de 5 à 11 p. 100 du poids expédié.

Il est donc important de réduire autant que possible les approvisionnements et de manier le combustible avec précaution.

C'est surtout dans l'emploi des anthracites qu'on peut réaliser d'importantes économies, en étendant la consommation des menus à la place des criblés. Autrefois, on jetait à peu près tout ce qui était au-dessous du *pea* : puis on a commencé à brûler ces résidus sur le carreau des mines, sans beaucoup s'occuper de leur préparation. Petit à petit, la demande croissante de ces menus les a fait préparer plus soigneusement. Il est important que la grosseur des grains soit uniforme : de là vient la récente classification du *buckwheat* en trois grosseurs.

Pour que la zone d'emploi des menus puisse s'étendre, il faut que l'expédition à grande distance n'en augmente pas trop le prix : c'est ce que les entreprises de transport ont admis, depuis quelques années, en réduisant leurs tarifs pour le *pea coal* et encore davantage pour le *buckwheat* plus fin. Cette réduction de taxes a contribué à étendre l'emploi de ces anthracites.

La classification des combustibles fins n'est pas exactement la même sur toutes les mines. Le rapport donne une liste étendue des dimensions de cribles adoptées. On peut les définir en moyenne comme il suit :

Le *pea coal* traverse généralement des trous carrés de 19 à 22 millimètres de côté ou ronds de même diamètre, et reste sur des tôles percées de trous de 10 à 12 millimètres (carrés ou ronds);

Le *buckwheat* n° 1 traverse des trous de 9 à 15 millimètres et reste sur ceux de 6 à 9 millimètres;

Le *buckwheat* n° 2 traverse les trous de 6 à 9 millimètres et reste sur ceux de 3 à 5 millimètres;

Le *buckwheat* n° 3 traverse les trous de 3 à 8 millimètres et reste sur ceux de $1^{mm},5$ à $2^{mm},5$;

Enfin les poussiers traversent des trous qui ont souvent moins de 2 millimètres de diamètre.

Les emplois de ces menus sont les suivants :

1° *Usages domestiques.* — Le *pea* peut s'employer dans les foyers domestiques soit seul, soit pour couvrir le feu, surtout la nuit. Quand on sait s'en servir, il est d'un excellent usage dans les fourneaux de cuisine. La consommation de ce combustible se développe beaucoup.

Le *buckwheat* des divers numéros peut servir dans les calorifères. On l'emploie souvent pour produire la vapeur distribuée dans les villes pour le chauffage privé.

2° *Production de la vapeur.* — Le *pea* est excellent pour la production de la vapeur. On s'en sert beaucoup sur les bateaux à vapeur. C'est un combustible bien propre, brûlant parfaitement avec le tirage naturel. Le *buckwheat* n° 1 le remplace de plus en plus. On commence aussi à brûler les numéros 2 et 3, seuls ou mélangés à d'autres menus, ou à la sciure de bois.

3° *Locomotives.* — Les menus anthracites sont brûlés dans un grand nombre de locomotives, le *buckwheat* pour le service des marchandises, et le *pea* pour celui des voyageurs. Beaucoup de ces locomotives sont munies de la vaste grille Wootten, analogue à celle de M. Belpaire en Belgique. La plupart des compagnies de chemins de fer usant de ces menus, s'en déclarent fort satisfaites et ne voient pas que la consommation en soit plus forte qu'avec le gros. Les cendres dans ces menus forment en général 12 à 15 p. 100 du poids total. Le combustible doit être chargé fréquemment et régulièrement en couches minces.

4° *Générateurs à gaz.* — Après quelques essais, d'abord infructueux, on a réussi à utiliser le *pea* et les numéros 1 et 2 de *buckwheat* dans des générateurs à gaz. Le principal est de n'y laisser qu'une faible proportion de cendres, grâce à un bon lavage.

5° *Fabrication du coke.* — En mélangeant les poussiers d'anthracite avec des charbons gras, on a obtenu des cokes d'assez bonne qualité, mais cette fabrication ne paraît pas se développer.

6° *Emploi en mélange avec des charbons gras.* — Le poussier d'anthracite peut brûler avec les charbons gras. A New-York ce mélange est fort employé ; la proportion de charbon gras descend jusqu'à un dixième du total.

7° *Emploi en mélange avec des résidus de pétrole.* — Les menus anthracites se mélangent bien avec les résidus épais des raffineries de pétrole.

8° *Fabrication des briquettes.* — Les menus anthracites servent à la fabrication des briquettes, surtout pour l'usage domestique. Les grosses briquettes, pour l'industrie, se sont peu répandues. Le rapport donne une liste de 89 brevets, pris depuis 1837, relatifs à la fabrication de ces briquettes : les inventeurs ont prévu l'emploi des éléments agglutinants les plus variés, depuis le plâtre jusqu'à l'écorce d'Eucalyptus et le sang de bœuf. C'est surtout sur les ports d'embarquement et aux points de grande manutention que les fabriques de briquettes se sont installées.

9° *Emploi en poudre.* — Depuis 36 ans, plusieurs essais ont été tentés pour brûler les menus à l'état pulvérulent, en les insufflant dans un fourneau. Ces procédés ne sont pas répandus en pratique. La difficulté paraît être d'obtenir une poudre assez fine.

10° *Emploi comme peinture.* — Certains anthracites en poudre donnent une belle couleur noire.

M. John R. Wagner a fait, pour MM. Coxe frères, une série d'expériences sur la combustion des menus anthracites. Il a trouvé que l'emploi d'un souffleur à vapeur sous la grille était le plus commode : avec un ventilateur, la combustion est un peu plus complète ; il reste moins de charbon avec les cendres ; mais les mâchefers sont

plus abondants. Ce fait tient peut-être au refroidissement dû à la décomposition de la vapeur. Si les menus sont mélangés de poussiers, ces poussiers tombent en grande partie à travers la grille, sans brûler.

La substitution progressive des anthracites en petits morceaux aux sortes plus grosses, à cause de leur bas prix, est un fait remarquable. Souvent cette substitution s'est faite sans que les appareils de combustion aient été modifiés : aussi ne conviennent-ils pas toujours bien à l'emploi des menus, pour lesquels les grilles doivent laisser passer beaucoup d'air, tout en retenant les petits fragments.

La bonne combustion des menus exige généralement le tirage forcé. Ils doivent être chargés en couche aussi mince que possible, et l'on doit éviter de les déplacer sur les grilles. La consommation par mètre carré de grille décroît avec la grosseur des grains.

La construction des grilles a exercé la sagacité des inventeurs. Le rapport en cite plusieurs centaines, qu'il range en trois catégories, les grilles fixes (barreaux ou fonte perforée) ; les grilles mobiles, où la mobilité ne sert qu'à faire tomber les cendres ; et les grilles mobiles qui conduisent progressivement le combustible d'une extrémité à l'autre du fourneau. Un bon lavage des menus est d'ailleurs nécessaire.

En résumé, la Commission recommande de bien diriger l'exploitation des mines ; d'améliorer la préparation, surtout en traitant les morceaux d'anthracite mélangé de schiste et en lavant avec soin les menus ; accessoirement, si l'on rejette des matières qui pourraient être utilisables plus tard, d'en prévoir la reprise ; enfin et surtout, de développer l'emploi des menus, qui n'est pas si difficile qu'on le croit encore trop souvent.

BULLETIN.

L'INDUSTRIE MINÉRALE EN GRÈCE.

L'industrie minérale ne compte en Grèce que peu d'années d'existence. Le Laurium, qui en est le centre principal, n'a vu en effet qu'en 1864 ses exploitations remises en activité.

Voici, au surplus, la liste des mines qui se trouvent aujourd'hui en cours d'exploitation :

1) Compagnie française des mines du Laurium (fer oligiste, galène, smithsonite, blende, plomb d'œuvre).
2) Compagnie hellénique des usines de Laurium (oligiste, plomb d'œuvre).
3) Mine d'oligiste de M. Serpieri, à Laurium.
4) Compagnie française de Sunium (oligiste).
5) Compagnie française de Sériphos et Spiliazeza (mine d'oligiste à Sériphos).
6) Mine d'acerdèse de Milo.
7) Compagnie française des mines de Siphnos-Eubée.
8) Mines de soufre de Milo.
9) Mines de lignite de Kymi.
10) Mines de lignite d'Oropos.
11) Mine de giobertite d'Eubée.
12) Mines de chromite de Volos.
13) Mines d'émeri de Naxos (propriété de l'État).
14) Minières de pierre meulière de Milo (propriété de l'État).
15) Minières de gypse (propriété de l'État).
16) Pouzzolane de l'île de Santorin.
17) Salines appartenant à l'État.

Mines du Laurium.

Les gîtes du Laurium sont des gîtes de contact compris entre des couches alternantes de micaschistes et de calcaires cristallins traversées par des roches éruptives telles que granites, trachytes,

diorites, gabbros, etc. On connaît trois de ces gîtes : le gîte supérieur, composé surtout d'oligiste imprégné de galène et de cérusite, le moyen de minerais de fer et de galène, et le troisième de galène et de cérusite. Dans le calcaire qui forme le soubassement de ce dernier gîte, il y a plusieurs amas de smithsonite irréguliers ou en forme de nids; enfin dans les couches moyennes de calcaire, il y a des amas et des veines de galène et de blende.

Société hellénique des usines de Laurium. — Cette Société exploite au Laurium, en outre des anciennes scories ou *ekvolades*, les mines Nikias et les mines de l'Olympe lauréotique. Les *mines Nikias*, situées au nord du Laurium, près du village Dascalio, se composent de riches gîtes d'oligiste manganésifère et de galène argentifère qui forment le second gîte de contact. La Société travaille à deux endroits principaux : à Dascalio, où il y a un riche gîte d'oligiste que l'on exporte à l'étranger, et dans la localité Démosthène, où il y a un gîte d'oligiste de forme très régulière et d'une épaisseur de 1 mètre à 3 mètres et demi avec de riches imprégnations et des nids de galène et de cérusite. Quand il est riche, l'oligiste est vendu à l'étranger; dans le cas contraire, il est transporté avec les minerais de plomb aux usines de la société, où il est employé pour la fonte des ekvolades.

Cette mine produit annuellement 50.000 tonnes d'oligiste manganésifère, contenant 34 p. 100 de fer et 18 à 20 p. 100 de manganèse et 15.000 tonnes d'oligiste mêlé de minerais de plomb, contenant 4 à 6,5 p. 100 de plomb d'une teneur de 1.800 à 2.000 grammes d'argent par tonne, enfin 500 tonnes environ de galène, contenant 30 à 45 p. 100 de plomb d'une teneur de 2.000 grammes d'argent.

Les *mines de l'Olympe lauréotique* sont situées sur divers points du district du Laurium. On en extrait des minerais de fer et de plomb que la Société utilise pour la fonte des ekvolades. L'exploitation en est encore à ses débuts; elle porte: à Sunium, à Spitharopusi et à Pachalimani, sur le premier gîte de contact, c'est-à-dire sur des oligistes accompagnés de galènes, plus ou moins riches en argent; à Ary, sur un gîte de minerais de fer de 3 à 35 mètres de puissance et très étendu, enclavé dans les calcaires et renfermant des nids de galène argentifère, de blende et de cérusite intimement associées.

Ces mines produisent mensuellement 750 tonnes de minerai de fer contenant une quantité de 6 à 8 p. 100 de plomb d'une

teneur de 800 à 1.000 grammes d'argent; ce minerai est fondu avec les ekvolades dans les fours de la Société.

Les ekvolades sont d'abord traitées dans deux laveries, d'où elles sortent enrichies à une teneur de 12 à 15 p. 100 de plomb; les matières fines sont agglomérées sous forme de briquettes pour être passées dans les fours de fusion.

Ces fours, du système Pilz, ont $6^{m},10$ de hauteur, avec une capacité de 14 à 16 mètres cubes; ils sont au nombre de quatorze; chacun d'eux passe en vingt-quatre heures 24 à 25 tonnes avec une consommation de coke de 13 p. 100. Comme les matières à fondre contiennent beaucoup de silice, on y ajoute des minerais de fer.

Le lit de fusion se compose de :

Anciennes scories	26,00
Produits du lavage	5,90
Briquettes	31,50
Galène de l'Asie Mineure	2,00
Scorie de fer	19,50
Oligiste plombifère	15,10
	100,00

Il renferme, au total, 10,25 p. 100 de plomb, d'une teneur de 1.130 à 1.140 grammes d'argent à la tonne. La production annuelle des usines est d'environ 10.000 tonnes de plomb d'œuvre, qui sont exportées en Angleterre. Les pertes du traitement sont estimées, pour le plomb, de 20 à 24 p. 100, et pour l'argent, de 12 à 18 p. 100.

Société française des mines du Laurium. — C'est elle qui exploite la plus grande et la meilleure part du district du Laurium. Ses mines principales sont au nombre de deux : celle de Camareza et celle de Plaka, situées l'une et l'autre non loin de la ville de Laurium.

Les gîtes y sont composés principalement d'oligiste manganésifère, de galène, de calamine et de blende. La mine de Camareza, qui est la plus importante, a une profondeur de 175 mètres, comprenant trois étages et 105 chantiers, avec une étendue de galeries de 80 kilomètres; elle occupe 1.400 ouvriers. La mine de Plaka possède environ 75 chantiers et emploie 300 ouvriers.

La laverie se trouve près du village d'Ergastiria; les minerais y sont pulvérisés au moyen de broyeurs et de concasseurs, d'où ils passent d'abord dans des trommels, puis sur des tables à

secousses. Le personnel est d'environ 300 ouvriers, et la production journalière est de 450 tonnes.

Les minerais riches sont envoyés à l'étranger; les minerais pauvres, d'une teneur de 8 à 10 p. 100, sont fondus aux usines d'Ergastiria, qui produisent par jour 12 à 15 tonnes de plomb d'œuvre. La smithsonite est calcinée sur place dans des fours spéciaux et expédiée ensuite en Belgique.

Mines de Sériphos et de Milo.

Mines de fer de Sériphos. — La petite île de Sériphos, l'une des Cyclades, est riche en minerais de fer. Ces minerais appartiennent à la Société française de Sériphos et Spiliazeza et sont exploités à ciel ouvert; ils se composent principalement de fer oligiste d'une teneur de 47 à 55 p. 100 de fer, et de magnétite contenant 65 p. 100 de fer, enfin d'un peu de pyrite; ils contiennent en outre de 2 à 2,5 p. 100 de manganèse. Ces minerais sont vendus à l'étranger, et on en exporte annuellement une quantité moyenne de plus de 60.000 tonnes.

Mines d'acerdèse de Milo. — A l'extrémité N.-O. de l'île de Milo, sur le cap Vani, se trouve du minerai de manganèse, composé surtout d'acerdèse. Ce minerai se présente en strates entre des couches de liparite et de barytine. Il est exploité à ciel ouvert par 300 ouvriers environ et expédié ensuite à l'étranger. L'exportation annuelle en est de plus de 10.000 tonnes.

Mines de soufre de Milo. — Des amas de soufre se trouvent à l'est de l'île dans des trachytes, et atteignent parfois une profondeur de 10 mètres sur une étendue de plus de 200 mètres. La teneur en est de 20 à 30 p. 100 de soufre pur. Ce soufre est exploité par la Société des travaux publics et communaux. La distillation en est faite dans des fours du système Doppioni. L'extraction annuelle est de près de 2.000 tonnes, employées presque en entier dans le pays pour le soufrage des vignes.

Minerais d'argent de Milo. — En divers points de l'île de Milo, surtout sur la côte occidentale, on connaît des gîtes importants de barytène argentifère, accompagnés parfois de salbandes argileuses d'une épaisseur pouvant aller jusqu'à 12 mètres et elles-mêmes argentifères; on trouve également de l'argent dans les masses encaissantes de liparite. Ce métal est à l'état de sulfure et si finement disséminé qu'il est invisible à l'œil nu.

La teneur de ces minerais, de découverte récente, varie dans les limites les plus étendues, de quelques grammes à 2 kilogrammes par tonne de minerai.

Mines d'Eubée et d'Oropos.

Mines de giobertite en Eubée. — Ces mines, qui appartiennent à la Société des travaux publics et communaux, se trouvent au nord de l'Eubée, près du village de Mantoudi. La giobertite, d'une texture cryptocristalline, s'y trouve en filons de grandes dimensions dans la serpentine. La teneur en carbonate de magnésie s'élève à 98 p. 100. L'exploitation annuelle est de 5.000 à 6.000 tonnes, exportées entièrement à l'étranger.

Mines de charbon de Kymi en Eubée. — Ces mines, exploitées également par la Société des travaux publics et communaux, sont ouvertes sur des couches de lignites pliocènes de 1 à 3 mètres de puissance; la production annuelle s'élève à 6.000 tonnes.

Mines de charbon d'Oropos. — Ces mines, situées au nord de l'Attique, sont exploitées par la Société hellénique des usines de Laurium : elles fournissent par an 2.500 tonnes environ de lignite.

Émeri de Naxos.

L'île de Naxos est renommée depuis l'antiquité pour son émeri qui, au point de vue de la qualité, occupe le premier rang parmi les produits similaires. L'émeri se trouve au nord-est de l'île entre les villages de Vothri et d'Apiranthos, où il se présente en nombreuses masses lenticulaires dans du calcaire cristallin, dont le soubassement est formé par des micachistes; ces masses ont de grandes dimensions et en général une épaisseur de 5 à 50 mètres; on les évalue à plus de 5 millions de tonnes. Elles se trouvent ordinairement tout près de la surface; mais on présume qu'il doit en exister d'autres dans des régions plus profondes.

L'exploitation, qui est le privilège des paysans des communes d'Apiranthos et de Koronis, se fait à ciel ouvert, et au moyen du feu : les blocs se fendent, et l'on peut ensuite en arracher les fragments au moyen de leviers d'acier. Mais comme cette méthode ne peut être appliquée qu'aux blocs voisins de la surface, on devra recourir à un autre procédé quand on attaquera les masses plus profondes; on compte se servir, au besoin, de ré-

pans armés de diamants et, comme explosif, de dynamite-gomme.

L'émeri de Naxos se compose exclusivement de corindon et de magnétite; le prix qui s'élevait, en 1848, à 780 francs la tonne, en est aujourd'hui tombé à 65 francs, prix sur place et en gros.

Salines.

Il n'y a pas en Grèce de mines de sel gemme exploitables; le sel produit est extrait exclusivement des marais salants ou *salines*, dont les principales sont celle de l'île de Leucade, celle d'Anabyssos près de Laurium, et celle de Missolonghi.

Le tableau suivant résume la statistique de l'industrie minérale de la Grèce de 1888 à 1892 :

ESPÈCES DES PRODUITS	PRODUCTION EN TONNES DES ANNÉES :				
	1888	1889	1890	1891	1892
Plomb d'œuvre	14.543	13.567	14.208	13.242	14.426
Galène	2.620	1.330	1.240	1.350	1.170
Oligiste	123.441	134.340	207.509	180.245	241.403
Smithsonite	32.505	27.625	30.744	25.804	25.300
Blende	10.900	5.400	2.310	2.540	2.395
Acerdèse	1.475	10.660	13.547	13.453	11.716
Barytine argentifère	2.927	1.356	4.581	»	»
Lignite	5 500	3.500	3.500	»	»
Soufre	1.670	1.552	2.044	1.533	1.525
Giobertite	300	1.200	8.734	4.339	2.228
Gypse	86	85	98	95	100
Pierre meulière	18.290	11.503	9.698	13.701	10.290
Emeri	2.222	2.222	11.111	936	1.479
Pouzzolane	28.985	47.928	44.284	14.727	10.809
Chromite	212	395	800	200	1.470
Sel marin	17.500	19.455	18.000	19.772	21.600

(*Extrait du Rapport sur* l'Industrie minérale en Grèce, *présenté par* le Ministre des finances du Royaume de Grèce *à l'Exposition universelle de* 1893 *à Chicago.*)

PRODUCTION MINÉRALE ET MÉTALLURGIQUE DES ILES-BRITANNIQUES PENDANT L'ANNÉE 1892.

DÉSIGNATION DES SUBSTANCES EXTRAITES	QUANTITÉS	VALEUR sur les exploitations	PRIX moyen
1° *Substances minérales.*	ton. mèt.	francs.	fr. c.
Houille	184.695.461	1.665.792.374	9,02
Lignite	4.315	26.784	6,21
Schistes bitumineux	2.123.376	13.177.046	6,20
Pétrole	221	10.315	46,67
Minerai de fer	11.493.678	74.919.339	6,52
Minerai de fer des marais	15.609	193.715	12,41
Pyrites de fer	14.190	175.455	12,36
Minerai de plomb	40.664	7.477.326	183,88
Minerai de zinc	27.310	2.623.684	96,05
Minerai de cuivre	6.091	301.455	49,49
Cuivre de cément	274	78.485	286,44
Minerai d'or	10.150	231.217	22,78
Minerai d'étain	14.558	18.525.729	1.272,54
Wolfram	127	75.660	595,75
Minerai d'uranium	38	18.663	491,13
Minerai d'antimoine	6	2.472	412,00
Minerai de manganèse	6.175	111.825	18,11
Ocre, terre d'ombre	12.325	423.212	34,34
Arsenic	5.196	1.101.761	212,04
Pyrites arsenicales	4.569	125.797	27,53
Spath fluor	174	4.741	27,25
Gypse	149.901	1.468.485	9,79
Barytine	24.635	738.317	29,98
Sulfate de strontiane	5 147	31.929	6,21
Minerai d'aluminium (bauxite)	7 439	47.409	6,37
Schistes alumineux	2.969	9.205	3,10
Argiles (non compris l'argile commune)	3.153.514	22.430.038	7,11
Ardoises	424.933	25.873.753	60,89
Pierres, etc.	»	218.600.302	»
Phosphate de chaux	12.395	561.145	45,27
Sel	1.987.828	21.724.533	10,93
Valeur totale des substances minérales.	»	2.076.882.401	»
2° *Métaux* (*).			
Fonte	6.816.603	435.709.093	64
Plomb	44.936	11 997.912	267
Zinc	22.503	12.151.625	540
Cuivre	79.600	98.783.600	1.241
Étain	11.687	27.756.625	2.375
Antimoine	2,6	2.926	1.125
Argent (en kilogrammes)	17.578	2.364.241	134,50
Or (en kilogrammes)	141	424.695	3.012
Valeur totale des métaux	»	589.190.717	»

(*) Les métaux indiqués au tableau sont obtenus de minerais indigènes; ceux qui sont tirés de minerais importés n'y sont pas compris.

Production de la houille par comté.

COMTÉS	QUANTITÉS	VALEUR sur les exploitations
Angleterre.	ton. mèt.	francs.
Breconshire	217.015	1.878.260
Carmarthenshire	708.053	6.371.253
Cheshire	677.441	6.726.400
Cumberland	1.447.515	11.790.224
Denbighire	2.129.174	18.498.240
Derbyshire	11.319.411	110.050.446
Durham	24.215.372	186.589.666
Flintshire	878.349	7.631.093
Glamorganshire	23.173.247	264.157.381
Gloucestershire	1.246.564	14.058.612
Lancashire	22.713.869	208.226.912
Leicestershire	1.524.239	14.661.420
Monmouthshire	7.526.126	70.835.818
Northumberland	9.681.296	78.603.754
Nottingbamshire	7.274.306	69.970.469
Pembrokeshire	82.237	1 071.724
Shropshire	652.869	6.279.856
Somersetshire	869.381	10.070.900
Staffordshire	14.358.952	129.546.439
Warwickshire	1.815.419	17.274.464
Westmoreland	1.385	12.030
Worcestershire	881.591	7.020.996
Yorkshire	23.560.955	226.625.054
Totaux	156.954.796	1.467.951.411
Écosse.		
Argile et Dumfries	97.311	684.395
Ayrshire	3 636.483	24.447.537
Clackmannan	419.089	3.380.968
Dumbarton	441.743	3.563.712
Edinburgh	943.581	7.026 695
Fife	3.630.999	29.292 803
Haddington	301.747	2.247 052
Kinross, Beebles et Sutherland	19.434	156.793
Lanark	15.497.025	105.471.326
Linlithgow	791.033	5.890.711
Renfrew	75.399	483.493
Stirling — East	1.773.150	13.934.655
Stirling — West		
Totaux	27 626.994	196.580.140
Irlande.		
Connaught	10.199	101.132
Leinster	85.117	993.340
Munster	13 641	126.957
Ulster	4.714	39.394
Totaux	113.671	1.260.823
Totaux généraux	184.695.461 (*)	1.665.792.374 (*)

(*) Production de la houille seulement, non compris 4.315 tonnes de lignite d'une valeur de 26.784 francs, extraites dans le Devonshire (Angleterre).

(*Extrait du* Mineral Statistics of the United Kingdom of Great Britain and Ireland.)

NOTE

SUR L'EXPLOSION DE GRISOU

SURVENUE

AU PUITS DE LA MANUFACTURE

(LOIRE)

LE 6 DÉCEMBRE 1891

ÉCOLE NATIONALE DES MINES BIBLIOTHÈQUE SAINT-ÉTIENNE

Le 6 décembre 1891, entre midi 10 minutes et midi 15 minutes, les travaux souterrains du puits de la Manufacture de la concession du Treuil (Loire) ont été le théâtre d'une catastrophe qui n'a pas fait moins de 72 victimes, dont 62 morts et 10 blessés. La présente note a pour objet de faire connaître les circonstances de l'accident et les résultats auxquels on est arrivé dans la recherche de ses causes.

CONDITIONS GÉNÉRALES DE L'EXPLOITATION.

§ 1. *Description des travaux.* — Le champ d'exploitation dans lequel s'est produite l'explosion est limité au nord par la faille de la République et la concession du Cros, à l'ouest par l'amodiation de Montaud, à l'est par les travaux du Marais, au sud par les exploitations du puits Jabin (Pl. I, *fig.* 1).

La couche exploitée est la 8e du système moyen de

Saint-Étienne. Cette couche, de 3^{m},50 de puissance à l'aval, est séparée, dans la région centrale du champ d'exploitation, par un entre-deux schisteux de 1^{m},50 d'épaisseur, de la petite 8e ou *Crue*, dont l'épaisseur atteint jusqu'à 1^{m},50. Vers le nord, l'épaisseur de la 8e s'abaisse à 2^{m},40 et 2^{m},20, celle de la Crue à 1 mètre; au contraire, celle de l'entre-deux atteint 8^{m},43.

Le relief de la 8me, dans l'étendue des travaux, présente vers le centre un pli synclinal dont la ligne de thalweg, dirigée S.-O.—N.-E., est inclinée au N.-E. La couche se relève, vers le N.-O., de la cote 220 à la la cote 420; un relèvement analogue se produit vers le sud.

Ce champ d'exploitation était desservi par trois puits principaux :

1° Le puits des Mottetières, ouvert à la cote 498,44, a deux recettes, aux cotes 415,15 et 391,50 : ce puits était un puits de retour d'air;

2° Le puits de la Manufacture, ouvert à la cote 504,85, a également deux recettes aux cotes 327 et 316,57 : sur ce puits était installé un ventilateur Guibal; une petite partie de l'extraction (1/5e environ) sortait en outre par ce puits;

3° Le puits du Grand-Treuil, ou du Treuil n° 1, était le puits principal d'extraction : ouvert à la cote 496,35, il a sa recette à la cote 188.

Le même champ d'exploitation était en outre desservi par deux autres puits :

Le puits du Marais, ouvert à la cote 498,09, servant de puits à remblais; et le puits de la Pompe, ouvert à la cote 521,58, qui servait à l'exploitation de la 11e couche et à l'aménagement de la 13e.

La circulation dans ce champ d'exploitation était assurée de la manière suivante :

Les charbons descendaient les plans inclinés Mallet et Pataud, et atteignaient par un travers-bancs au mur de la

couche la recette du puits du Treuil n° 1, à la cote 188. Une autre recette, à la cote 208,60, permettait d'accéder directement entre les deux plans des Artilleurs et du Mitron, qui relient le plan Pataud au puits de la Pompe.

Les remblais étaient introduits par le puits du Marais et remontés le long du plan de Rigaud (ou traînasse) par une chaîne traînante jusqu'au sommet de l'exploitation, pour être ensuite répartis entre les différents chantiers.

Enfin, le niveau supérieur des Mottetières était relié par le plan incliné des Mottetières au niveau de fond de la Manufacture, qui communiquait avec la galerie de recette du puits de la Manufacture par le plan Raymond, d'une part, et par un travers-bancs dit de Bessenet, d'autre part.

A l'époque de l'accident, toute la région de la grande 8e qui avoisine les puits du Treuil et de la Pompe, sauf les massifs réservés sous la Manufacture d'armes, était depuis longtemps épuisée, et l'exploitation était en entier confinée dans l'amont-pendage du gîte au-dessus de la voie de fond de la Manufacture. En aval de la même voie s'étendaient sur près de 112 hectares les vieux travaux abandonnés.

On voit sur le plan (Pl. I, *fig.* 1) que la 8e, qui s'était montrée très grisouteuse dans toute cette région, y avait été entièrement déhouillée. On avait seulement laissé des massifs importants de charbon au S.-O. du plan Mallet pour prévenir toute dislocation de la partie de la surface sur laquelle est bâtie la Manufacture d'armes; l'exploitation y avait été faite par piliers tournés.

Quant à la petite 8e, elle n'avait été enlevée que sur une étendue relativement restreinte, du moins dans la portion du champ d'exploitation située à l'ouest des puits de la Pompe et du Treuil.

§ 2. *Aérage* — Le ventilateur du puits de la Manufacture, qui était soufflant au moment de la catastrophe,

avait été d'abord aspirant. L'aérage était alors descensionnel dans les travaux de l'amont-pendage, c'est-à-dire situés au-dessus du niveau de la recette du puits de la Manufacture, et ascensionnel dans les vieux travaux. Dans ces conditions, le courant d'air entré par le puits des Mottetières subissait un changement de sens vers le sommet des tailles, c'est-à-dire en un point critique sous le rapport des accumulations de grisou. Cette situation provoqua les observations du service des mines: les chantiers en cloches, c'est-à-dire ceux dans lesquels le courant d'air était *descendant* (en donnant à cette expression la signification que lui attribuent les *Principes à consulter*), furent arrêtés, en attendant qu'un travers-bancs pratiqué à un niveau supérieur et aboutissant au puits des Mottetières fût terminé. Lorsque ce percement fut achevé, l'exploitant crut bien faire de rendre l'aérage ascensionnel dans les travaux de l'amont-pendage, et, pour cela, il renversa le sens de la marche du ventilateur du puits de la Manufacture. Le 27 septembre 1891, ce puits devint un puits d'entrée d'air, tandis que le puits des Mottetières devint puits de sortie; mais, si cette modification assurait un aérage ascensionnel à la partie de la mine comprise entre ces deux puits, elle rendait le courant descensionnel dans les vieux travaux.

D'après les jaugeages anémométriques effectués le 27 octobre, les derniers qui aient été inscrits sur le registre d'aérage avant la catastrophe, il entrait par le puits de la Manufacture un volume d'air égal à $16^{m3},540$. Cette masse d'air se divisait en trois parties, dont l'une, la plus considérable, était envoyée aux tailles de l'amont-pendage des Mottetières, tandis qu'une seconde se dirigeait vers le puits du Marais, la troisième descendant par le plan Mallet et se rendant ensuite, en partie, à la 11e couche par le puits de la Pompe; le volume de cette troisième branche du courant, évalué en tête du plan

Mallet, fut trouvé égal à $1^{m3},650$; et si d'autres jaugeages ont accusé un chiffre plus élevé pour la proportion de ce courant qui descendait à la 11e couche, la discordance de ces résultats semble devoir être attribuée à l'afflux d'une certaine quantité d'air par le puits du Treuil.

§ 3. *Incendies des plans Mallet et Pataud.* — Une circonstance cependant donnait un intérêt spécial aux vieux travaux. Au commencement de 1886, le feu avait fait son apparition en grande couche des deux côtés du plan Mallet. Ce plan, tracé primitivement en grande 8e, se trouvait déjà, par suite d'un élevage, en petite couche, et cette circonstance, jointe à la facilité que l'on avait de dériver vers la région incendiée l'eau qui se rendait au puits de la Manufacture, permit de combattre aisément le feu. On l'attaqua de plusieurs côtés à la fois et, après un remblayage soigné des galeries d'attaque, on le défourna par recoupes contiguës prises en montant à partir du niveau. Ce travail fini, on conserva autour de la partie remblayée deux bouts de niveau et une descente, afin d'exercer une surveillance constante sur la région.

Au sud du plan Mallet, on défourna aussi un petit quartier; on se borna ensuite à établir, dans les niveaux qui desservaient auparavant les tailles de l'exploitation située sous la Manufacture d'armes, des barrages, ou plus exactement des anneaux de terre damée, de quelques mètres de longueur.

Terminés en mai 1887, ces travaux n'avaient pas été retouchés depuis; mais en juin 1888 les exploitants, inquiets des dégagements de *mauvais goût* qui se produisaient dans la région, avaient entrepris de nouveaux travaux en amont du plan Pataud. Le feu avait alors apparu, et comme on ne pouvait lutter de vitesse avec lui, on avait dû se borner à barrer le niveau au sud comme au nord. On avait exécuté en même temps deux barrages

en briques dans les niveaux de petite couche aboutissant aux plans des Artilleurs.

Depuis septembre 1888, on n'avait plus fait aucun travail contre le feu, mais la région incendiée du plan Mallet et les barrages du sommet du plan Pataud n'avaient pas cessé d'être l'objet d'une surveillance spéciale. L'existence de cette surveillance se justifiait amplement par ce fait que le barrage de gauche du plan Pataud ne s'était jamais complètement refroidi ; on peut en dire autant, quoique dans une bien moindre mesure, de la partie moyenne du plan Mallet.

ACCIDENT DU 6 DÉCEMBRE 1891.

Le 6 décembre, les ouvriers descendus au puits de la Manufacture et composant le poste du matin n'étaient, à l'exception d'un seul piqueur, que des ouvriers chargés de travaux de réparation et d'entretien. Au nombre de ces travaux figurait le relèvement de rails tombés au fond du puisard ; deux ouvriers étaient affectés à cette opération ; sur leur demande, et pour leur éviter d'être incommodés par le courant d'air froid envoyé sur eux, le gouverneur fit arrêter le ventilateur entre 6 et 7 heures du matin. Leur travail terminé, vers 11^h45^m, le ventilateur avait été remis en marche.

C'est entre midi 10^m et midi 15^m que l'explosion eut lieu, ainsi que les diagrammes de la marche du ventilateur ont permis de le préciser exactement. Elle fut nettement entendue par tout le personnel occupé sur les plâtres des puits du Treuil, de la Pompe, de la Manufacture et des Mottetières. Au Treuil et à la Pompe, on n'entendit qu'une détonation ; on en perçut deux, à quelques secondes d'intervalle, à la Manufacture et aux Mottetières.

Au puits de la Manufacture, le chauffeur crut voir une ueur s'élever au-dessus du puits. Il en sortit, en tout

cas, une fumée intense, telle que, d'après le machiniste, on aurait eu peine à trouver son chemin.

Les tampons qui fermaient le puits de la Manufacture avaient été projetés aux molettes. Le ventilateur n'avait pas été atteint, mais sa vitesse était considérablement ralentie. La fumée disparut en quelques instants au puits de la Manufacture ; elle persista pendant plusieurs heures au puits des Mottetières.

§ 1. *Sauvetage des victimes.* — En quelques instants, tout le personnel occupé sur le plâtre du puits de la Manufacture s'était rassemblé autour de la recette. Le machiniste s'assurait que la cage manœuvrait librement dans le puits ; il parvenait à dégager, avec la cage, l'un des tampons accrochés au chevalement et le remettait en place.

La première cordée fut descendue : elle emportait le gouverneur de la mine, deux sous-gouverneurs et trois ouvriers. La cage arriva à la recette inférieure du puits, mais celle-ci était inabordable, et les premiers sauveteurs durent remonter au jour. Entre temps, un des ouvriers de la mine, blessé par l'explosion, qui avait entendu arriver la cage et s'était dirigé vers le puits sans lumière, était tombé dans le puisard.

Revenus au jour, les premiers sauveteurs prenaient place dans l'autre cage et se faisaient descendre à la recette supérieure de « là-dessus » ; ils purent y prendre pied : deux d'entre eux restèrent près du puits pour remettre la recette en état ; deux autres s'engageaient dans la mine ; ils passaient sur un éboulement dans le travers-bancs de Bessenet, relevaient deux blessés près de l'écurie ; mais, arrêtés du côté de l'est par les fumées qui s'en dégageaient, ils se dirigeaient vers la région de l'ouest, qu'ils parcouraient en grande partie, et ils revenaient n'ayant trouvé que des cadavres ; à ce moment

on parvenait à retirer, vivant encore, l'ouvrier tombé dans le puisard.

Le premier soin des ingénieurs du service des mines, en arrivant sur le plâtre du puits, fut de faire remettre en place le deuxième tampon pour rétablir l'aérage.

Vers 3 heures, une cordée les descendit dans la mine avec un des ingénieurs de l'exploitation. Ils se dirigèrent vers l'écurie située en tête du plan Mallet, et s'engagèrent dans la région ouest de la mine : ils prirent le plan des Mottetières, visitèrent la taille 5, et par la remontée de Chauvet arrivèrent au point culminant de l'amont-pendage, puis parvinrent à la taille 15 par le niveau du bas de la taille 9. Une odeur de *mauvais goût* se faisant alors sentir, on se décida à battre en retraite.

Cette première reconnaissance avait déjà fait retrouver 20 cadavres; elle permettait de conclure qu'il n'y avait probablement plus d'ouvriers encore vivants dans la mine, et que le coup de feu ne provenait pas de l'amont-pendage, les cadavres trouvés dans la remontée de Chauvet étant à peine brûlés, si tant est qu'ils le fussent.

Remontés au jour, les ingénieurs de l'État se réunirent à la lampisterie; là un des ingénieurs de l'exploitation expliqua qu'il y avait eu des feux dans les anciens travaux de l'aval-pendage, et qu'il était possible qu'un barrage eût cédé, causant ainsi la catastrophe.

En présence de cette déclaration, les ingénieurs de l'État décidèrent de commencer un barrage en tête du plan Mallet et de faire remonter au jour tous les ouvriers qui ne seraient pas nécessaires à ce travail.

Ce barrage, en pierres sèches, était fort avancé vers 9^h 1/2 du soir, et l'atmosphère, dans le plan Mallet, près de ce barrage, étant restée respirable, on décida qu'il fallait reprendre l'exploration de la région ouest arrêtée par cette odeur de *mauvais goût* qu'on avait constatée dans l'après-midi.

Au moyen de toiles, on rejeta vers l'ouest tout l'air disponible, et franchissant un éboulement trouvé en tête du plan de la Chopine, on pénétra dans tout le quartier. On retrouva ainsi onze nouveaux cadavres; on constata que les tailles les plus éloignées n'avaient pas été atteintes par le feu, que les bois y étaient blancs, et que toutes les portes avaient été projetées dans un même sens de l'est vers l'ouest. L'enlèvement des cadavres fut décidé.

Une partie de la région est de la mine était restée inabordable; après l'enlèvement des victimes du quartier ouest, on barra le niveau de fond à l'ouest de la remontée des chevaux, de manière à faire passer la plus grande partie de l'air disponible dans le quartier Rigaud et l'on parvint à parcourir toutes les tailles de ce quartier; 21 cadavres y furent trouvés; de ce côté encore les flammes ne s'étaient guère éloignées des grandes voies de la mine.

Vers le soir, — on était au lendemain du jour de l'explosion, — un pointage rigoureux prouvait, d'après le registre de la lampisterie, que 3 victimes manquaient encore pour ce quartier de la Manufacture ; 56 cadavres avaient été remontés au jour.

Cependant on savait que trois hommes devaient se trouver dans le puits de la Pompe en recette de 8e et qu'il leur était impossible de gagner le puits du Grand-Treuil. Le gouverneur de la mine émit l'avis qu'il fallait les dégager en descendant par le puits de la Pompe : il fit enlever les tampons qui le fermaient, et deux piqueurs s'offrirent pour descendre, avant même que l'on se fût assuré que l'air du puits était respirable ; se sentant bientôt indisposés, alourdis par le mauvais air, ils durent se faire remonter au jour et y arrivèrent évanouis, mais encore vivants. Pendant ce temps, les ouvriers emprisonnés à la recette de 8e s'étaient couchés sur les poutrelles qui garnissaient le puits au niveau de la recette et respiraient l'air sain

du bas du puits, tandis que le mauvais air passait sur leur tête pour monter au jour; ces hommes furent plus tard dégagés par la recette inférieure en 9e couche.

Les hommes de 8e dégagés, il ne resta au Treuil que l'équipe qui avait été chargée de relever l'éboulement du travers-bancs; ce travail n'avançait d'ailleurs pas, les fumées qui venaient sur eux incommodant à ce point les ouvriers qu'ils devaient se remplacer toutes les dix minutes; on décida donc d'arrêter momentanément ce travail.

§ 2. *Reprise de la mine.* — En résumé, on était assuré qu'il n'y avait plus que trois cadavres à la Manufacture et trois autres au Treuil, et l'on savait d'une manière à peu près certaine où on les retrouverait; le sauvetage des victimes pouvait donc être considéré comme achevé; il restait à reprendre la mine.

1° Reprise des travaux du Treuil. — Le 10, dans l'après-midi, les ingénieurs de l'État et les ingénieurs de l'exploitation descendirent dans les puits du Treuil nos 2 et 1. Au puits n° 2, ils s'assuraient que le trou de sonde, qui fait communiquer ce puits avec le plan des Artilleurs, aspirait. Au puits n° 1, après s'être assurés de l'état de l'atmosphère, ils descendaient à la recette en couche et, après avoir franchi les nombreux éboulements du plan des Artilleurs, ils parvenaient jusqu'à l'écurie du Treuil; ils y retrouvaient les corps de deux ouvriers. Le chemin leur parut toutefois trop difficile pour qu'on pût songer à y faire passer les cadavres; mais le succès de leur tentative, qu'ils complétèrent en allant jusqu'au bas du faux puits de la Pompe, prouvait qu'on pouvait attaquer à nouveau sans danger l'éboulement du travers-bancs du Treuil.

Pour faciliter encore cette reprise, ils descendirent, le 11 dans l'après-midi, au puits de la Pompe, et ils ouvrirent

la porte qui isolait ce puits des travaux du Treuil, de façon à augmenter l'intensité de l'aérage naturel qui s'était établi entre les deux puits du Treuil et de la Pompe.

2° Barrages de la Manufacture. — Tandis que les travaux du Treuil étaient repris dans ces conditions, ceux de la Manufacture se poursuivaient sans encombre en ce qui concernait la traversée des éboulements, mais ils prenaient, en tant que barrages, beaucoup plus d'importance qu'on ne l'avait supposé tout d'abord. Le 9, un des ingénieurs de l'État avait cru s'apercevoir que le barrage du plan Mallet perdait légèrement et il avait proposé de le redoubler: ce qui donnait à la question de l'étanchéité de ce barrage un intérêt tout spécial, c'est que, d'une part, le plan Mallet et le plan de la Manufacture avaient été l'un et l'autre tracés par galeries conjuguées, dont le remblayage pouvait ne pas présenter toutes les garanties désirables, et que, d'autre part, une galerie remblayée de quelques mètres seulement reliait l'écurie au plan Mallet. On jugea donc nécessaire de faire cinq barrages, afin d'isoler complètement le quartier de la Manufacture: ces barrages n'ont été terminés que le 5 janvier au matin.

L'invasion possible de la région du Treuil par des gaz chargés d'oxyde de carbone provenant des travaux incendiés avait déterminé, dans l'après-midi du 13 décembre, à suspendre les travaux entrepris de ce côté jusqu'à l'achèvement des barrages de la Manufacture. Des analyses quotidiennes de l'air sortant par le puits de la Pompe révélèrent, le 17 et les jours suivants, une teneur assez élevée en oxyde de carbone. Toutefois, cette teneur diminua notablement dans les derniers jours de décembre; elle n'était plus que de 0,011 p. 100 le 30 décembre.

3° Reconnaissance du point d'inflammation. — Les barrages du côté de la Manufacture une fois achevés, les travaux

du côté du Treuil furent repris le 5 janvier 1892. Dès le 8, les éboulements du travers-bancs du mur étaient, sinon entièrement relevés, du moins rendus praticables, et le 9 les cadavres antérieurement reconnus dans l'écurie étaient enlevés.

Mais le plan Pataud était inaccessible à cause du mauvais air; il fallut relever entièrement les éboulements au travers-bancs du Treuil. Ce travail venait d'être achevé, lorsque, dans la nuit du 11 au 12, on constata que l'air du plan Pataud était respirable. On put, dès lors, s'y engager et le corps de la dernière victime qui restât dans la mine fut trouvé à 30 mètres du sommet du plan; sa lampe, qui fut relevée auprès d'elle, soumise à plus de cent essais dans une cloche Marsaut, n'a jamais laissé passer de flamme : elle ne pouvait donc être incriminée.

On était alors parvenu aux barrages que chacun soupçonnait être le point d'origine de l'explosion.

4° Constatations au sommet du plan Pataud. — Le lendemain une reconnaissance détaillée permit de constater les faits suivants.

Deux barrages se trouvaient de part et d'autre du sommet du plan Pataud. Le barrage de droite était froid et intact; le barrage de gauche était chaud et complètement éventré dans sa partie supérieure, sur 8 mètres de long et 1 mètre de haut; le barrage avait été crevé du dehors au dedans; les bois qui soutenaient le barrage n'avaient pas été placés jusqu'au toit, la terre s'était tassée, et le barrage, à son sommet, ne devait avoir que quelques centimètres d'épaisseur (Pl. I, *fig.* 4 à 7).

Des vêtements brûlés près du barrage de droite, des affiches également brûlées dans une petite niche au sommet du plan, de nombreuses exsudations résineuses sur les bois témoignaient du passage des flammes; mais en ce point, on ne constatait aucun éboulement, aucun désordre mécanique appréciable.

A partir de ce sommet du plan Pataud, et sur les 50 ou 60 premiers mètres en descendant le plan, on ne trouvait non plus aucun désordre: la galerie était en parfait état; un peu plus loin, toujours dans le sens de la pente, se trouvaient de petits éboulements, plus loin encore des éboulements plus considérables, dans l'écurie un mur de 1 mètre d'épaisseur renversé du dehors au dedans; et enfin au delà dans le travers-bancs commençaient les éboulements qui, par leur étendue, avaient si longtemps arrêté les travaux. Ainsi, donc, le travail destructif de l'explosion était allé en croissant du sommet du plan vers sa base.

En suivant la galerie qui joint la tête du plan Pataud à la base du plan Mallet, voici ce qu'on observait : une porte, placée au voisinage des barrages, était restée en place; un premier convoi de bennes vides, placé près de la porte, était en ordre; 6 mètres plus loin, un convoi de bennes pleines était dans le même cas, tandis que, 17 mètres au delà, 6 bennes sur 9 d'un convoi de bennes pleines étaient déraillées ou culbutées; plus loin encore, un convoi de bennes vides avait été chassé vers le plan Mallet, comme l'attestait la présence, en arrière, de deux cercles de benne; presque toutes les bennes de ce convoi étaient brisées, culbutées et enchevêtrées les unes dans les autres; puis, au delà, les éboulements commençaient de plus en plus considérables; enfin au sommet de ce plan, resté inabordable, mais visible par les travaux de la Manufacture, une benne avait été lancée en remontant et était venue s'encastrer, l'axe horizontal, dans la charpente du frein.

Il était ainsi démontré que les ravages mécaniques de l'explosion s'étaient propagés dans une direction divergente et avec une intensité croissante à partir des barrages placés au sommet du plan Pataud; c'était donc là que se trouvait le point de l'inflammation première.

Cette exploration avait été particulièrement pénible; sur 27 lampes qui avaient été emportées, 5 seulement avaient pu résister; et c'était seulement l'emploi de la lampe électrique Trouvé qui avait permis de relever le croquis du sommet du plan Pataud; le plan Mallet demeurait toujours inaccessible.

L'exploration de ce plan ne pouvait s'entreprendre sûrement qu'après l'exécution de travaux assez longs. Cette exploration n'aurait d'ailleurs fourni aucun fait essentiel, puisque le centre de l'explosion était déterminé avec certitude; il n'y avait donc pas intérêt à faire davantage. Dans la nuit du 14 au 15, un premier barrage fut établi au pied du plan Pataud; il fut complété ultérieurement conformément aux dispositions des *fig.* 2 et 3 de la Pl. I.

Le 18 janvier, l'enquête était close définitivement.

CAUSES DE L'ACCIDENT.

Les ingénieurs de l'État, après avoir démontré l'inanité de diverses hypothèses mises en avant pour expliquer la catastrophe, sont arrivés à la conclusion qu'elle devait être attribuée à l'arrêt du ventilateur du puits de la Manufacture dans la matinée du 6 décembre.

Cette conclusion découle des considérations suivantes.

Si l'on examine l'ensemble de la mine qui a été le théâtre de la catastrophe, on trouve le puits du Grand-Treuil, de 310 mètres de profondeur, librement ouvert au jour; à l'amont-pendage, le puits des Mottetières, profond de 100 mètres et également ouvert au jour; les deux autres puits, celui de la Manufacture et celui de la Pompe, sont fermés, l'un par des clapets qui se déplacent avec les cages, l'autre par des plafonds fixes.

Les niveaux d'orifice de ces divers puits étant très peu différents, il est certain que, si le ventilateur du puits

de la Manufacture était arrêté et que toutes les portes fussent ouvertes dans la mine, l'air entrerait par le puits du Treuil pour sortir par le puits des Mottetières; en d'autres termes, il se produirait une aspiration des Mottetières vers le Treuil, aspiration que faciliteraient les feux existant au sommet du plan Pataud et au milieu du plan Mallet : le courant serait donc naturellement ascensionnel le long de ces plans.

Le ventilateur du puits de la Manufacture, dont le rôle consiste à déterminer un courant descensionnel sur ce même trajet, doit, par suite, triompher de la résistance que cette tendance naturelle à l'ascension ne manque pas de lui opposer, et c'est précisément cette tendance qui reprendra le dessus si la marche du ventilateur vient à subir un arrêt.

Le refoulement de l'air, produit dans les plans inclinés par la marche du ventilateur, a, d'autre part, pour effet de maintenir à droite et à gauche de ces plans les gaz combustibles existant dans les vides des vieux travaux; l'arrêt du ventilateur, en supprimant brusquement cette compression, permettra l'invasion des plans inclinés par ces gaz combustibles, qui se dirigeront naturellement vers les points où la diminution de pression aura été le plus sensible, c'est-à-dire vers le plan Mallet, où ils trouveront accès par les fissures qui le font communiquer avec les vieux travaux.

Si le ventilateur est alors remis en marche, le courant d'air que le ventilateur obligera à descendre le plan Mallet rencontrera les gaz combustibles qui auront envahi celui-ci.

C'est cette rencontre qui a dû se produire le 6 décembre 1891 entre l'air envoyé par le ventilateur d'une part, et les gaz combustibles d'autre part, rencontre qui a dû donner lieu à un mélange d'autant plus intime de ces éléments que la vitesse du courant d'air était plus faible.

Le mélange explosif ainsi constitué s'est déplacé dans le sens que lui imprimait l'action du ventilateur, et il a atteint les barrages du plan Pataud. Or, le barrage de gauche, qui était particulièrement chaud, devait, en raison de l'affaissement des terres, être réduit, dans sa partie supérieure, à une épaisseur de quelques centimètres seulement; il offrait donc un passage éminemment favorable au mélange explosif, lequel a rencontré les feux derrière ce barrage, s'est enflammé à leur contact et a communiqué l'inflammation à la masse gazeuse tout entière.

L'explosion s'est produite 25 minutes environ après la remise en marche du ventilateur, c'est-à-dire au bout d'un délai qui paraît correspondre à la durée nécessaire au transport du mélange explosif sur le foyer de l'incendie.

Cette explication des phénomènes est absolument confirmée, d'ailleurs, par les constatations faites au sommet du plan Pataud. Il résulte en effet de ces constatations que les désordres, nuls au voisinage du sommet de ce plan, s'aggravaient à mesure que l'on s'en éloignait: or, on sait aujourd'hui que, au centre même de l'inflammation, les phénomènes dynamiques doivent être faibles, le violent tourbillonnement qui constitue l'onde explosive ne se produisant qu'à une certaine distance. On peut donc placer avec certitude au sommet du plan Pataud le point d'origine de l'inflammation.

CONCLUSIONS.

Le terrible événement du 6 décembre porte avec lui des enseignements qu'il importe de dégager.

Il a tout d'abord mis en lumière les dangers que présentent les gaz combustibles enfermés dans les vieux travaux, même entourés de barrages. Il faut évidemment, pour assurer la sécurité, que les travaux d'exploi-

tation proprement dits soient efficacement isolés des vieux travaux et que les courants d'aérage qui ont traversé ces derniers soient maintenus complètement séparés de ceux qui aérent les premiers; dans le même ordre d'idées, il est à désirer que l'exploitation soit conduite de manière à laisser les vieux travaux en amont-pendage.

Cette catastrophe a prouvé, de plus, que l'on ne doit jamais compter sur l'étanchéité d'un barrage, quelles que soient les précautions qui aient présidé à son établissement et à son entretien; de là, la nécessité d'en interdire le contact à un courant d'air chargé de grisou.

Enfin, elle a montré quelles conséquences fatales pouvait avoir une organisation défectueuse de l'aérage d'une mine envahie par les feux : il résulte effectivement des circonstances de l'accident que non seulement toute perturbation du régime normal, telle en particulier que des changements de sens du courant, y constitue une cause terrible de danger, mais encore que la détermination même du sens à adopter pour le courant d'aérage est un élément essentiel de la sécurité.

PROCÉDÉS D'ESSAI
DES MATÉRIAUX HYDRAULIQUES

Par M. H. LE CHATELIER, Ingénieur en chef des mines,
Professeur à l'École nationale supérieure des mines.

I. — INTRODUCTION.

Dans ces vingt dernières années, l'étude des méthodes d'essai des produits hydrauliques a reçu un grand développement. Des laboratoires richement dotés se sont consacrés à cette étude (en France, les laboratoires du service des ponts et chaussées de Paris et de Boulogne-sur-Mer, celui du génie militaire, celui des usines à ciments du Boulonnais; en Suisse, le laboratoire de Zurich; en Allemagne, celui de Berlin-Charlottenbourg; en Russie, celui de Saint-Pétersbourg). Des conférences et congrès nombreux ont discuté les résultats obtenus (les conférences de Munich, Dresde et Berlin; à Paris, le Congrès des matériaux de construction de l'Exposition universelle de 1889 et la Commission des méthodes d'essai en 1892). Mais tout en reconnaissant les services rendus par tous les efforts et les bonnes volontés qui ont concouru à ce travail, on ne peut nier que le but poursuivi ait été parfois dépassé. La multiplicité et la complexité toujours croissantes des essais proposés, qui les rendent inabordables en dehors des laboratoires d'étude, conduisent nécessairement à restreindre l'usage de ces essais

au lieu de les multiplier, comme cela serait désirable. Ici, comme partout, les meilleures choses ont eu leurs inconvénients; en fixant une attention trop soutenue sur les essais, on a fini par les étudier pour eux-mêmes en perdant trop souvent de vue leur but essentiel, qui est de permettre à l'ingénieur d'apprécier, par des procédés sûrs et rapides, le produit qu'il va mettre en œuvre. C'est dans un esprit de réaction contre les tendances inconscientes et inévitables des laboratoires d'étude que ce mémoire a été rédigé : combattre l'abus des méthodes d'essai pour en obtenir l'usage.

Mais tout d'abord il faut bien s'entendre sur ce que l'on doit appeler *méthodes d'essai* des produits hydrauliques. Toutes les expériences que l'on peut faire sur ces matières ne sont pas des essais. Ces expériences peuvent se diviser en trois catégories bien distinctes par leur but, mais qui peuvent se rapprocher par les moyens mis en œuvre pour les effectuer, et qui sont le plus souvent poursuivies simultanément par les mêmes expérimentateurs dans les mêmes laboratoires, d'où une tendance naturelle à les rapprocher et à les confondre.

Ces trois catégories sont :

Les recherches scientifiques et pratiques;

Les essais de réception proprement dits;

Les expériences d'identification.

Expériences de recherches. — Ces expériences peuvent, d'après leur but immédiat, être d'ordre *scientifique* ou d'ordre *pratique*. Les recherches *scientifiques* visent la constitution des ciments, les phénomènes élémentaires qui accompagnent leur cuisson, leur durcissement et leur désagrégation. Ce sont nécessairement des recherches d'ordre essentiellement chimique. Parmi les recherches semblables les plus connues, on peut mentionner les travaux de Vicat sur la constitution des chaux hydrauliques,

les travaux de M. Candlot relatifs à l'action du chlorure et du sulfate de calcium sur les ciments. L'importance capitale de semblables recherches, l'intérêt qu'elles présentent au point de vue pratique ne sont peut-être pas appréciés comme ils devraient l'être. C'est cependant aux travaux de Vicat, personne ne songerait à le contester, qu'est due la création de l'industrie tout entière des produits hydrauliques; tout ce qui s'est fait dans cette voie est la conséquence directe de sa découverte des propriétés hydrauliques des combinaisons de la silice et de l'alumine avec la chaux.

L'objet essentiel de semblables recherches est de reconnaître les relations de cause à effet, les relations d'analogie, en un mot toutes les relations *nécessaires* qui peuvent exister entre les différents phénomènes dont les ciments sont le siège. Elles se distinguent par là des recherches empiriques qui, procédant par statistique, par moyenne, sans chercher à approfondir la nature intime des phénomènes, peuvent bien reconnaître la concomitance de certains faits, mais ne sauraient décider si cette concomitance est accidentelle ou nécessaire.

Les recherches *pratiques* sont les études faites par le fabricant qui veut tirer le meilleur parti des matériaux qu'il a sous la main, par l'ingénieur qui veut tirer pour ses travaux le meilleur parti des ciments dont il dispose. De semblables études devraient s'appuyer sur la connaissance complète des phénomènes simples, des phénomènes chimiques mis en œuvre dans la fabrication et l'emploi des produits hydrauliques, c'est-à-dire que ces études ne devraient être que la continuation des recherches scientifiques avec les mêmes méthodes de travail. Mais pour cela il faudrait des expérimentateurs joignant à des connaissances chimiques très étendues l'expérience industrielle de la fabrication et de l'emploi des ciments. Ce sont là des conditions difficiles à concilier; aussi la plupart du temps ces recherches restent-elles purement empiriques; certainement intéressantes pour les applications particulières en vue, elles ne comportent néanmoins aucune conclusion générale susceptible d'être utilisée ailleurs. C'est là la raison de l'ignorance où nous sommes encore au sujet des propriétés même les plus importantes des produits hydrauliques, malgré le nombre énorme d'expériences dont ils ont déjà été l'objet.

Essais de réception. — Les *essais de réception* proprement dits ont pour objet exclusif de faire connaître par des procédés simples et rapides la présence, dans un produit marchand donné, des qualités que les recherches antérieures de laboratoire ont montré être utiles, et l'absence des caractères reconnus nuisibles par ces mêmes recherches. Ils doivent pouvoir être effectués par de simples manœuvres, dépourvus de toute connaissance scientifique, auxquels il suffise d'être consciencieux et d'avoir quelque habileté manuelle. De semblables essais sont indispensables aux fabricants pour diriger leur industrie, aux consommateurs pour apprécier les produits qui leur sont livrés.

La définition des méthodes d'essai les plus convenables pour apprécier les qualités des ciments et des chaux hydrauliques est une question fort délicate. En abordant une semblable étude, il faut avoir bien présent à l'esprit que l'essai des produits hydrauliques est un problème tout différent de l'essai des métaux.

Contrairement aux métaux, les produits hydrauliques sont à l'emploi dans un perpétuel devenir, depuis le jour de leur prise, qui se prolonge par un durcissement pouvant durer des mois, même des années, jusqu'au jour de leur désagrégation complète, qui s'accomplit parfois après un petit nombre d'années. Leur qualité essentielle,

presque leur qualité unique est de résister le plus longtemps possible aux agents extérieurs qui les attaquent de toute façon : gelée, sécheresse, eau courante, eau de mer. Cette résistance, d'ailleurs, dépend, par part égale, de certaines propriétés *physiques* ou *chimiques* de ces produits, souvent fort mal connues, et des conditions éminemment variables dans lesquelles ils ont été mis en œuvre. C'est une résultante complexe dont il est toujours difficile de démêler avec précision les diverses composantes, et pourtant la connaissance exacte de la part qui revient dans le résultat final aux qualités de la matière employée est indispensable pour asseoir les méthodes d'essai sur des bases rationnelles.

L'institution de méthodes d'essai rationnelles n'est donc possible qu'en s'appuyant sur les résultats antérieurs de recherches scientifiques ou pratiques qui aient permis de séparer, dans la manière de se comporter des matériaux hydrauliques, la part qui revient aux trois facteurs suivants :

Les *causes extérieures* qui concourent à leur dégradation (gelée, sécheresse, eau de mer, etc., etc...) ;

Leurs *propriétés intrinsèques* qui les rendent plus ou moins aptes à résister aux causes de dégradation (constitution chimique, degré de cuisson, finesse de mouture, etc., etc...) ;

Enfin l'influence des *conditions de mise en œuvre* sur leur plus ou moins rapide altération (eau de gâchage, sable, compacité, etc., etc...).

Malheureusement l'étude de ces questions est encore bien peu avancée. Un petit nombre des qualités ou défauts des ciments sont définis avec précision ; pour un nombre encore plus réduit on a trouvé des procédés de mesure convenables. A défaut de ces données indispensables, on en est réduit, pour tirer de l'état de choses actuel le meilleur parti possible, à se guider souvent pour le choix des

méthodes d'essai sur l'expérience empirique et nécessairement un peu vague des praticiens. Dans ces conditions, la valeur d'un grand nombre des méthodes d'essai reste nécessairement très précaire.

On conçoit les mécomptes auxquels on est exposé quand on accorde à de semblables méthodes d'essai une confiance qui ne saurait être justifiée ; les exemples du passé sont là pour mettre en garde dans l'avenir contre une confiance exagérée. Qu'il suffise de faire allusion aux désastres survenus dans d'importants travaux publics pour avoir fait usage de mortiers trop maigres, de ciments extrabasiques, qui avaient pourtant parfaitement satisfait aux conditions d'essai alors usuelles.

Expériences d'identification. — Étant donné qu'il est actuellement impossible d'apprécier d'une façon complète toutes les qualités des ciments par des méthodes d'essai rationnelles, on est conduit à demander des garanties de qualité à certains procédés détournés de contrôle.

Ayant ainsi reconnu à l'usage la bonne tenue d'un produit donné, on tâchera pour de nouveaux travaux de se procurer un produit aussi identique que possible à l'ancien ; si l'identité est absolue sur tous les points, il est bien évident que les qualités seront les mêmes. Différents procédés peuvent être employés pour tâcher de reconnaître cette identité. Le procédé le plus simple et le plus usuel pour les particuliers consiste à s'adresser au fabricant dont les fournitures antérieures ont été satisfaisantes ; l'État pourra, sans s'adresser à un fournisseur unique, chercher à s'assurer de l'identité des produits qui lui sont livrés, par un contrôle de la fabrication exercé dans les différentes usines. Mais aucun de ces procédés n'est infaillible ; on pourra les compléter par la détermination expérimentale d'un certain nombre des propriétés des ciments qui sont susceptibles de mesure. Il

n'est pas besoin que ces propriétés aient une relation connue ou même une relation quelconque avec les qualités à l'emploi des ciments ; il est néanmoins préférable de choisir celles qui ont quelque chance de présenter une relation semblable. Plus on identifiera un grand nombre de propriétés différentes, plus il y aura de chances, sans qu'il y ait jamais de certitude, que les qualités réelles seront également identiques. C'est là le seul motif qui puisse justifier le nombre considérable d'expériences de contrôle auxquelles on continue encore à soumettre les ciments en vue de leur réception.

Suivant les cas, on pourra se proposer d'obtenir une identification plus ou moins complète avec un produit donné, d'obtenir simplement une identité dans les procédés de fabrication, ou seulement une analogie générale. On cherchera par exemple à s'assurer qu'un ciment est identique avec un produit fabriqué à telle époque dans telle usine ; ou bien a été fabriqué par les procédés employés dans telle région, dans le Boulonnais par exemple, ou simplement qu'il fait partie de la catégorie générale des ciments portlands. Les expériences d'identification à employer dans les différents cas ne seront évidemment pas les mêmes.

On fait généralement une confusion très regrettable entre ces expériences d'identification et les méthodes d'essai proprement dites, et on se laisse aller ainsi à apprécier les qualités d'un ciment d'après des caractères dont ses qualités ne dépendent en réalité aucunement. Ainsi quand on a constaté qu'un produit donné de bonne qualité a telle composition chimique, on est souvent tenté d'attribuer à cette composition une vertu particulière qu'elle ne peut certainement pas posséder. Les ciments ne sont pas des composés définis, mais des mélanges de semblables composés : il est donc tout à fait irrationnel de chercher dans une composition chimique donnée un

indice quelconque de qualité, il ne faut y voir qu'une probabilité d'analogie avec un autre produit déterminé.

Il est très important, sans méconnaître l'utilité de ces expériences d'identification, de les séparer très nettement des essais proprement dits. Ceux-ci sont appelés à se développer et se perfectionner avec les progrès de nos connaissances sur les produits hydrauliques ; ils devront peu à peu se substituer aux expériences en question dont l'importance deviendra de moins en moins grande jusqu'à s'annuler complètement. L'idéal vers lequel on doit tendre est d'arriver à trouver des méthodes d'essai assez sûres pour permettre de reconnaître directement les services que pourra rendre à l'usage un ciment dont on ne connaîtrait ni l'origine, ni les procédés de fabrication, ni la composition, ni aucun autre renseignement nécessaire pour établir une comparaison avec d'autres produits similaires. Ce jour-là toutes les expériences d'identification devront être supprimées.

Unification des méthodes d'essai. — Dans ces dernières années un courant d'opinion très accentué s'est manifesté en France en faveur de l'unification des méthodes d'essais à employer pour la réception des matériaux de construction. Il s'est fait jour notamment dans les discussions du Congrès de l'Exposition de 1889, et dans de nombreuses publications qui ont suivi. Pour combler ce desideratum, une grande Commission de cent-vingt membres, nommée par le ministre des travaux publics, a été chargée de préparer cette unification.

L'intérêt que présenterait une semblable unification n'est pas moins grand pour le fabricant que pour le consommateur, mais à des points de vue divers.

Pour le consommateur, l'unité des conditions imposées entraîne une unité de fabrication qui est une garantie considérable de qualité des produits fabriqués. Le jour,

par exemple, où la réception des chaux sera astreinte à des règles uniformes, cette industrie se transformera ; un bien petit nombre d'usines aujourd'hui livrent d'une façon régulière des chaux à peu près convenables. La fabrication des ciments naturels fera sans doute également de grands progrès. Cette unification serait particulièrement importante pour le petit consommateur qui ne veut pas ou ne peut pas faire d'essais et doit accepter les produits qui lui sont livrés, quelque mauvais qu'il soient, sans avoir aucun recours contre le fabricant. Une fois des règles générales admises, tout produit incapable d'y satisfaire pourra être réputé de mauvaise qualité, de même qu'aujourd'hui en France tout gaz d'éclairage qui ne satisfait pas aux conditions du cahier des charges de la ville de Paris est réputé mauvais.

Pour le producteur il y a intérêt à ce que les différents consommateurs qu'il fournit ne lui imposent pas de conditions différentes, car la variété dans la fabrication, qui en est la conséquence, ne peut qu'élever le prix de revient. Il a surtout intérêt à ne pas se voir imposer, par le caprice d'un consommateur ignorant, des conditions parfois absurdes, ou tout au moins contradictoires avec la bonne qualité du produit demandé.

Mais si l'intérêt que peut présenter l'unification des méthodes d'essai est évident, il ne faudrait pas par une généralisation trop hâtive vouloir unifier du même coup toutes les autres expériences que l'on peut faire sur les ciments : expériences de recherches scientifiques ou pratiques et expériences d'identification. Il existe malheureusement une tendance trop accentuée dans cette direction, on ne saurait trop énergiquement réagir contre elle.

Unifier les méthodes à employer dans les expériences de recherches équivaudrait dans bien des cas à la négation même de semblables recherches ; cela rendrait en tout cas tout progrès impossible. Qui dit recherche dit

variété dans les tentatives faites et cela, que l'on procède par voie scientifique ou empirique. Prenons un exemple : les recherches sur la porosité des mortiers, par exemple, ont certainement un grand intérêt pratique. Il serait très utile de savoir dans quelle mesure cette propriété dépend de la composition du mortier, dans quelle mesure elle provoque leur gélivité ou leur altération à l'eau de mer. Va-t-on fixer arbitrairement, une fois pour toutes, la nature et la qualité du sable, la proportion d'eau à employer ? mais c'est alors interdire toute espèce de recherches sur les mortiers véritables, sur ceux qui servent dans les travaux. Va-t-on se contenter de rendre obligatoire telle ou telle méthode expérimentale pour mesurer cette porosité ? Mais l'on ignore aujourd'hui les conditions dans lesquelles il faut se placer pour enlever l'eau d'interposition d'un mortier sans toucher à l'eau de combinaison ; une semblable unification conduirait très certainement à imposer un procédé de mesure inexact. Les chercheurs, savants ou ingénieurs, qui veulent étudier les mortiers, ne doivent, pour travailler d'une façon efficace au progrès de nos connaissances, accepter d'autres règles que celle de leur inspiration personnelle.

Sur les expériences d'identification, l'unification peut sembler plus défendable ; ces expériences ont le même but que les méthodes d'essai, celui de donner au consommateur des garanties sur la qualité des produits que lui livre le fabricant. En fait, l'utilité de cette unification est aujourd'hui très généralement admise. Mais si au lieu de se contenter d'examiner superficiellement la question on veut entrer dans les détails, on reconnaît bien vite qu'une semblable unification est généralement impossible et que, dans tous les cas, elle est plutôt nuisible qu'utile.

Veut-on s'assurer qu'un produit est bien de telle nature déterminée, portland ou autre, qu'il a été fabriqué dans certaines conditions, le plus simple est évidemment de

contrôler la fabrication dans l'usine ; c'est ce que l'État fait pour les fournitures destinées à des travaux importants. Il ne peut cependant être question, sous prétexte d'unification, d'introduire dans les usines les représentants de tous les particuliers qui consomment du ciment. On ne peut non plus, par contre, interdire à l'État un moyen de contrôle efficace, sous le prétexte qu'il n'est pas à la portée des particuliers. Mais en s'en tenant même aux expériences d'identification qui sont à la portée de tout le monde, l'unification est encore impossible. Telle expérience satisfaisante un jour ne le sera plus le lendemain. Pendant longtemps la mesure de densité apparente a donné des indications très utiles au consommateur en raison d'une relation indirecte entre cette densité et les conditions de cuisson. Mais cette relation n'est pas nécessaire, et le fabricant au courant de cette question pourra, avec un produit peu cuit, obtenir une densité normale. Cet essai, très bon il y a dix ans, n'a plus de valeur aujourd'hui, et il en est de même de tous les essais empiriques analogues. A quoi bon alors les unifier? Ce qu'il faut au contraire au consommateur, c'est de savoir varier ses expériences d'identification à mesure que le fabricant trouve le moyen d'éluder le contrôle provenant des expériences actuellement en usage. Définir et limiter les procédés de contrôle de cette nature équivaudrait à déclarer que toute fraude qui échappe à leur examen n'est pas une fraude ; qu'un ciment de laitier auquel on donnera la couleur, la finesse, la densité, la résistance d'un ciment de Portland, sera un ciment de Portland, bien qu'il n'en ait nullement les qualités. Le consommateur a d'une façon imprescriptible le droit de se renseigner sur la nature de la marchandise vendue par tous les procédés de contrôle à sa convenance.

Dans cette note nous ne nous occuperons que des méthodes d'essai proprement dites, laissant de côté les

expériences qui n'ont aucune relation définie avec les qualités à l'emploi des ciments et ne peuvent être utilisées que dans un but d'identification. Mais auparavant il convient de résumer l'état actuel de nos connaissances sur les propriétés générales des produits hydrauliques, de préciser leurs conditions de durcissement et celles, plus importantes encore à connaître, de leur désagrégation sous l'influence des agents atmosphériques, de définir les divers procédés de fabrication qui servent de base à leur classification.

II. — CONSTITUTION CHIMIQUE DES PRODUITS HYDRAULIQUES.

L'étude théorique des différentes réactions chimiques qui concourent au durcissement des produits hydrauliques est nécessairement le point de départ le plus solide de toutes recherches sur les méthodes d'essai. Mais pour bien comprendre le mécanisme par lequel les différents phénomènes chimiques interviennent, il est indispensable d'avoir présentes à l'esprit les lois qui régissent les phénomènes de dissolution ; ceux-ci jouent en effet un rôle capital dans toutes les transformations des ciments.

1° *Lois générales de la dissolution.* — Un grand nombre de corps mis en contact mutuel ont la propriété de se mêler intimement dans des proportions non définies en donnant une masse homogène liquide que l'on appelle *dissolution*.

Quoique les proportions des éléments des dissolutions soient variables, cependant elles ne sont pas absolument quelconques, et il y a généralement une limite supérieure qui ne peut être dépassée. Ainsi, quand on met à la température ordinaire une grande masse de chlorure

de sodium (sel marin) au contact d'une quantité d'eau déterminée, une certaine quantité seulement du sel se dissout, quelque prolongé que soit son contact avec la dissolution déjà formée. La composition de la dissolution ainsi obtenue est indépendante de la quantité de sel en présence. On dit qu'une semblable dissolution est *saturée*. Le degré de saturation varie d'ailleurs avec différentes circonstances, par exemple avec la température. Ainsi l'azotate de potassium est infiniment plus soluble à chaud qu'à froid ; l'hydrate de calcium est au contraire moins soluble à 100 degrés qu'à la température ordinaire, et le gypse présente un maximum de solubilité vers 35 degrés. Mais parmi les circonstances qui influent sur la solubilité, il en est une dont l'importance est capitale au point de vue de l'étude des ciments, je veux parler de l'état d'hydratation du sel considéré, et plus généralement des divers états physiques ou chimiques sous lesquels il peut se présenter. Le gypse ou sulfate de calcium hydraté n'a pas la même solubilité que le sulfate de calcium anhydre. Le carbonate de calcium tout formé ne donnera pas avec l'eau une solution de même concentration que de l'acide carbonique et de la chaux isolés qui sont mis simultanément en présence de l'eau. De même pour les différents états allotropiques d'un même corps : l'iodure rouge de mercure et l'iodure jaune n'ont pas la même solubilité.

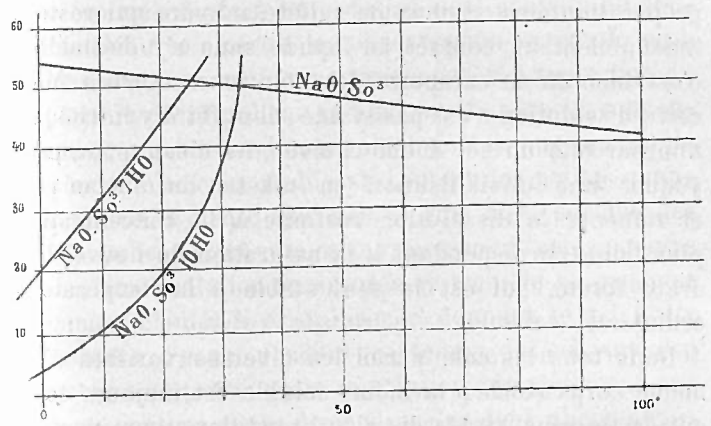
Ces différences de solubilité des différents états d'un même sel ont été reconnus depuis longtemps par un chimiste français, Lœwel (*), mais ce fait, d'une importance considérable, n'a pas reçu tout d'abord l'attention qu'il méritait. Les courbes ci-contre donnent les résultats de ce savant relatifs à la solubilité du sulfate de soude.

On voit sur ces courbes qu'à la température de 10 degrés la solubilité des trois hydrates du sulfate de soude est :

(*) *Ann. de physique et de chimie*, 3e série, tome XLIX, p. 32.

$NaO.SO^3$	53	de sel anhydre p.	100 d'eau.
$NaO.SO^3.7HO$	32	id.	id.
$NaO.SO^3.10HO$	10	id.	id.

Le sulfate ordinaire, le sulfate à dix molécules d'eau, est moins soluble, au point de vue du poids de métal dissous, que le sulfate à sept molécules d'eau, qui lui-même l'est moins que le sulfate anhydre.



Le même fait a été constaté par Marignac pour le sulfate de chaux ; le plâtre cuit ou gypse déshydraté est, à la température ordinaire, cinq fois plus soluble que le gypse naturel ou sulfate de chaux à deux équivalents d'eau.

Mais il faut ajouter immédiatement que de ces solutions à saturations différentes il n'y a que la moins concentrée qui soit chimiquement stable et que l'on ait habituellement l'occasion d'observer. La production des solutions plus concentrées n'est généralement que passagère. Cependant, dans certains cas particuliers, ces solutions plus concentrées peuvent, grâce à certains artifices

spéciaux, être conservées plus ou moins longtemps; elles constituent ce que l'on appelle les solutions *sursaturées*. En réalité, ce sont des solutions saturées, mais saturées d'un état particulier du sel, lequel n'est pas chimiquement stable en présence de l'eau dans les conditions de température considérées. On vérifie très aisément dans la préparation habituelle des dissolutions sursaturées de sulfate de soude que ces liqueurs sont en réalité saturées de sulfate anhydre. Elles renferment en effet toujours, si l'on n'a pas ajouté trop d'eau dans leur préparation, des cristaux de sulfate anhydre qui restent indéfiniment au contact du liquide sans s'y dissoudre; c'est bien là le caractère des solutions saturées. Mais cette dissolution n'est pas stable; il suffit d'y introduire une parcelle du sel à dix équivalents d'eau pour provoquer une cristallisation en masse du même sel et ramener la dissolution restante à la concentration plus faible correspondant à la saturation du nouvel hydrate formé, qui est le seul stable à la température ordinaire.

Dans tous les cas, parmi les diverses variétés d'un même corps solide, la moins soluble est toujours celle qui est la plus stable dans les conditions considérées. Pour le sulfate de soude au-dessus de 33°, c'est le sulfate anhydre qui est le plus stable, c'est aussi lui qui est le moins soluble. A la température précise de 33°, où le sel anhydre et le sel à dix molécules d'eau sont également stables, les limites de saturation, c'est-à-dire les coefficients de solubilité sont les mêmes. Les courbes de solubilité de ces deux états du sulfate de soude se coupent en effet à cette température de 33°, comme cela se voit sur les courbes de Lœwel.

Ces quelques propriétés des dissolutions donnent immédiatement la clef du mécanisme du durcissement des produits susceptibles de faire prise au contact de l'eau.

2° *De la prise des produits hydrauliques.* — La propriété de durcir au contact de l'eau qui caractérise les produits hydrauliques appartient à un très grand nombre de composés chimiques différents, dont quelques-uns se prêtent plus facilement à l'étude que les chaux et ciments. Le sulfate de soude préalablement fondu et finement pulvérisé fait rapidement prise lorsqu'il est gâché avec une petite quantité d'eau; il se comporte comme le plâtre, sa prise seulement est plus rapide encore en raison de sa plus grande solubilité. Le mécanisme de cette prise est très facile à suivre (*). Le sel anhydre au contact de l'eau se dissout, la concentration augmente rapidement, dépasse celle qui correspond à la saturation du sel à dix molécules d'eau et tend à atteindre la concentration de saturation du sel anhydre. Mais une semblable dissolution n'est pas stable au contact des petites quantités de sel hydraté qui s'est formé à la surface des fragments de sel anhydre ayant séjourné un certain temps à l'air. La dissolution sursaturée en train de se produire commence bientôt à cristalliser en donnant le sel à dix équivalents d'eau; pendant ce temps le sel anhydre n'étant pas en présence de sa solution complètement saturée va continuer à se dissoudre. Ces deux phénomènes inverses de cristallisation et dissolution s'effectuent chacun avec une vitesse propre d'où dépend pour la liqueur un certain état de sursaturation moyenne, qui ne disparaît complètement que lorsqu'il ne reste plus de sel anhydre à hydrater. La prise est donc le résultat d'une dissolution passagère rendue possible par la différence de solubilité des divers états du sel.

On peut très nettement, dans le cas du sulfate de soude, en raison de sa grande solubilité, mettre en évi-

(*) H. Le Chatelier, Recherches expérimentales sur la constitution des mortiers hydrauliques (*Annales des mines*, mai-juin 1887, p. 364).

dence cette dissolution passagère du sel. Il suffit, au lieu de prendre du sel en poudre fine, de le concasser seulement en fragments de la grosseur d'un pois et de placer ces fragments à la partie supérieure d'un vase rempli d'une solution saturée de sel hydraté. La solution sursaturée qui se forme peut s'écouler à travers des espaces plus larges restant entre les grains et tomber au fond du vase, où elle laisse cristalliser le sel à dix équivalents d'eau en une masse compacte. Le transport du sel corrélatif de son durcissement est la preuve certaine d'une dissolution passagère.

Avec des sels moins solubles, comme le sulfate de chaux, les phénomènes sont les mêmes, quoique moins faciles à observer. Le plâtre cuit au contact de l'eau donne une solution sursaturée qui renferme 10 grammes de sulfate de chaux par litre au lieu de $2^{gr},36$ pour la solution saturée du sulfate hydraté.

Les aluminates de chaux qui se trouvent dans les ciments, quoique à peine solubles une fois hydratés, donnent, lorsqu'ils sont anhydres au contact de l'eau, des dissolutions relativement très sursaturées. En agitant pendant cinq minutes de l'aluminate tricalcique finement pulvérisé en présence d'un excès d'eau, on arrive à dissoudre $0^{gr},5$ de ce sel par litre, mais il se précipite bientôt des cristaux hydratés et il finit par ne plus rester dans la liqueur une quantité dosable d'alumine.

Les choses doivent se passer exactement de même avec le silicate de chaux qui est l'élément hydraulique essentiel de toutes les chaux et ciments. Mais la solubilité de ce sel est si faible, le dosage de petites quantités de silice si délicat, que la sursaturation du silicate anhydre au contact de l'eau n'a encore pu être démontrée expérimentalement. Cela a été possible pour un sel analogue, le silicate de baryte, qui est un peu plus soluble et fait également prise au contact de l'eau.

3° *Mécanisme du durcissement.* — Le durcissement des produits hydrauliques paraît donc bien être, dans tous les cas, le résultat de la cristallisation de composés hydratés qui ont passé momentanément par l'état de dissolution. Mais la solidité d'une masse cristalline semblable peut varier dans des limites considérables avec la forme, les dimensions et le mode d'agrégation des cristaux ainsi produits. En général, la cohésion, la dureté d'un cristal isolé est bien supérieure à son adhérence aux cristaux voisins; plus les surfaces des cristaux en contact seront développées, plus l'adhérence totale, la résistance de la masse sera grande. Des cristaux en longues lamelles ou en filaments enchevêtrés devront donner une résistance considérable. Or, il se trouve précisément que tous les cristaux qui se déposent de solutions sursaturées présentent ce caractère, et le présentent d'une façon d'autant plus marquée que la solution est plus fortement sursaturée. La cristallisation des solutions sursaturées de sulfate de soude, acétate de soude, hyposulfite de soude, donne des cristaux filiformes d'une longueur de plusieurs centimètres avec une épaisseur inférieure à 1/10 de millimètre. On peut reconnaître qu'il en est de même dans la prise du plâtre, celle des aluminates de chaux, etc. Mais cet allongement considérable et la solidité qui en résulte peuvent varier dans des limites considérables avec le degré de sursaturation du liquide, qui dépend lui-même de conditions multiples : finesse du sel anhydre, nombre des centres de cristallisation, etc. C'est le motif pour lequel des produits hydrauliques très voisins donnent souvent à l'emploi, dans les travaux ainsi que dans les essais de résistance, des résultats aussi différents.

4° *Du gonflement par extinction.* — Si dans la majeure partie des cas l'action de l'eau sur les sels anhydres est

une cause de durcissement, il n'en est cependant pas toujours ainsi. On sait que la chaux, en s'hydratant au contact de l'eau, se fend, se désagrège, en un mot, s'éteint. Pour qu'il y ait durcissement, il faut que le sel anhydre puisse subsister un certain temps au contact de l'eau sans s'y combiner, et en s'y dissolvant simplement. Cela est impossible pour certains corps très avides d'eau comme la chaux, la baryte, l'acide borique anhydres qui se combinent directement à l'eau en formant leurs hydrates préalablement à toute dissolution. Dans ces cas qui sont très rares, il y a désagrégation de la matière et en même temps un gonflement, une expansion qui développe des efforts énormes. On peut rappeler, par exemple, ce fait bien connu qu'un fragment de chaux vive emprisonné dans une brique pourra, en s'éteignant, faire éclater la brique. Cependant le volume de l'hydrate formé est bien inférieur à la somme des volumes de la chaux vive et de l'eau qui se sont combinés. Le mécanisme du développement de ces efforts est encore absolument inconnu.

Les corps qui durcissent au contact de l'eau liquide peuvent donner lieu à un gonflement lorsqu'ils s'hydratent au contact de la vapeur d'eau; tel est le cas du sulfate de soude, du plâtre, de l'aluminate de chaux. Mais, dans ce cas, l'hydratation est extrêmement lente et reste tout à fait superficielle.

Ces phénomènes de gonflement sont une des causes les plus actives de la désagrégation des ciments, et leur constatation doit être un des objets les plus importants des méthodes d'essai.

5° *Composés chimiques des ciments.* — Les composés que l'on rencontre habituellement dans les ciments et chaux hydrauliques sont la chaux et les combinaisons de cette base avec la silice, l'alumine, l'oxyde de fer et l'acide sulfurique.

Chaux. — La chaux anhydre pendant son hydratation donne toujours lieu à une extinction, c'est-à-dire à une désagrégation accompagnée de gonflement.

Le temps nécessaire à l'extinction de la chaux est extrêmement variable avec son degré de compacité. La chaux poreuse obtenue par cuisson à basse température du calcaire pur s'éteint instantanément au contact de l'eau; au contraire, la chaux compacte obtenue par calcination de l'azotate met plusieurs jours à s'éteindre. Il en est de même pour les chaux compactes obtenues par calcination à température élevée de calcaires un peu argileux.

L'extinction est d'autant plus rapide et le gonflement d'autant plus considérable que la température est plus élevée. C'est là un fait d'une importance capitale qui est mis à profit dans l'industrie des chaux hydrauliques, dont l'extinction ne saurait être réalisée convenablement à froid, et qui est utilisé dans les essais de ciment pour reconnaître la présence de chaux libre.

Le gonflement est plus considérable dans l'extinction par la vapeur d'eau que par l'eau liquide.

Enfin, l'extinction est considérablement hâtée par l'addition à l'eau d'une petite quantité de chlorure de calcium, 2 p. 100 à 6 p. 100, ou de sels comme le chlorure de magnésium qui donnent, avec la chaux des ciments, du chlorure de calcium. Ainsi, une chaux qui met quarante-huit heures à s'éteindre dans l'eau pure, le fait en une demi-heure lorsqu'elle est mouillée avec une dissolution de chlorure de calcium à 3 p. 100. Ces faits, découverts par M. Candlot (*), ont reçu quelques applications intéressantes.

(*) M. Candlot, Rôle du chlorure de calcium et du sulfate de chaux sur la prise et le durcissement des mortiers (*Bull. de la Soc. d'encouragement pour l'industrie nationale.* Juillet 1890. Paris, siège de la Société, 44, rue de Rennes.)

La présence dans les chaux hydrauliques et ciments de chaux libre anhydre, c'est-à-dire qui n'est combinée ni à des acides ni à de l'eau, est, ainsi qu'il a été dit plus haut, une des causes les plus importantes de la destruction de ces produits. Lorsque l'extinction de la chaux est assez lente pour ne s'achever qu'après la prise, elle amène par son gonflement, si elle est en quantité notable, des fendillements de toute la masse et, par suite, la désagrégation du mortier; si elle est en quantité moindre, un accroissement de porosité qui facilite l'action destructive des agents extérieurs. Il suffit d'ajouter à un ciment portland de bonne qualité 1 p. 100 de son poids de chaux compacte de l'azotate pour obtenir déjà des fissures très nettes.

La magnésie libre donne lieu à des gonflements analogues, quoique moins importants.

Silicates de chaux. — Il existe trois silicates de chaux :

SiO^2. CaO ou wollastonite. — Ce composé ne se rencontre pas normalement dans les ciments. Il ne se produit que contre les parois du four aux dépens de la silice, surtout lorsque le revêtement est fait, comme dans certaines usines, en pierres de grès. Il ne jouit d'aucune propriété hydraulique, c'est une matière inerte.

SiO^2. 2 CaO. — Ce silicate possède la propriété singulière de se pulvériser spontanément par refroidissement, conséquence d'un changement d'état allotropique. C'est un phénomène semblable à celui qui se produit dans les mêmes conditions de refroidissement avec l'oxyde de plomb, le sulfate de potasse, et surtout le sulfate double de cuivre et de potasse, etc.

Cette pulvérisation spontanée du silicate dicalcique, très fréquente dans les laitiers basiques de hauts fourneaux, se produit souvent dans les ciments portlands; elle est d'autant plus marquée que le dosage en chaux est plus faible et que la température de cuisson est plus élevée.

Ce silicate ne possède pas de propriétés hydrauliques, il ne durcit pas au contact de l'eau. Mais il est rapidement attaqué par l'acide carbonique dissous avec formation de carbonate de chaux cristallisé; il peut ainsi dans une certaine mesure contribuer au durcissement final des mortiers employés à l'air.

SiO^2. 3 CaO. — Ce silicate est le seul qui soit réellement hydraulique; c'est le produit actif par excellence des chaux et ciments hydrauliques. Il se trouve dans le ciment portland, dont il constitue la majeure partie, en cristaux pseudo-cubiques. Il se produit par réaction de la silice et de la chaux en présence de combinaisons fusibles formées par l'alumine et le fer. Chauffé à une température trop élevée, il semble se dissocier en silicate dicalcique et chaux libre et perd ainsi ses propriétés hydrauliques.

Au contact de l'eau, il fait prise en se dédoublant pour donner un silicate monocalcique hydraté qui cristallise en aiguilles microscopiques et de l'hydrate de chaux qui cristallise en larges lamelles hexagonales, visibles à l'œil nu dans tous les ciments portlands :

$$SiO^2.\,3CaO + Aq = SiO^2.\,CaO.\,2{,}5HO + 2\,CaO.\,HO.$$

Le silicate hydraté mis en présence d'un excès d'eau distillée se décompose jusqu'au moment où la dissolution renferme $0^{gr},052$ de CaO par litre.

La sursaturation qui précède la cristallisation est difficile à reconnaître pour le silicate monocalcique. On la constate au contraire très nettement pour l'hydrate de chaux qui se forme en même temps.

Ce silicate est peu sensible à l'action de la vapeur d'eau, ce qui lui permet de traverser indemne la période d'extinction dans la fabrication des chaux hydrauliques. C'est de la proportion de ce silicate que dépend principalement la qualité d'un produit hydraulique.

Aluminates de chaux. — Il existe différents aluminates de chaux qui font tous prise au contact de l'eau avec une très grande rapidité.

Le plus important, l'aluminate tricalcique, s'hydrate simplement au contact de l'eau comme le plâtre, avec production de solutions fortement sursaturées :

$$Al^2O^3.\,3CaO + Aq = Al^2O^3.\,3CaO.\,12HO.$$

Au contact de l'eau distillée, il se décompose jusqu'à ce que la dissolution renferme $0^{gr},22$ de CaO par litre.

Ce sel, d'après les recherches de M. Candlot, se combine au sulfate de chaux pour former un sel double qui cristallise avec une très grande quantité d'eau (*) :

$$Al^2O^3.\,3CaO + 2{,}5(SO^3.\,CaO) + 60\,HO.$$

Ce composé semble jouer un rôle important dans la destruction des mortiers à l'eau de mer; il se forme aux dépens de l'acide sulfurique du sulfate de magnésie. C'est là un point d'une importance capitale qui mériterait d'être étudié d'une façon plus complète et qui pourra sans doute être mis un jour à profit dans les essais de ciments destinés aux travaux à la mer.

J'ai reconnu récemment l'existence d'une combinaison hydratée de l'aluminate dicalcique avec le chlorure de calcium. L'étude n'en est pas encore faite.

Ferrites de chaux. — Ces composés, sous la première action de l'eau, se gonflent comme la chaux libre, puis donnent naissance à un ferrite tricalcique hydraté blanc que l'acide carbonique de l'air décompose avec production de sesquioxyde de fer brun. Ces composés n'existent pas dans les ciments portlands bien cuits qui ne prennent jamais à l'air la coloration brune caractéristique.

(*) Candlot, *loc. cit.* (*Bull. de la Soc. d'encouragement*), et Candlot, *Ciments et chaux*, p. 250, librairie Baudry, 1891.

Silico-alumino-ferrites de chaux. — Il se produit dans les ciments portlands un silico-aluminate fusible identique à celui qui forme l'élément essentiel des laitiers de hauts fourneaux cristallisés, dans lequel le sesquioxyde de fer remplace en partie l'alumine :

$$2SiO^2.\,Al^2O^3.\,3CaO.$$

Ce corps est complètement inerte sous l'action de l'eau ; il ne semble même pas être attaqué à la longue par l'acide carbonique. Son seul rôle utile est de servir de fondant pour favoriser pendant la cuisson la combinaison de la silice et de la chaux.

Ce silico-aluminate, qui est cristallisé dans le ciment portland en raison de la lenteur du refroidissement, peut au contraire conserver l'état vitreux quand son refroidissement est suffisamment brusque. Tel est le cas des laitiers de hauts fourneaux précipités dans l'eau froide pendant qu'ils sont encore liquides. Les propriétés de ce composé deviennent alors tout à fait différentes: il est attaquable par les acides faibles et en même temps par les alcalis. Il se combine en particulier à la chaux hydratée en faisant prise et donnant naissance à des silicates et aluminates de chaux hydratés identiques à ceux qui se forment par des réactions tout à fait différentes pendant la prise du ciment portland. C'est sur cette propriété qu'est fondée la fabrication des ciments de laitier, qui prend de jour en jour une importance plus considérable (*).

III. — CLASSIFICATION DES PRODUITS HYDRAULIQUES.

Un des faits qui ressortent le plus nettement de l'expérience journalière des constructeurs est que des produits

(*) Prost, Note sur la fabrication et les propriétés des ciments de laitier (*Ann. des mines*, 8e série, tome XVI, p. 158 à 208).

hydrauliques de composition moyenne similaire présentent dans les travaux des qualités de résistance à la désagrégation éminemment variables avec leurs procédés de fabrication. Les ciments artificiels dits de Portland jouissent d'une réputation incontestée pour les travaux à l'air pendant les gelées ou pour les travaux à la mer. Il n'en résulte pas, comme on serait tenté de le croire, que des produits, tels que les ciments de laitier, dont la composition chimique et la résistance aux essais mécaniques sont semblables, doivent posséder les mêmes qualités. Ils sont peut-être meilleurs, peut-être plus mauvais; on ne pourra le savoir que par un usage suffisamment prolongé. Une classification rigoureuse basée sur les procédés de fabrication s'impose donc comme annexe indispensable des conditions d'essai de ces produits.

Cette classification comporte quatre grandes divisions inévitables, qui se subdiviseront elles-mêmes en un nombre de catégories de plus en plus considérables à mesure que l'industrie des produits hydrauliques progressera.

1° Les ciments *artificiels portlands* sont obtenus par des mélanges en proportions dosées de matières argileuses et calcaires qui sont ensuite cuites jusqu'à la température de scorification (demi-fusion). Ils ne comportent, après cuisson, aucune autre addition que celle de matières accidentellement moins cuites provenant de la même fabrication et d'une petite quantité d'eau empruntée généralement d'une façon spontanée à l'atmosphère.

Examinés au microscope en plaques minces, ils se montrent formés par des cristaux à double réfraction très faible, de silicate tricalcique, empâtés dans une masse cristallisée, mais sans contours propres, de silico-alumino-ferrite de chaux. Ce sont là les deux éléments essentiels de ces ciments. Si la chaux est en excès, il se forme d'abord de l'aluminate de chaux, puis, pour un plus grand excès, du ferrite de chaux, et enfin de la chaux libre. Si,

au contraire, la chaux est en quantité insuffisante, il se forme du silicate dicalcique reconnaissable à la pulvérisation spontanée des roches de ciment cuites. Lorsque le mélange est imparfait ou que la cuisson est insuffisante, les réactions restent incomplètes et il se produit, malgré une composition moyenne convenable, à la fois de la chaux libre et de l'aluminate de chaux avec du silicate dicalcique.

Dans un ciment portland de composition normale, la teneur en chaux doit, d'après les formules chimiques des composés qui le constituent, être supérieure à celle qui serait déterminée par la relation :

$$(1) \qquad \frac{CaO}{SiO^2 - Al^2O^3 - Fe^2O^3} > 3$$

dans laquelle CaO, SiO^2, Al^2O^3, Fe^2O^3 représentent non pas les poids équivalents, mais le nombre des poids équivalents de ces corps qui sont en présence, c'est-à-dire le quotient du poids de ces corps par leurs poids équivalents.

Cette teneur en chaux ne doit, d'autre part, jamais atteindre la proportion donnée par la relation :

$$(2) \qquad \frac{CaO}{SiO^2 + Al^2O^3} < 3$$

qui correspond à la formation exclusive d'aluminate de chaux. Il faut toujours, en raison de l'imperfection inévitable des mélanges, se tenir notablement au-dessous de cette limite, au delà de laquelle il resterait de la chaux non combinée.

Dans ces formules, la magnésie doit être ajoutée à la chaux, et l'acide sulfurique ajouté au dénominateur, après avoir divisé son nombre d'équivalents par 3.

Malgré les soins apportés au mélange et à la cuisson des ciments portlands, il est bien rare qu'ils ne renferment pas une petite quantité de chaux libre; il est indispensable qu'elle soit éteinte, hydratée avant l'emploi. Cette hydratation se produit aux dépens de l'eau qui s'est fixée

sur la surface des roches pendant le refroidissement dans le four, ou de celle qui lui a été fournie par un arrosage spécial. La réaction est favorisée par l'élévation de température que produit le broyage et par une conservation très longue en silos. L'eau qui réagit ainsi est restée dans le ciment non pas à l'état de simple imbibition, mais bien de combinaisons chimiques, silicates et aluminates hydratés, qui sont moins stables que l'hydrate de chaux, ont une tension de dissociation plus forte et peuvent par suite se décomposer à la longue pour éteindre la chaux vive.

La composition des ciments portlands marchands de bonne qualité est habituellement telle que les proportions de leurs différents constituants soient renfermées entre les limites :

Produits marchands.

Silice	21 à 24
Alumine	6 à 8
Oxyde de fer	2 à 4
Chaux	60 à 65
Magnésie	0,5 à 2
Acide sulfurique	0,5 à 1,5
Eau et acide carbonique	1 à 3

Les cendres du combustible qui passent pour la majeure partie dans le ciment, ont une part importante dans la variation des teneurs en silice.

Pour ces mêmes ciments de bonne qualité les quotients caractéristiques (1) et (2) des nombres d'équivalents des différents corps en présence varient entre les limites suivantes :

$$\frac{CaO}{SiO^2 - Al^2O^3 - Fe^2O^3} \text{ varie de } 3,5 \text{ à } 4$$

$$\frac{CaO}{SiO^2 + Al^2O^3} \text{ varie de } 2,5 \text{ à } 2,7.$$

2° Les *chaux hydrauliques* sont obtenues par la cuisson de calcaires naturels siliceux et alumineux suivie de la pulvérisation de la masse par l'action de l'eau qui éteint la chaux restée libre. Les seules additions sont celles d'une certaine quantité de grappiers, c'est-à-dire de fragments de chaux qui ont résisté à l'extinction et que l'on broie sous des meules.

Le principe de la fabrication est de laisser dans le produit cuit une quantité de chaux libre suffisante pour que son extinction soit capable de réduire en poudre toute la masse. On obtient ce résultat en partant de calcaires renfermant plus de chaux qu'il n'en faut pour produire avec l'alumine et la silice les sels calcaires tricalciques et cuisant à une température élevée, ou bien en cuisant, à une température plus basse, pour avoir des réactions incomplètes, des calcaires moins riches en chaux.

Il y a, d'autre part, intérêt à ce que la chaux hydratée qui reste inactive dans le durcissement soit en minime proportion, il faut donc réaliser l'extinction dans les conditions où le gonflement est le plus énergique, c'est-à-dire à une température très élevée; il suffit alors d'une moindre proportion de chaux vive pour amener une pulvérisation complète. On arrive pratiquement, en utilisant la seule chaleur d'hydratation de la chaux, à élever la température de la masse jusqu'à 200°, pourvu que l'on opère sur des tas de chaux assez volumineux pour atténuer les pertes de chaleur par refroidissement extérieur. C'est là une opération assez délicate à bien conduire, car à cette température élevée, l'eau ajoutée à la masse et non encore combinée se volatilise complètement, et la chaux ne trouverait pas pour s'éteindre une quantité d'eau suffisante si on n'ajoutait pas sur les tas d'une façon régulière de nouvelles quantités de chaux arrosée, qui restituent sous forme de vapeur aux régions du tas plus chaudes la quantité d'eau nécessaire.

La présence de chaux libre résultant d'une extinction

insuffisante est le défaut le plus grave et le plus fréquent que l'on rencontre dans les chaux hydrauliques et que les procédés d'essais employés doivent déceler. Le second défaut également très fréquent est un défaut de cuisson qui a rendu trop faible la production du silicate de chaux actif.

Les meilleurs calcaires à chaux hydraulique renferment très peu d'alumine; les aluminates de chaux jouent le rôle de corps inerte, car ils s'hydratent pendant l'extinction et ne peuvent par suite concourir au durcissement; ils ne concourent d'ailleurs que très peu ou même pas du tout à la pulvérisation pendant l'extinction. Le silicate de chaux au contraire, sur lequel la vapeur d'eau n'a pour ainsi dire pas d'action, traverse sans altération, en conservant ses propriétés hydrauliques, la période d'extinction.

La composition d'une bonne chaux hydraulique devrait approximativement comprendre 4 équivalents de chaux pour 1 de silice en supposant qu'il n'y ait ni alumine, ni fer. 3 équivalents de chaux se combineraient à la silice et le 4e resté libre servirait à l'extinction; mais la combinaison de la silice et de la chaux, surtout en l'absence de quantités notables d'alumine, reste toujours très incomplète, et la quantité de chaux libre serait plus forte qu'il n'est nécessaire. L'expérience montre que les meilleures chaux hydrauliques ne renferment guère que 3 équivalents de chaux pour 1 de silice. Leur composition en France varie très peu, même dans des usines très éloignées les unes des autres (Ardèche, Eure, Indre-et-Loire); elle est très sensiblement la suivante :

Silice	22
Alumine	2
Oxyde de fer	1
Chaux	63
Magnésie	1,5
Acide sulfurique	0,5
Eau	10
	100

Pour les chaux de qualité inférieure, la teneur en silice peut s'abaisser à moitié de la valeur indiquée ici, tandis que l'eau et parfois l'alumine peuvent doubler. La teneur en chaux reste toujours à peu près la même; elle varie au plus de 55 à 65 p. 100.

3° Les *ciments naturels* s'obtiennent par la cuisson de calcaires moins riches en chaux que les calcaires à chaux hydraulique. Ils peuvent être divisés en trois catégories :

Ciments à prise rapide (Vassy, romain);

Ciments à prise demi-lente;

Ciments de grappiers.

Les ciments de Vassy s'obtiennent par la cuisson à très basse température, juste suffisante pour décarbonater la chaux, de calcaires très argileux. Ils sont caractérisés par une prise très rapide suivie d'un durcissement ultérieur extrêmement lent, beaucoup plus lent que celui des ciments portlands. Leur faible cuisson donne lieu à des réactions chimiques très incomplètes; il se forme, en plus du silicate de chaux, de l'aluminate de chaux qui est la cause de leur grande rapidité de prise, et vraisemblablement aussi des silico-aluminates de chaux pouzzolaniques. Ces ciments renferment généralement de 6 p. 100 à 10 p. 100 de sulfate de chaux dont la présence paraît indispensable pour ralentir la prise de l'aluminate de chaux, qui serait beaucoup trop rapide pour se prêter à un usage pratique.

Analyse. — La composition des ciments naturels de Vassy est habituellement renfermée entre les limites :

Silice	22 à 24
Alumine	7 à 10
Oxyde de fer	4 à 6
Magnésie	1 à 5
Chaux	45 à 55
Acide sulfurique	2 à 4
Eau et acide carbonique	4 à 8

Ils diffèrent des ciments portlands par une plus forte teneur en acide sulfurique qui paraît être un de leurs éléments essentiels, et une teneur bien plus faible en chaux.

Les ciments à prise *demi-lente* par l'intensité de la cuisson, se rapprochent des ciments portland; mais les calcaires naturels ne possèdent jamais l'homogénéité des mélanges artificiels, aussi est-il impossible d'éviter dans ces ciments la présence d'une quantité notable de chaux libre dont l'extinction est par suite plus importante que dans les ciments portlands où elle ne doit jamais être qu'en quantité minime. Cette extinction des ciments naturels à prise lente, qui ne peut se faire par arrosage comme celle de la chaux, est une opération très délicate, qui en général est beaucoup trop abandonnée au hasard; étudiée avec plus de soin elle permettrait sans doute d'obtenir avec les ciments naturels, dont le prix de revient est nécessairement moindre, des résultats aussi réguliers qu'avec les ciments artificiels. La composition de ces produits varie de celle des ciments de Vassy à celle des véritables portlands.

Les ciments de *grappiers* s'obtiennent par le broyage des parties qui ont échappé à la désagrégation des chaux hydrauliques. Ces grappiers sont un mélange de quatre matières distinctes dont deux complètement inertes sont du calcaire incuit, et des scories formées au contact des parois siliceuses des fours, deux éminemment hydrauliques sont de la chaux non éteinte et du véritable ciment à prise lente. Il faut que ce dernier soit prédominant dans les grappiers pour que leur broyage donne un produit utilisable. Le grappier de ciment ne s'obtient régulièrement que dans la cuisson des calcaires très peu alumineux, contenant environ 3 équivalents de carbonate de chaux pour 1 de silice; sa production exige une cuisson à température élevée.

Ces ciments de grappiers sont encore plus sujets à renfermer de la chaux libre que les ciments naturels à prise lente qui s'obtiennent par la cuisson de calcaires beaucoup plus alumineux.

D'après leur constitution même les ciments de grappier peuvent présenter une composition éminemment variable, puisqu'ils s'obtiennent par le broyage d'un mélange de grains de ciment et de matières inertes variées. Les grains de ciment ont à peu près la composition du silicate tricalcique SiO^2. 3 CaO. Le tableau suivant rapproche la composition des meilleurs ciments de grappier, des grains de ciment qui ont concouru à leur formation et du silicate tricalcique pur :

	CIMENT de grappiers.	GRAINS de ciment pur.	SILICATE tricalcique
Silice	26,5	26	26,5
Alumine	2,5	3,5	
Fer	1,5	1	
Chaux	63	66	73,5
Magnésie	1	1	
Acide sulfurique	0,5	0,5	
Eau et acide carbonique	5	1	
	100	99,0	100

4° Les *ciments mixtes* sont obtenus par mélange après cuisson de diverses matières, hydrauliques ou non. La subdivision de beaucoup la plus importante est celle des ciments de *laitier* qui sont obtenus par le mélange de laitier granulé de haut fourneau avec de la chaux éteinte, hydraulique ou non. Ces laitiers maintenus à l'état vitreux jouent le rôle de véritables pouzzolanes; ils donnent une prise d'autant plus rapide qu'ils sont plus riches en alumine et en chaux. Un excès de chaux cependant, en s'opposant à la vitrification par trempe, diminuerait leurs propriétés pouzzolaniques. On est dans de bonnes conditions en se tenant comme composition

aux environs de celle qui correspond à la formule chimique :

$$2\,Si\,O^2.\ Al^2O^3.\ 3\,CaO$$

qui donne par refroidissement des laitiers cristallisés compacts très durs. Une pulvérisation très fine du laitier est indispensable pour assurer la réaction de la chaux.

La composition des ciments de laitiers de bonne qualité s'écarte peu de la suivante :

Silice	24
Alumine	14
Oxyde de fer	1
Chaux	51
Magnésie	2
Acide sulfurique	1
Eau et acide carbonique	7

La catégorie des ciments mixtes comprend encore un grand nombre de produits, d'une qualité et d'une importance secondaires, dont le ciment portland forme l'élément essentiel et dont l'élément accessoire, introduit pour abaisser le prix de revient, peut être des mâchefers, des laitiers, des chaux hydrauliques ou grasses, de la craie. Ces ciments ne sont d'ailleurs jamais vendus avec leur dénomination exacte ; ils ne sont en fait que des falsifications du ciment portland.

IV. — AGENTS DE DÉSAGRÉGATION DES PRODUITS HYDRAULIQUES.

Après avoir rappelé les notions aujourd'hui acquises sur la constitution des produits hydrauliques, il est également important, au point de vue du choix des méthodes d'essai, de passer en revue les agents les plus actifs de leur désagrégation.

On rappellera d'abord qu'il existe deux causes de destruction inhérentes aux matériaux hydrauliques eux-mêmes, lesquelles agissent indépendamment du milieu extérieur (eau, air, etc.), dont la présence ne fait que modifier l'intensité et la rapidité des actions produites.

La première de ces deux causes est l'*insuffisance de la quantité des composés hydrauliques et actifs*, sans lesquels aucun durcissement ne peut se produire. A ne considérer que les efforts mécaniques auxquels sont soumis les mortiers, on pourrait presque toujours se contenter de chaux ou de ciments très pauvres en matières actives, surtout pour les travaux à l'air où la dessiccation et la carbonatation sont des agents actifs de durcissement ; c'est pour résister aux attaques des agents physiques et chimiques de désagrégation qu'il est utile d'employer des produits aussi riches que possible.

La seconde cause interne de destruction est la présence de *chaux ou de magnésie libre* dont l'extinction postérieure à la prise amène le gonflement et même le fendillement des mortiers. Le gonflement, même lorsqu'il n'est pas accompagné de fendillement, est très dangereux, parce que l'accroissement de porosité qui en résulte rend le mortier bien plus attaquable par la gelée et par les sels de magnésie des eaux de la mer. La chaux libre en trop faible proportion ne produit plus de gonflement, mais son extinction développe des tensions internes qui semblent également nuisibles, en facilitant encore, quoique à un moindre degré, l'action des agents externes.

Au point de vue des agents extérieurs il y a lieu de distinguer les actions *physiques* et *chimiques*, de beaucoup les plus dangereuses, des actions purement *mécaniques*. On peut classer les actions chimiques et physiques en trois catégories correspondant aux trois milieux dans lesquels les mortiers hydrauliques peuvent être employés :

1° Eau douce et terrains humides;

2° Air;

3° Eau de mer.

1° L'*eau douce en repos*, d'un sol humide ou d'eaux dont le mouvement est assez lent pour qu'elles ne puissent exercer d'action mécanique d'usure, n'apporte pas par sa présence, d'après ce que l'on sait jusqu'ici, de causes spéciales d'altération. On pourrait craindre une dissolution continue de la chaux provenant de la décomposition indiquée plus haut des silicates et aluminates de chaux, et c'est bien ce qui se produirait avec l'eau distillée constamment renouvelée; alors, au bout d'un temps extrêmement long, il ne resterait plus qu'une masse gélatineuse de silice et d'alumine hydratée. Mais dans les eaux naturelles, toujours chargées de bicarbonate de chaux et d'acide carbonique libre, cette dissolution est impossible; il se forme au contraire du carbonate de chaux dont la cristallisation ne fait qu'augmenter le durcissement.

Il n'est pas impossible que certains ciments alumineux s'altèrent au contact d'eau chargée de sulfate de chaux, surtout si une pression tend à la faire filtrer à travers le mortier. Mais jusqu'ici des altérations de cette nature n'ont été constatées que dans des maçonneries exposées à l'air au moins par une de leurs faces; il n'est donc pas certain qu'elles puissent se produire dans des maçonneries complètement immergées.

Dans l'*eau en mouvement rapide*, dans les rivières torrentueuses, le choc répété des galets et du sable entraînés par le courant produit une usure lente comme sur toutes les pierres. Cet effet, bien entendu, est d'autant plus intense que le mortier est moins dur. De même dans la mer, surtout là où il y a des marées, le choc des vagues et des galets qu'elles soulèvent produit par son action répétée des effets plus énergiques encore que les eaux courantes. Cette action des vagues est surtout à

redouter dans les premiers temps du durcissement, quand la résistance mécanique des mortiers est encore assez faible.

2° Dans les travaux à l'*air*, les conditions défavorables à la conservation des mortiers sont multiples, mais elles n'ont été jusqu'ici étudiées que d'une façon superficielle. Les variations de température et d'état hygrométrique sont en tout cas les deux agents les plus actifs de désagrégation.

Une température trop basse, comme une température trop élevée, peut être nuisible. Aux températures inférieures à zéro la congélation de l'eau qui imprègne le mortier a les mêmes conséquences que dans les pierres poreuses. L'augmentation de volume qu'éprouve l'eau en prenant l'état solide produit une expansion qui tend à faire éclater le ciment et à en décoller des plaquettes parallèles aux surfaces isothermes, c'est-à-dire à la surface libre des maçonneries. Cette désagrégation, comme celle des pierres gélives, est d'autant plus facile que le mortier possède une résistance mécanique moindre, que le volume total des vides est plus grand, que les dimensions de chaque petit vide isolé sont plus faibles. Quand les vides sont assez larges, la glace, en raison de sa plasticité, peut s'écouler sous une pression inférieure à celle que produirait la rupture du mortier. C'est pour cette raison que les mortiers à gros sables sont les moins gélifs; les vides y sont moins nombreux, mais plus volumineux. La nature du ciment influe sur la gélivité du mortier, par son défaut de résistance s'il est trop pauvre en éléments actifs et par le volume et la ténuité des vides qui sont en relations avec la forme des grains du ciment. Les chaux qui renferment beaucoup de poussière impalpable, les ciments peu cuits dont les grains sont poreux, demandent plus d'eau pour le gâchage et donnent par conséquent des mortiers plus poreux, qui sont plus gélifs.

Aux températures élevées, certains hydrates solides

peuvent s'effleurir en perdant leur eau, se réduire en poussière, comme le fait le carbonate de soude cristallisé et causer ainsi la désagrégation du mortier. Tel est le cas de certains aluminates de chaux et surtout de l'alumino-sulfate de chaux, mais les expériences précises sur ce sujet font encore défaut. Cette déshydratation doit, dans tous les cas, être favorisée par la sécheresse de l'air. On peut hypothétiquement rattacher à cette cause le fait bien connu que certains ciments ayant séjourné des mois sous l'eau en y prenant une très grande dureté, se fendent et même se désagrègent en une masse sableuse quand on vient à les exposer à l'air chaud et sec.

La sécheresse trop grande de l'air a un autre inconvénient : elle s'oppose au durcissement convenable de certains mortiers en empêchant la condensation de l'eau de s'y faire en quantité convenable. Cette influence de la sécheresse est très variable pour les divers produits hydrauliques; elle est, dans nos climats tempérés, très peu marquée pour les ciments portlands, qui durcissent bien à l'air; elle est beaucoup plus accentuée pour les mortiers de pouzzolanes, tels que les ciments de laitiers. Dans ces derniers produits, les corps qui réagissent étant séparés, ne peuvent être ramenés au contact que par l'intermédiaire d'une quantité d'eau liquide suffisante. L'addition de matières hygrométriques telle que celle qui résulte du gâchage à l'eau de mer, favorise en général le durcissement en augmentant l'épaisseur de la couche d'eau qui se condense par capillarité à la surface des grains et surtout dans les espaces étroits qui entourent leurs points de contact.

Il existe encore d'autres causes moins connues d'altération à l'air des mortiers, par exemple la carbonatation de la chaux s'effectuant au voisinage de zéro dans un carbonate de chaux hydraté :

$$CaO.CO^2.5HO,$$

qui dès que la température s'élève au-dessus de 5 degrés se détruit en donnant une bouillie sans consistance d'eau et de carbonate de chaux anhydre.

La filtration d'eau chargée de sulfate de chaux à travers les maçonneries a dans plusieurs circonstances occasionné la désagrégation des mortiers sur la face des maçonneries exposée à l'air, ce qui fait supposer que l'évaporation a dû jouer un rôle. Il paraît en outre probable que les ciments chargés en aluminate de chaux sont les plus altérables. Ces faits de désagrégation sont encore peu connus, mais leur existence a été constatée d'une façon absolument certaine dans des maçonneries d'égout et de fortification.

3° Dans l'*eau de mer* les causes de désagrégation sont encore plus énergiques. Les hydrates des sels calcaires dont la formation a amené le durcissement sont décomposés par les sels de magnésie; il se forme du chlorure de calcium soluble, qui est entraîné, et en même temps un dépôt sans consistance d'hydrate de magnésie, de sulfate de chaux, ainsi que de silice et d'alumine mis en liberté par la décomposition des sels calcaires. L'acide carbonique des eaux de la mer, ou celui qui est dégagé par les végétations marines, contribue à limiter l'action de cette cause de désagrégation en formant du carbonate de chaux cristallisé qui n'est pas attaqué par les sels de magnésie.

Une seconde action plus dangereuse encore de l'eau de mer, qui se rattache, dans une certaine mesure, à la précédente, se manifeste par des gonflements et des fendillements du mortier. Le sulfate de chaux formé aux dépens du sulfate de magnésie ou préexistant dans le ciment en est l'agent le plus actif. Ce mode de désagrégation est surtout à redouter avec les produits très alumineux; il est une conséquence de la formation du sulfo-aluminate de chaux de M. Candlot.

Dans tous les cas, cette action de l'eau de mer est d'autant plus rapide que son renouvellement non seulement au contact, mais surtout à l'intérieur des mortiers, est lui-même plus actif. L'effet des marées produit des différences de pression qui font alternativement entrer et sortir l'eau par les joints et activent considérablement la ruine des maçonneries. La durée de celles-ci est beaucoup plus considérable dans les mers sans marées, comme la Méditerranée, qu'elle ne l'est dans l'Océan.

Actions mécaniques. — Les *actions mécaniques* proprement dites, c'est-à-dire celles qui résultent de la charge supportée par les maçonneries et non pas d'actions physiques inhérentes à la nature du milieu, sont rarement assez puissantes pour amener la destruction des mortiers. Elles ne peuvent généralement produire cet effet que dans les premiers temps du durcissement, lorsque la mise en charge des maçonneries aura été provoquée trop hâtivement. Cela est à redouter surtout dans les voûtes de ponts, voûtes d'égout, que l'on peut être obligé de décintrer rapidement. Ce défaut initial de résistance ne dépend pas tant de l'insuffisance de la quantité totale des produits actifs que d'un défaut de rapidité dans leur hydratation qui peut être le résultat soit d'une mouture trop grossière, soit d'une proportion insuffisante d'aluminates.

V. — MÉTHODES D'ESSAI.

Généralités.

On peut, dans l'institution des méthodes d'essai, se placer à deux points de vue opposés : suivre la méthode *empirique* ou la méthode *scientifique*.

La méthode empirique consiste à chercher dans les essais à se placer autant que possible dans des conditions identiques à celles de la pratique, tant au point de vue des conditions d'emploi que du choix des qualités dont on détermine la grandeur. Cette méthode est la seule que l'on pouvait songer à employer tant que l'on n'avait aucune connaissance précise sur la nature des produits hydrauliques ; elle ne peut conduire à des résultats bien satisfaisants, parce qu'il est impossible de réaliser dans les essais la totalité des conditions innombrables qui peuvent se rencontrer dans les travaux, et en particulier on ne peut faire intervenir l'action du temps qui est le facteur le plus important de la destruction des produits hydrauliques.

La méthode scientifique consiste à déterminer au préalable par des expériences de laboratoire les propriétés élémentaires des ciments dont dépendent leurs qualités de résistance à l'emploi, et ensuite à chercher des procédés de mesure pour chacune de ces propriétés élémentaires. L'institution d'essais semblables ne pourra être faite d'une façon complète que lorsque l'étude des produits hydrauliques sera terminée ; or on est loin d'en être là. Dans l'état actuel il faut partir des essais empiriques et chercher à les perfectionner progressivement en étudiant méthodiquement l'influence des diverses conditions opératoires. Le jour où l'on pourra tenir rigoureusement compte de l'influence de toutes ces conditions, on n'aura plus à se préoccuper de les identifier à celles de la pratique, ni de mesurer directement les qualités utiles à l'emploi, c'est-à-dire que l'on pourra arriver ainsi progressivement, mais par des voies très détournées, à instituer de véritables essais scientifiques.

Un exemple fera comprendre la méthode indiquée ici. La qualité exclusive d'un mortier est de prendre et ensuite de conserver de la solidité. Les essais empiriques sont

donc essentiellement des essais de résistance ; tels étaient les deux essais de Vicat, essais de résistance à la rupture et de rapidité de prise. En suivant la méthode empirique on est arrivé à subdiviser indéfiniment ces deux essais pour reproduire toutes les conditions de la pratique. C'est ainsi qu'aujourd'hui on fait des ruptures par arrachement, flexion ou compression : sur des mortiers de pâtes pures ou sableuses ; gâchés à l'eau douce ou à l'eau de mer ; conservés sous l'eau ou à l'air, etc.

Par contre, l'étude méthodique de ces essais conduit à reconnaître qu'il existe des relations numériques définies entre les résultats qu'ils donnent et que, par suite, un seul d'entre eux suffit pour permettre de calculer *a priori* les résultats que l'on obtient en les variant indéfiniment et donne jusqu'à un certain point la mesure de la proportion d'éléments actifs. Plus tard on pourra sans doute, après avoir étudié plus complètement l'action de la chaleur sur la résistance des briquettes de ciment, déduire de la comparaison des essais à chaud et à froid les proportions de silicate et d'aluminate de chaux actifs, c'est à-dire en faire de véritables essais scientifiques mesurant directement une des propriétés élémentaires capitales des produits hydrauliques.

Cet exemple montre dans quel esprit seront étudiés ici les différents procédés d'essai actuellement en usage. Cette méthode d'ailleurs n'est pas nouvelle ; elle a été suivie par M. Guillain dans la rédaction du cahier des charges de Boulogne, mais cette tentative n'a pas trouvé jusqu'ici de nombreux imitateurs. Le pur empirisme continue à régner en maître ; il a dirigé seul les travaux de la Commission d'unification des méthodes d'essai, dont je serai amené sur bien des points à combattre les conclusions (*).

(*) Si j'estime qu'un grand nombre des décisions prises par la Commission d'unification sont extrêmement regrettables, je ne méconnais pas pour cela l'intérêt capital des recherches expérimentales faites à l'occasion de ses travaux par un certain nombre de ses membres. Je ferai dans la suite un fréquent usage des résultats de ces recherches, qui ont été consignées dans une série de rapports distribués jusqu'ici aux seuls membres de la Commission d'unification. Le sous-comité, qui s'est plus particulièrement occupé des recherches expérimentales, était composé de MM. Durand-Claye, *président*, Alexandre, Candlot, Debray, Feret, Le Chatelier (Henry), Ribaucour, Siméon, Viallet.

Dans cette étude on suivra l'ordre des conclusions de la Commission d'unification ; on discutera pour chaque essai la nature des phénomènes élémentaires dont il peut donner la mesure ;

La valeur des indications qu'il peut fournir en vue des essais de réception sur la qualité des produits ;

La convenance des conditions expérimentales recommandées pour cet essai ;

Les recherches qu'il serait opportun de poursuivre pour améliorer cet essai.

Degré de précision des méthodes d'essai. — Avant d'aborder l'étude détaillée de ces méthodes, il convient de développer quelques considérations générales relatives au degré de précision que comportent les mesures expérimentales. C'est là un point sur lequel les idées les plus fausses ont cours ; il est indispensable de déblayer tout d'abord le terrain de préjugés qui sont un obstacle sérieux au perfectionnement des méthodes d'essais des produits hydrauliques.

Pour donner plus de clarté à cette discussion, on prendra un exemple particulier, l'essai de rupture, par exemple. Cet essai se fait en déterminant l'effort nécessaire pour rompre une briquette de 5 centimètres carrés de section. La grandeur que l'on mesure est donc un effort. Une semblable mesure d'effort peut, avec les appareils

employés, se faire sans difficulté à 100 grammes près, ce qui, sur un effort total de 50 kilogrammes, représente une incertitude relative de 0,2 p. 100. Mais il s'en faut bien que la résistance cherchée soit connue avec une semblable précision ; des ruptures faites sur des briquettes aussi identiques que possible donnent des résultats qui diffèrent considérablement de l'une à l'autre, en raison de nombreuses erreurs expérimentales dont la cause est mal connue et que l'on ne sait pas faire disparaître.

Je donne ici, à titre d'exemple, une série de 42 ruptures faites par M. Vétillart sur des briquettes confectionnées dans les mêmes conditions avec un même ciment. Les résultats sont rangés dans l'ordre de grandeur croissante en plaçant sur une même verticale les résultats identiques à 1 kilogramme près et supprimant les décimales :

25	26	27	28	29	30	31	32	34
25	26	27	28	29	30	31		34
25	26	27	28	29	30	31		34
25	26	27	28	29	30			
25		27	28	29	30			
			28		30			
			28		30			
			28		30			

La valeur moyenne la plus probable qui découle de ces chiffres serait voisine de 29 kilogrammes par centimètre carré; on voit que les valeurs extrêmes 25 et 34 diffèrent du chiffre moyen de 4 et 5 kilogrammes, soit de 15 p. 100 en moyenne.

Ces chiffres montrent en même temps que, dans le calcul des moyennes, il n'y a aucun motif pour éliminer, comme on le fait souvent, les valeurs les plus faibles. Cette manière de faire est appuyée sur l'opinion purement théorique que toutes les causes d'erreur tendent à donner des résultats trop bas. S'il en était réellement

ainsi, les chiffres voisins les plus nombreux se grouperaient autour des valeurs les plus élevées; l'écart entre la valeur moyenne et les résultats les plus faibles serait beaucoup plus grand qu'entre cette même moyenne et les résultats les plus élevés. Or, les chiffres donnés ci-dessus ne montrent rien de semblable; ils se groupent autour de leur valeur moyenne et, contrairement aux prévisions, ce sont les résultats les plus forts qui diffèrent davantage de la moyenne. Il est facile d'ailleurs de se rendre compte que certaines causes d'erreurs tendent à surélever les résultats. Quand on a dépassé l'effort correspondant strictement à la limite d'élasticité, il se produit un retard à la rupture qui peut être très variable d'un essai à un autre et dépend de la vitesse de mise en charge, des trépidations, etc.

Dans les essais pratiques, on ne peut faire une cinquantaine de ruptures comme dans l'exemple ci-dessus; on se contente généralement de six. Il est intéressant de se rendre compte de l'accroissement du degré de précision auquel on arrive en faisant une moyenne de six expériences au lieu de se contenter d'une seule mesure. Pour cela on a groupé les expériences précédentes 6 par 6 en les prenant dans l'ordre où elles avaient été faites; les résultats de ces moyennes partielles ont été les suivants :

27 29,2 26,8 32 30,1 28,4 29

Les écarts extrêmes avec la moyenne générale ont été de 10 p. 100, tandis que les écarts extrêmes des expériences individuelles ont été de 15 p. 100. On a donc gagné peu de chose comme précision en remplaçant une expérience isolée par six expériences. Étant donné ce faible avantage des moyennes, on pourrait peut-être, pour simplifier les essais, se contenter de 3 expériences semblables au lieu de 6, en utilisant, bien entendu, les trois pour la moyenne.

Dans certains cas cependant il peut arriver, mais cela est très rare, qu'une rupture isolée donne un résultat absolument discordant, et que son élimination s'impose. On pourrait, pour éliminer de semblables anomalies, adopter la règle que tout résultat différant de plus de 50 p. 100 de la moyenne générale ne sera pas utilisé pour le calcul de la moyenne à adopter définitivement.

Dans la discussion précédente, on n'a comparé que des expériences faites par un même opérateur; mais, dans la pratique, on a à comparer des résultats d'essais dus à des opérateurs différents. La façon dont chacun d'eux malaxe le mortier et remplit les moules a une importance considérable sur les résultats : il en résulte une nouvelle source d'erreurs systématiques, qui viennent s'ajouter aux erreurs accidentelles inhérentes à la méthode de travail de chaque opérateur. Une étude intéressante a été faite sur ce sujet par M. Féret qui a fait travailler, sous sa direction, six opérateurs distincts, dont les procédés de travail lui ont paru en apparence être identiques. On a vérifié que les poids des briquettes étaient semblables dans tous les cas, c'est-à-dire que le tassement final avait été le même.

Essai à l'arrachement de mortier normal sableux gâché à l'eau de mer.

Désignation		x		y		z		
	Laboratoires.							
	Opérateurs. .	A	B	C	D	E	F	Moyenne.
Résistances absolues	1 semaine. .	17,3	17,2	11,9	11	15,1	15	14,6
	4 semaines. .	19,8	20,6	17,8	14,6	20,2	20.8	19
	12 semaines. .	25,4	24,6	20,8	20,6	25,1	24,4	23,5
Résistances relatives.	1 semaine. .	118		78		104		100
	4 semaines. .	107		85		109		100
	12 semaines. .	106		89		105		100

Il résulte de ces chiffres que les opérateurs d'un même laboratoire peuvent arriver à des résultats très voisins, mais que des opérateurs de laboratoires différents, quoique

situés dans une même ville et ayant des relations continuelles entre eux, peuvent arriver à des résultats différant l'un de l'autre d'une quantité représentant 20 p. 100 de la moyenne générale des trois laboratoires. On conçoit que, dans des laboratoires isolés l'un de l'autre et n'ayant aucune tradition commune, des écarts de 50 p. 100 ne soient pas impossibles.

Je ne puis mieux faire ici que de reproduire les réflexions de l'auteur même de ces expériences de comparaison, M. Féret.

« Si l'on songe qu'en raison de leur fondation dans une même ville et des relations continuelles des agents qui les dirigent, ces trois laboratoires ont dû adopter et conserver les mêmes traditions pour l'exécution des essais (et, pour ma part, j'avoue n'apercevoir aucune différence bien sensible dans la manière dont les six gâcheurs compriment leur mortier), on voit, par les écarts obtenus dans ces conditions, quels peuvent être ceux d'opérateurs travaillant dans des villes différentes et n'ayant jamais été dirigés par un guide au courant des usages des autres laboratoires. »

Les conclusions à tirer de cette discussion sont que, dans les expériences de rupture par arrachement, on ne peut compter sur des résultats concordants en toute circonstance :

Dans un même laboratoire à 20 p. 100 près;

Dans des laboratoires différents à 40 p. 100 près.

Il est donc absolument irrationnel de donner, comme on le fait souvent, les chiffres de rupture avec plus de deux chiffres et de vouloir tirer des conclusions quelconque de la différence des résultats que l'on compare entre eux quand cette différence ne dépasse pas la somme des erreurs possibles sur chaque mesure, soit 20 p. 100 de la grandeur mesurée et cela encore dans le cas où chaque nombre résulte d'une moyenne de plusieurs expériences.

On reviendra sur l'importance des considérations développées ici, en discutant le choix des méthodes d'essai à employer pour déterminer la résistance à la rupture des ciments.

Une discussion semblable devrait être faite pour chacune des méthodes d'essai particulières avant de chercher à tirer aucune conclusion des indications qu'elles fournissent. C'est en partie pour avoir négligé de le faire qu'on est arrivé à multiplier indéfiniment le nombre des méthodes d'essai; on ne s'est pas rendu compte souvent que les résultats, en apparence différents, qu'elles fournissaient dépendaient beaucoup plus des erreurs d'expériences que des variations relatives de certaines qualités que l'on se proposait de mesurer.

Les essais recommandés par la Commission d'unification et qui seront ici passés en revue sont les suivants :

1° Finesse de mouture.
2° Analyse chimique.
3° Poids spécifique.
4° Densité apparente.
5° Essai d'homogénéité.
6° Durée de prise.
7° Résistance à la rupture.
8° Essai de déformation.
9° Porosité.
10° Perméabilité.
11° Décomposition à l'eau de mer.
12° Adhérence.

1° Finesse de mouture.

La commission recommande pour déterminer la finesse de mouture des ciments l'emploi de trois tamis qui donnent une séparation en quatre lots.

1° Tamis de	324 mailles au cent. car.	avec maille de	$0^{mm},35$ d'ouv.
2° Tamis de	900	—	$0^{mm},18$ —
3° Tamis de	4.900	—	$0^{mm},09$ —

Le tamisage donne directement la mesure d'une propriété élémentaire et absolument irréductible des ciments, la grosseur des grains. C'est, à ce premier point de vue, un essai tout à fait satisfaisant.

Cette propriété élémentaire a une action évidente sur les qualités du ciment à l'emploi, sa mesure est nécessairement appelée à faire partie dans l'avenir des essais normaux. Mais dans l'état actuel de nos connaissances, si l'influence de la finesse de mouture est incontestable, la nature de cette influence n'est pas déterminée avec précision et l'on pourrait être embarrassé de fixer, en vue d'essais de réception, le degré de finesse de mouture le plus convenable.

On passera rapidement en revue les effets connus d'une finesse plus ou moins grande. Les *gros grains* ne s'hydratent pas jusqu'au centre, ils se comportent en partie comme une matière inerte. Je l'ai vérifié de la façon suivante. Un peu de ciment grossièrement moulu a été agité avec un grand excès d'eau, puis le tout a été abandonné au repos. Le ciment s'est précipité en se classant par ordre de grosseur. Au bout d'un an des plaques minces ont été taillées et examinées au microscope. Dans les parties les plus fines il ne restait aucune trace des grains de ciment; dans les plus grossières, les parties centrales des grains étaient restées inaltérées. Il a semblé que les grains limites pour lesquels l'attaque cessait d'être complète, pouvaient avoir un diamètre de $0^{mm},1$, mais cette étude demanderait à être reprise avec plus de précision. La raison de cette limitation de l'hydratation est facile à concevoir : soit un grain de rayon r ; les cristaux hydratés qui se forment à ses dépens s'implantent à sa surface, soit dr leur longueur; au fur et à mesure que l'hydratation avance, de nouveaux cristaux se forment dans l'intervalle et à l'intérieur des précédents de façon à donner un grain hydraté de rayon $r + dr$. Pour que l'attaque s'arrête, il faut que cette enveloppe sphérique de cristaux hydratés devienne absolument compacte de façon à empêcher l'eau d'arriver au contact du grain anhydre. Cet effet pourra se pro-

duire parce que le volume des hydrates fournis est, en raison de la fixation de l'eau, supérieur à celui des corps qui se sont hydratés. Le rapport de ces volumes est d'environ :

1,5 pour le silicate de chaux.
3 pour l'aluminate de chaux.

On aura la grosseur des grains limites en écrivant :

$$\left(\frac{r+dr}{r}\right)^3 = \begin{cases} 1{,}5 \text{ pour le silicate.} \\ 3 \text{ pour l'aluminate.} \end{cases}$$

La longueur dr des cristaux est variable suivant les conditions de la prise ; il peut, en gros, être voisin de :

$0^{mm},01$ pour le silicate.
$0^{mm},10$ pour l'aluminate.

En admettant ces chiffres, on trouve comme grosseur des grains limites :

$0^{mm},07$ pour le silicate de chaux.
$0^{mm},30$ pour l'aluminate de chaux.

Une seconde action des gros grains est de provoquer, lorsque le ciment renferme des expansifs, des fentes et des soulèvements d'écailles qui disparaissent avec une mouture plus fine. C'est un fait bien connu des fabricants de ciment de grappier. On ne pourrait cependant en conclure, comme on est tenté de le faire à première vue, que la grosse mouture augmente notablement le danger des expansifs. Il rend surtout ce défaut plus visible, mais il n'est pas prouvé qu'il l'aggrave. En répartissant les expansifs d'une façon plus régulière dans le mortier, on ne supprime pas les tensions internes et le gonflement qui en résulte. Ainsi en ajoutant à un ciment portland de bonne qualité 10 p. 100 de magnésie calcinée, on n'obtient pas de fentes si la magnésie a été passée au tamis de 4.900 mailles ; mais le gonflement n'en est pas moins énorme. Dans les épreuves à 100°, il peut atteindre 30 p. 100 du volume primitif du mortier.

La *fine poussière*, la partie impalpable du ciment exerce également une influence considérable. C'est de sa proportion que dépend en grande partie, pour un produit de nature déterminée, la vitesse initiale du durcissement, la rapidité de prise, ce qui peut, suivant les usages, être un avantage ou un inconvénient. Une seconde influence d'ordre différent est la nécessité de faire croître l'eau de gâchage avec la proportion de fine poussière, car cette quantité est fonction de la surface totale des grains. Cette augmentation de la quantité d'eau accroît la porosité, ce qui est un grave inconvénient. Par contre, la finesse des grains diminue la perméabilité des mortiers et augmente leur plasticité, ce qui est un avantage. Elle a encore l'avantage, surtout pour les mortiers maigres, de permettre un mélange plus intime du sable avec son agglomérant. Enfin on doit mentionner, au point de vue commercial, que pour les produits vendus au volume, et nonp as au poids, la finesse de mouture amènera un foisonnement considérable des poudres qui est avantageux au commerçant.

Pour les grains de grosseur moyenne il n'y a aucun motif précis pour attribuer un avantage quelconque à la mouture moyennement grosse ou moyennement fine. D'autre part, les considérations théoriques invoquées par M. Guillain dans son rapport, au sujet de l'action de l'eau de mer, n'ont reçu jusqu'ici ni confirmation, ni infirmation expérimentales.

Au total, il est impossible dans l'état actuel de chiffrer aucun des avantages ou des inconvénients inhérents au degré de finesse de mouture, de sorte qu'il est difficile de baser des clauses précises de réception sur un essai semblable ; tout au plus pourrait-on limiter l'excès de grosseur ou de finesse de mouture. Encore l'excès de grosseur n'est guère à craindre parce que les fabricants, pour satisfaire aux essais de rupture, sont les

premiers intéressés à ne pas laisser dans leurs ciments de gros grains inertes ; l'excès de poussière impalpable seul pourrait être limité, encore faudrait-il savoir s'il est plus nuisible qu'utile.

En l'état actuel, il semble donc que la conclusion la plus sage est aujourd'hui encore celle à laquelle M. Guillain s'était arrêté en 1887, dans son rapport sur le cahier des charges de Boulogne.

« *Nous ne sommes donc pas en mesure d'inscrire dans le cahier des charges, le degré de finesse de mouture au-dessus duquel il faut se tenir pour avoir un ciment assez actif, ni le degré au-dessous duquel il convient de rester pour avoir un ciment assez longtemps résistant.*

« *C'est pourquoi le cahier des charges ne parle pas de la finesse de mouture.* »

Si pourtant on veut conserver un essai de finesse, et on peut en être tenté en raison de la simplicité de cet essai et des considérations théoriques qui permettent d'affirmer que ce sera un essai de l'avenir, voyons dans quelle mesure les dispositions recommandées par la Commission d'essai peuvent être adoptées. Des trois tamis, le premier de 324 mailles, qui pouvait avoir autrefois sa raison d'être avec les grosses moutures, ne présente plus d'intérêt avec les finesses usitées aujourd'hui dans la fabrication des produits hydrauliques ; il ne reste aucun résidu sur ce tamis, c'est donc du temps perdu de s'en servir. Sur soixante-six chaux et ciments essayés au laboratoire de l'École des ponts et chaussées et cités dans le fascicule de la Commission des ciments du 17 juillet 1890, il n'y en a que trois qui aient donné 5 p. 100 de résidu sur ce tamis, et encore sur ces trois échantillons, il semble que deux au moins avaient été préparés spécialement en vue des expériences et n'étaient pas des produits marchands.

Le tamis de 900 mailles est le seul dont la recommandation semble justifiable : il donne avec tous les produits un résidu notable et peut servir à caractériser la proportion de gros grains qui ne peuvent s'hydrater qu'incomplètement au contact de l'eau. C'est le seul employé aujourd'hui dans les pays étrangers.

Le tamis de 4.900 mailles est beaucoup trop gros pour permettre de se faire une idée, même grossière, de la portion de poussière impalpable renfermée dans un produit. La chaux et le ciment portland donnent en moyenne le même résidu sur le tamis de 4.900 mailles, et pourtant les chaux renferment une proportion infiniment plus grande de poussière impalpable. Il n'y a donc aucun motif de conserver le tamis de 4.900 mailles avec celui de 900.

La proportion de poussière impalpable, qui est certainement un des éléments les plus intéressants à déterminer, ne peut être obtenue par simple tamisage, car on ne peut pratiquement employer des tamis d'une finesse supérieure à 4.900 mailles.

Un procédé détourné très simple permet d'avoir, sinon une mesure absolue, au moins une mesure comparative de la proportion des poussières impalpables, c'est la détermination de la proportion d'eau nécessaire pour le gâchage à consistance définie. Cette quantité varie évidemment dans le même sens que la surface totale des grains, laquelle, pour un poids donné de ciment, est proportionnelle au carré des dimensions linéaires moyennes des grains. On trouve en effet par cette méthode une différence considérable entre les chaux et les ciments, ce que ne faisait pas le tamisage au tamis de 4.900 mailles. La quantité d'eau nécessaire pour gâcher une chaux est en moyenne le double de celle qui est nécessaire pour un ciment artificiel ; cette quantité peut d'ailleurs être déterminée sans difficulté à 1/20e près de sa valeur. C'est une précision largement suffisante pour établir un

classement entre les différents produits hydrauliques.

Le seul point délicat dans cet essai est relatif à la convention arbitraire qu'il faut faire pour définir la consistance de la pâte. Le but à atteindre serait d'arriver à employer une quantité d'eau qui, répartie en couche uniforme sur tous les grains, présente une épaisseur déterminée. Il n'existe actuellement aucun moyen certain pour atteindre ce but ; on peut admettre que cette condition est sensiblement remplie quand la consistance de la pâte est intermédiaire entre la consistance boueuse et la consistance sèche, qui peut être déterminée soit par le procédé du cahier des charges de Boulogne, d'après l'adhérence de la pâte à la truelle, soit par l'emploi de la sonde Tetmajer.

Conclusion. — Il semble que, dans l'état actuel de nos connaissances, il n'y a pas grand intérêt à faire figurer dans les cahiers des charges, de clauses relatives à la finesse de mouture.

Si cependant on juge utile de le faire, on devra faire consister cet essai en :

1° La détermination du résidu laissé par les tamis de 900 mailles (avec mailles de $0^{mm},18$) ;

2° La détermination de la quantité d'eau de gâchage nécessaire pour obtenir la pâte de consistance normale.

(Voir à la fin du mémoire, la rédaction complète des conditions de cet essai et des suivants.)

2° Analyse chimique.

L'analyse chimique est un des essais les plus en faveur aujourd'hui ; il a été considéré par la Commission d'unification des méthodes d'essais comme l'un des plus importants.

L'objet de cet essai, comme celui de la finesse de mouture, est parfaitement défini ; il fait connaître une

propriété élémentaire et irréductible des produits hydrauliques, leur composition élémentaire, c'est-à-dire la proportion des différents corps simples qu'ils renferment.

Existe-t-il une relation entre cette composition élémentaire et les qualités à l'emploi des ciments? Toutes leurs qualités dépendent pour la majeure partie, et même exclusivement, une fois la finesse de mouture mise à part, de leur *constitution* chimique. Mais il ne faut pas confondre constitution et composition chimique ; tous les corps simples dont l'analyse permet de doser la proportion peuvent se trouver engagés dans des combinaisons mutuelles essentiellement variables. Leur rôle dépend exclusivement de leur état de combinaison. Ainsi la chaux combinée à la silice et l'alumine donne les composés actifs par excellence des ciments ; dans cet état, elle est donc essentiellement utile. A l'état libre, elle gonfle, elle s'éteint au contact de l'eau et est alors une des causes les plus actives de la destruction des maçonneries. Si l'analyse chimique permettait de déterminer l'état de combinaison des corps en présence, elle résumerait à elle seule l'ensemble des essais nécessaires et suffisants pour juger de la qualité des produits hydrauliques. Mais en réalité elle est absolument incapable de donner un pareil renseignement. Un produit tout à fait incuit, dans lequel les combinaisons chimiques ont à peine commencé à se produire, et un ciment cuit à point donneront les mêmes résultats à l'analyse. De même encore, des fragments de chaux vive et d'argile calcinée qui auront été cuits isolément, puis ensuite broyés et mêlés après coup, pourront donner la composition d'un excellent ciment.

Si l'analyse chimique ne peut prouver qu'un produit est de bonne qualité, elle peut cependant dans certains cas établir qu'un produit donné est certainement mauvais. Ainsi l'absence de silice et d'alumine, ou la proportion

tout à fait insuffisante de ces corps, permet de conclure que le produit étudié n'est pas hydraulique ou tout au moins est très mauvais. Si l'on ne pouvait le constater autrement, ce serait là un motif suffisant pour conserver l'analyse chimique, malgré les difficultés de son exécution, au nombre des essais de réception. Mais, en fait, il existe d'autres essais : celui de résistance à la rupture et celui de déformation, qui permettent de constater les mêmes défauts d'une façon beaucoup plus simple et plus précise ; ils ont en outre le grand avantage de ne pas être mis en défaut par des mélanges après mouture, qui permettent si facilement de rétablir après coup une composition chimique normale.

Si l'analyse complète d'un ciment ne présente pas grand intérêt, on peut penser que la détermination isolée de certains corps particuliers, dont la présence serait toujours nuisible, présenterait une utilité plus sérieuse. Mais, en fait, il n'existe aucun corps dont la présence soit dans tous les cas nuisible. Le soufre à l'état de sulfate et de sulfure est nuisible pour les travaux à la mer, mais il semble tout à fait inoffensif pour les travaux en eau douce. Son dosage peut donc être utile dans certains cas, mais pas d'une façon générale. On a considéré également la présence de la magnésie comme essentiellement dangereuse à la suite des mécomptes qui ont résulté de l'emploi de ciments employés dans l'ouest de la France, mais il est bien établi aujourd'hui que les accidents occasionnés par l'emploi de ces ciments ont été amenés exclusivement par la présence de magnésie non combinée. La chaux à cet état eût été infiniment plus pernicieuse. On peut obtenir des ciments irréprochables tenant jusqu'à 15 p. 100 de magnésie. Il n'y a donc aucun motif pour proscrire ce corps ; il se pourrait bien, au contraire, que sa présence dans les ciments destinés aux travaux à la mer fût très avantageuse.

Il semble donc bien qu'aujourd'hui encore la conclusion à laquelle était arrivé M. Guillain, en 1885, est la seule logique, en la limitant, bien entendu, aux ciments destinés aux travaux maritimes, les seuls en question dans son rapport :

« *Les seules données de l'analyse chimique que le cahier des charges peut et doit prendre pour base d'un refus formel des ciments sont celles relatives à la présence des éléments qui ne peuvent être que nuisibles, comme le sulfate de chaux ou les sulfures.* »

Pour les travaux en eau douce, la restriction finale elle-même devrait être supprimée, car il n'existe aucun fait qui permette d'attribuer dans tous les cas une influence nuisible aux composés du soufre. Les expériences faites sur ce sujet par M. Deval, au laboratoire de la ville de Paris, et, plus récemment, par M. Candlot, ont conduit à des résultats négatifs. D'ailleurs, il est à peu près impossible d'obtenir des ciments à prise rapide exempts de sulfate.

Si l'analyse chimique ne peut, en tant qu'essai de réception, donner aucune indication utile sur les qualités et défauts des ciments, il n'en faudrait pas conclure que l'on ne doive jamais faire d'analyses de ciments et que l'on ne puisse introduire à son sujet aucune clause dans un cahier des charges. Les analyses de ciments sont indispensables dans les études d'ensemble sur ces produits, ou simplement pour rechercher la cause d'anomalies observées dans une fabrication déterminée. Elles sont très utiles comme épreuves d'identification pour s'assurer que la fabrication d'une usine reste régulière, que les produits d'une nouvelle usine ne diffèrent pas trop des produits similaires. Tant qu'il n'existera pas d'essais concluants pour apprécier toutes les qualités des produits hydrauliques sans aucune exception, il sera prudent de recourir à de semblables essais d'identification, en leur accordant une importance plus ou moins

grande suivant les usines auxquelles on a affaire. Mais c'est là une question qui est laissée en dehors de cette étude; on ne s'y occupe, comme cela a déjà été dit à plusieurs reprises, que des essais fondamentaux, des essais qui peuvent donner des renseignements positifs sur certaines qualités définies des produits étudiés.

3° Détermination du poids spécifique.

Le poids spécifique est une propriété élémentaire et irréductible des corps, mais il n'existe aucune relation directe ou indirecte entre cette propriété et les qualités d'hydraulicité. Si les combinaisons chimiques s'effectuaient sans changement de volume, le poids spécifique serait entièrement et rigoureusement déterminé par la composition chimique. En fait, il y a généralement une contraction, mais elle est toujours faible et atteint rarement 10 p. 100. Aussi, les variations de poids spécifique qui peuvent résulter des changements dans l'état de combinaison des éléments des ciments sont tout à fait inappréciables ; le poids spécifique est pratiquement déterminé d'une façon exclusive par leur composition chimique. Mais si l'on remarque que les densités des trois éléments essentiels : silice, alumine et chaux, ne sont pas extrêmement différentes et que leurs proportions relatives varient très peu d'un produit hydraulique à un autre, on est conduit à penser que les variations de poids spécifique dépendent principalement de la proportion des corps les plus légers, eau et acide carbonique, c'est-à-dire de la teneur en matières volatiles. Voici les résultats de quelques expériences qui confirment pleinement ces prévisions :

	Perte au feu.	Densité du produit naturel.	Densité du produit calciné.
Chaux de Trogue. . . .	15,6 p. 100	2,56	3,15
Chaux du Teil.	11,7 —	2,78	3,20
Ciment de laitier. . . .	7,0 —	2,80	3,10
Ciment de Vassy	3,0 —	2,92	3,05
Ciment portland	2,0 —	3,07	3,19

On peut calculer le changement de densité résultant de la présence de l'eau et de l'acide carbonique en attribuant à ces deux corps les densités :

Eau	1,3
Acide carbonique.	2,2

On peut même calculer assez exactement la densité absolue en attribuant à chacun des éléments solides la densité qu'ils ont à l'état isolé, soit :

Fe^2O^3.	5,3
Al^2O^3.	4,0
MgO	3,7
CaO.	3,3
SiO^2.	2,62 Ciments et chaux. / 2,20 Laitiers granulés.

Pour les laitiers granulés qui sont *vitreux*, il faut prendre la densité de la silice amorphe 2,2, qui est bien inférieure à celle de la silice cristallisée 2,62.

Les déterminations de poids spécifique ne peuvent être considérées que comme un moyen détourné de mesurer la teneur en matières volatiles.

Cet essai n'a donc pas une grande portée pratique, et fait dans une certaine mesure double emploi avec les essais de rapidité de prise et de résistance à la rupture. Il ne saurait être considéré comme une clause fondamentale des cahiers des charges de réception. Si cependant on tient à insérer une clause limitant la teneur en matières volatiles, on pourra, dans le cas où l'on n'a pas

à sa disposition de laboratoire qui permette de faire l'essai beaucoup plus précis de la perte au feu, fixer une limite inférieure au poids spécifique; cette limite devra varier suivant la nature des produits visés. La perte au feu admise pourra être de 3 p. 100 pour les ciments portlands, de 6 p. 100 pour les ciments à prise rapide, ciments de grappier et de laitier, et descendra pour les chaux à 12 p. 100, ce qui correspondra respectivement à des poids spécifiques de 3,0, de 2,8 et de 2,5 p. 100.

Les procédés qui peuvent être employés pour déterminer les poids spécifiques sont nombreux; tous ceux qui sont usités dans les laboratoires de physique, tels que la balance hydrostatique, la méthode du flacon, conviennent parfaitement; on peut également employer des volumètres qui, quoique un peu moins précis, suffisent pour cet usage pratiqué (Voir pour la description, note annexe II à la fin du mémoire). Quel que soit le procédé expérimental employé, il est indispensable de ne se servir que de liquides très fluides, tels que l'essence minérale, la benzine, qui, seuls, permettent l'élimination complète des bulles d'air.

4° Détermination de la densité apparente.

L'essai de densité apparente est depuis longtemps un des essais les plus usités pour les réceptions de produits hydrauliques. Le rapport général de la Commission d'unification des méthodes d'essai s'exprime ainsi : « *La densité apparente est considérée depuis longtemps déjà comme l'un des éléments d'appréciation à considérer pour la réception des agglomérants hydrauliques et a fait l'objet de dispositions spéciales dans les plus anciens cahiers des charges.* » La raison d'être de cet essai est qu'il donnerait une indication sur le degré de cuisson, dont la qualité des produits dépend d'une façon directe et incontestable.

Mais cette relation ne peut être que très indirecte et détournée; il ne s'agit pas là d'un essai semblable aux précédents donnant la mesure directe de certaines propriétés définies des ciments. Il était donc nécessaire d'étudier de très près la question pour savoir si cette relation, reconnue d'une façon purement empirique, n'était pas simplement accidentelle. Les études de MM. Guillain et Vétillart, confirmées depuis par les recherches de M. Candlot, ont montré en effet que la densité apparente dépend principalement de la finesse des grains et accessoirement de la teneur en matières volatiles.

Si les ciments peu cuits sont plus légers, c'est qu'étant plus tendres, ils deviennent, à mouture égale, plus fins que les ciments bien cuits; de même, les chaux peu cuites donnent par l'extinction une poudre plus fine. Il suffit de modifier la mouture dans le cas du ciment, de diminuer l'eau d'extinction dans le cas de la chaux pour surélever la densité. Un semblable essai est donc tout à fait illusoire; il donne sur la cuisson des renseignements infiniment moins précis et directs que l'essai de résistance à la rupture et d'invariabilité de volume à chaud. Le premier de ces essais indique suffisamment le degré d'hydraulicité des chaux; le second est tout à fait concluant pour reconnaître les défauts résultant pour les ciments portlands d'une cuisson insuffisante. L'essai de densité apparente ne doit être considéré que comme un moyen d'apprécier la finesse des poudres, et il fait à ce point de vue double emploi avec la détermination d'eau de gâchage, essai beaucoup plus simple et plus précis, qui a l'avantage de n'exiger aucun appareil et de ne pas être influencé par la teneur en matières volatiles.

La discussion des expériences du laboratoire des ponts et chaussées, publiées dans le 3e fascicule de la Commission des ciments, montre que le poids du litre P peut être

exprimé en fonctions du poids d'eau p nécessaire pour gâcher 100 grammes par les relations suivantes, qui donnent des résultats exacts à 100 grammes près :

Chaux hydraulique, ciment de laitiers, ciment de Vassy. . . . $P = 2{,}4 - 54{,}5\,p.$
Ciments artificiels, ciments naturels, ciments de grappiers. . . $P = 1{,}1 - 14{,}5\,p.$

P et p étant exprimés l'un et l'autre en kilogrammes.

La conclusion à laquelle M. Guillain était arrivé, en 1885, est donc encore de tout point exacte ; si l'on voulait la modifier, ce ne pourrait être aujourd'hui que pour l'accentuer : « *Pour une même nature de roche d'une même fournée provenant d'une même pâte, le poids du litre non tassé peut varier de près d'un quart, suivant le degré de finesse de la mouture... Les écarts de poids que l'on constate au cours d'une même fabrication très régulière sont trop grands pour qu'on attache à la limite ainsi déterminée une valeur décisive* ». On devrait dire aujourd'hui au lieu d'une *valeur décisive*, une *valeur quelconque*. En effet, les expériences faites par M. Vétillart, au laboratoire de Calais, qui ont servi de base à la conclusion précédente, n'ont pas été infirmées par les recherches plus récentes. Elles ont au contraire été confirmées par les études de M. Candlot et, comme il vient d'être montré, par les expériences faites au laboratoire des ponts et chaussées de Paris.

Si cependant, par respect pour la tradition, on tient à conserver un essai de densité apparente que l'on utilisera seulement comme épreuve d'identification, il y a lieu de se demander si le dispositif expérimental recommandé par la Commission d'unification doit être adopté. En se reportant aux recherches faites à ce sujet par M. Alexandre, on constatera que la recommandation exclusive de l'entonnoir modifié de M. Viallet n'est aucunement justifiée. Il résulte en effet de ces recherches que tous les procédés de remplissage de la mesure qui introduisent le ciment sans

vitesse acquise ni trépidation, donnent exactement le même résultat, comme le prouvent les expériences ci-dessous faites sur un même ciment avec différents appareils de remplissage :

	DENSITÉ OBSERVÉE.	
	Maximum.	Minimum.
Plan incliné du cahier des charges de Boulogne	1.328gr	1.318gr
Entonnoir allemand	1.348	1.338
Entonnoir de M. Viallet	1.354	1.334
Entonnoir de la Commission.	1.324	1.313

On voit que les résultats du plan incliné de Boulogne et de l'entonnoir de la Commission sont rigoureusement identiques et que, pratiquement, ils ne diffèrent pas de ceux de l'entonnoir allemand et de l'entonnoir de M. Viallet, attendu que l'écart n'est que de 20 grammes, tandis que l'on accorde dans les cahiers des charges une tolérance d'au moins 100 grammes pour les variations de densité apparente. On aurait d'ailleurs rempli la mesure à la main, en ayant soin de diviser le ciment et de le laisser doucement glisser entre les doigts, qu'on aurait certainement eu le même résultat. La seule conclusion de ces expériences serait que tous les procédés de remplissage sans vitesse ni trépidation sont également bons ; il n'y a que la mesure dont les dimensions doivent être définies, ainsi que cela a été établi depuis longtemps par les expériences de M. Vétillart et de M. Candlot. Si pourtant on tient à définir un appareil, il faut conserver celui qui existe aujourd'hui partout, c'est-à-dire le plan incliné et ne pas le remplacer par un appareil rigoureusement équivalent. Il est toujours mauvais de changer les usages quand il ne doit en résulter aucune amélioration. Cela est particulièrement regrettable pour un essai qui est appelé, il faut l'espérer, à disparaître bientôt.

5° Essai d'homogénéité.

L'essai d'homogénéité n'est pas un essai de qualité; parmi les ciments mélangés, il existe de très bons produits et il n'est aucunement prouvé que, par des mélanges convenables, on ne puisse améliorer la qualité de ciments artificiels portlands.

Ce ne peut être qu'un essai d'identification, utile surtout pour déceler les fraudes trop fréquentes qui consistent à ajouter au ciment portland des matières, sinon nuisibles, au moins inutiles, telles que laitier, mâchefer, craie, etc., qui ont le grand mérite d'abaisser considérablement le prix de revient.

Des deux essais indiqués par la Commission d'unification, l'observation à la loupe est certainement le plus simple, mais il est aussi peu concluant. Il faut une grande expérience pour reconnaître au milieu des cendres, des incuits ou surcuits, que le ciment renferme toujours en petite quantité, les matières étrangères introduites par fraude. Cela devient même impossible si ces matières ont été pulvérisées assez fin. Il serait impossible, en cas de contestation avec un fabricant, d'invoquer une constatation à la loupe, qui repose toujours sur des appréciations trop personnelles.

Le second essai, l'essai à l'iodure de méthylène, est au contraire absolument probant et donne non seulement l'indication de la présence des matières étrangères, mais permet encore la séparation complète, ce qui rend possible la détermination pondérale et même l'analyse chimique. Ce procédé a depuis longtemps fait ses preuves dans les études minéralogiques, c'est le seul que l'on puisse songer sérieusement à employer pour reconnaître des mélanges dans des corps en poudre fine comme les ciments. La question de dépense ne peut pas entrer en

ligne de compte quand on réfléchit que les sommes en jeu dans les fournitures de ciment se chiffrent souvent par centaines de mille francs. Il ne faudrait pas d'ailleurs s'exagérer les dépenses qu'entraîne cet essai. Il faut, pour une expérience quantitative, 5 centimètres cubes valant 3 francs; mais, on peut recueillir la majeure partie du liquide et réduire la dépense à 0f,50 ou 1 franc au plus. Pour un essai purement qualitatif, il suffit de 1 centimètre cube de liquide, ce qui réduit encore la dépense (Voir pour le dispositif expérimental la note IV).

Une clause relative à cet essai ne devrait, bien entendu, figurer en aucun cas dans un cahier des charges. On fait un marché pour un produit déterminé; on n'a pas à spécifier que, pour reconnaître les fraudes, on emploiera tel ou tel procédé de contrôle. Le faire équivaudrait, comme il a déjà été dit plus haut, à déclarer que toute fraude qui échapperait au procédé de contrôle précité, n'en serait plus une.

6° Essai de prise.

La Commission d'unification a défini deux catégories d'essais de prise : un essai sur les pâtes pures qu'elle a conservé sous la forme où il est depuis longtemps usuel, et accessoirement un essai sommaire sur les mortiers.

L'essai de prise ne mesure pas une propriété élémentaire et irréductible des ciments, mais une qualité directement utile à l'emploi, laquelle est une résultante très complexe de phénomènes variés. Cet essai est utile et ne semble pas pouvoir être remplacé, sinon jamais, au moins d'ici longtemps, par d'autres essais équivalents plus simples.

La rapidité initiale du durcissement d'un mortier doit être plus ou moins grande suivant les usages; pour les bétons, elle devra être faible; au contraire, pour des tra-

vaux à la mer effectués entre deux marées, elle devra être considérable. On est donc amené nécessairement à faire figurer au nombre des clauses d'un cahier des charges de réception un essai de prise.

L'essai de prise tel qu'il est fait habituellement, tel qu'il est recommandé par la Commission d'unification prête à des critiques très sérieuses. La durée de prise est mesurée sur une pâte pure, tandis qu'elle n'est intéressante à connaître que sur les mortiers sableux. Le mode de procédé suivi ne pourrait se justifier que si les durées de prise étaient, dans les deux cas, les mêmes ou tout au moins proportionnelles. Or, aucune supposition ne saurait être plus fausse. Quelques expériences faites sur ce sujet par M. Candlot ont conduit aux résultats suivants pour les ciments artificiels :

DURÉE DE LA PRISE.		RAPPORT.
Pâte pure.	Mortier 1 : 3.	
5h 0m	10h 0m	2,0
1 20	4 0	3,0
3 0	5 0	1,7
0 22	2 0	5,5
0 8	0 45	6,0
1 55	2 47	1,45
0 18	2 30	8,3
0 30	0 45	1,5

Des expériences de M. Féret, faites au laboratoire de Boulogne-sur-Mer, ont donné sur différents produits les résultats suivants.

NATURE DES PRODUITS	PATE PURE	MORTIER 1 : 3	RAPPORT
	h. m.	h. m.	
Ciments artificiels.	0 6	0 14	2,3
Id.	0 12	0 21	1,7
Id.	0 8	1	7,5
Id.	0 5	0 50	10,0
Id.	0 37	2 54	5,0
Id.	10 35	12 20	1,2
Ciment rapide	0 13	0 21	1,6
Grappiers	7 5	8 25	1,2

Voici une seconde série d'expériences de M. Féret, faites avec un sable très fin retenu entre les tamis 900 et 4.900. Le ciment pur et le mortier étaient gâchés sensiblement à la consistance normale, ce qui demandait pour le mortier 1/3 un poids d'eau sensiblement égal à celui du ciment.

NATURE des produits	DÉBUT DE LA PRISE			FIN DE LA PRISE		
	Pâte pure	Mortier 1 : 3	Rapport	Pâte pure	Mortier 1 : 3	Rapport
	h. m.	h. m.		h. m.	h. m.	
Portland.	0 25	1	2,4	4 30	32	7
id.	0 25	2 30	6	5	72	14,4
id.	0 26	10	24	5	32	6,4
id.	0 30	5	10	6	66	11
id.	2 30	6	2,4	8 30	57	6,5
id.	3	15	5	13	54	4,1
id.	3	8	2,7	8	46	5,8
Rapide.	0 8	0 18	2	0 22	27	72,2
Grappiers. . . .	10	17	1,7	47	67	1,5
Laitier.	7	16	2,3	32	62	1,9
Chaux.	16	18	1,1	67	98	1,4

Les écarts observés dans ces expériences sont bien plus grands encore puisqu'ils varient pour la fin de prise de 1,1 à 72.

Cela tient à la quantité beaucoup plus considérable d'eau qu'a nécessitée pour le mortier l'emploi de sable fin.

Enfin, voici une dernière série d'expériences de M. Féret faites avec le même sable sur des mortiers de compositions différentes :

NATURE des produits	FIN DE LA PRISE			
	CIMENT pur	MORTIER		
		1 : 2	1 : 3	1 : 5
	h. m.	h. m.	h. m.	h.
Portland.	2 40	22 3	48 0	71
id.	7 0	32 0	53 0	95
id.	6 30	28 0	33 0	54
Rapide.	0 28	0 49	2 30	»
Grappiers. . . .	25 0	29 0	49 0	73
Chaux.	47 0	140 0	145 0	»

On remarquera que le troisième ciment portland dont la prise en pâte pure est trois fois plus lente que celle du premier donne, au contraire, des mortiers dont la prise est plus rapide.

Enfin, mes recherches personnelles m'ont donné des résultats analogues. J'ai reconnu, de plus, qu'avec des produits anormaux les écarts pouvaient être infiniment plus considérables encore. Un ciment artificiel incuit qui faisait, en pâte pure, sa prise complète au bout de 1 heure, n'avait pas encore, en mortier 1 : 3, terminé sa prise au bout de huit jours.

Il résulte de ces chiffres que pour les produits hydrauliques de qualité normale et des sables ordinaires, le rapport de la durée de prise du mortier 1 : 3 à la pâte pure varie normalement de 1,5 à 9, c'est-à-dire dans le rapport de 1 à 6. Pour certains produits particuliers l'écart peut être beaucoup plus grand.

Un second défaut plus grave encore des essais usuels de prise est de ne pas donner le renseignement qui est directement utile à connaître, mais un renseignement à côté. Pour les usages pratiques, il importe fort peu de savoir au bout de combien de temps un mortier sera arrivé à un degré de durcissement déterminé ; ce qui est intéressant à savoir, c'est à quel durcissement un mortier arrivera au bout d'un temps déterminé, qui est fixé par les conditions mêmes d'emploi. Pour des travaux entre deux marées il faudra, pour comparer deux ciments, savoir quelle dureté ils auront pris au moment où ils recevront le premier choc des vagues, c'est-à-dire au bout d'une durée moyenne de 6 heures ; de même pour la confection d'un béton, ce qui est intéressant à connaître, c'est le degré de durcissement qu'aura pris une première couche de mortier quand on viendra appliquer la seconde. Si le durcissement croissait proportionnellement au temps, on pourrait, de la mesure usuelle de la

durée de prise, déduire par un calcul élémentaire la résistance acquise au bout d'un temps donné. Mais cette proportionnalité n'existe pas.

Voici, par exemple, deux ciments de Vassy faisant prise en 5 minutes ; ils sembleraient d'après cela équivalents pour servir d'enduits protecteurs dans des travaux entre deux marées. Or, l'un au bout de 3 heures possédait une résistance à l'écrasement de $28^{kg},5$ par centimètre carré, et l'autre $10^{kg},7$, soit environ moitié moins. Ils ne sauraient donc être considérés comme équivalents.

Il faut, avant de chercher la méthode la plus convenable pour les essais de prise, bien définir ce que l'on appelle la *prise*. D'après les considérations développées plus haut sur le rôle de la sursaturation dans le durcissement des mortiers, il semblerait que la prise, ou commencement du durcissement, corresponde à un phénomène parfaitement défini : celui où les premiers cristaux commencent à se déposer de la solution sursaturée ; la durée de la prise serait alors nécessairement fonction de la quantité d'eau employée pour gâcher le mortier. Cette prise chimique doit bien exister en réalité, mais elle n'est pas appréciable, sauf peut-être dans les ciments à prise rapide ; pour les autres produits elle passe inaperçue. Il doit d'ailleurs y avoir une série de prises chimiques correspondant à chacun des composés qui concourent au durcissement, et de plus cette prise doit, aux divers points de la masse du mortier, avoir lieu à des époques variables suivant le nombre de germes cristallins disséminés en chaque point. Enfin il semble que dans bien des cas cette prise chimique se produise pendant le gâchage du mortier.

Dans la pratique, ce que l'on appelle la prise est tout autre chose ; l'expérience montre que depuis le mélange de l'eau et du ciment, la solidité de la masse va en croissant progressivement suivant une loi plus ou moins

compliquée. On dit que la prise est faite lorsque la résistance mécanique du mortier a atteint une valeur choisie arbitrairement.

L'allure de cette solidification varie considérablement d'un produit à l'autre. Voici quelques exemples qui le montrent très nettement; les tableaux donnent les résistances à l'écrasement par centimètre carré mesurés sur des cylindres de 30 millimètres de diamètre et 30 millimètres de hauteur. La résistance de 3 kilogrammes est celle qui correspond à ce que l'on considère habituellement comme la fin de la prise; arrivé à ce degré de solidité, le mortier supporte sans enfoncement appréciable la pression énergique du pouce.

COMPOSITION des mortiers		RÉSISTANCE PAR CENTIMÈTRE CARRÉ											
		VASSY (bon)		VASSY (médiocre)		PORTLAND incuit		CHAUX hydraulique		CIMENT NATUREL du Dauphiné			
		Pâte	Mortier	Pâte	Mortier	Pâte	Mortier	Pâte	Mortier	Pâte	Mortier	Mortier	Mortier
Ciment		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Eau		0,5	0,7	0,5	0,7	0,32	0,5	0,5	0,7	0,25	0,5	0,5	0,4
Sable		»	3	»	3	»	3	»	3	»	3	4	3
		kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.
Age des mortiers.	5m	3,6	0,3	4	0,3	»	»	»	»	»	»	»	»
	20	14	1,6	12	1,8	»	»	»	»	0,5	»	»	»
	1h 30	24	3	11	1,3	1,4	»	»	»	10	0,6	»	»
	6	30	3,5	18	2	6,2	0,7	»	0,4	28	1,9	1,9	3,1
	1j	»	»	»	»	29	6	»	1,4	36	2,8	2,9	4,4
	4	»	»	»	»	»	61	3	5	»	»	»	»

On voit immédiatement sur ces tableaux la raison des rapports variables entre les durées de prise des pâtes pures et des mortiers qui ont été signalés plus haut. Au bout de temps égaux, les quantités de matières hydratées dans la pâte pure et le mortier sableux sont nécessairement les mêmes, mais la résistance mécanique obtenue

est différente en raison de la compacité différente, du volume inégal à remplir par la cristallisation. Les courbes représentatives se trouvent ainsi différentes à l'échelle tout en conservant des formes semblables. Pour qu'il y ait proportionnalité entre les durées de prise, il faudrait que les courbes de résistance fussent des droites passant par l'origine, ce qui n'est pas le cas.

En examinant le tableau relatif au ciment rapide médiocre, on voit qu'un changement insignifiant dans les propriétés du ciment, ou dans la valeur de la résistance choisie arbitrairement pour définir la prise, peut faire varier le rapport des durées de prise d'une valeur très petite à une valeur extrêmement grande.

Il est donc bien certain que par des expériences faites sur les pâtes pures, on ne peut se faire aucune idée de la durée de prise des mortiers. Il est certainement préférable, si cela est possible, de faire porter les essais directement sur de véritables mortiers. Un des motifs qui ont empêché jusqu'ici de le faire est la supposition que la présence de grains de sable dans le mortier rend impossible toute mesure, même approchée, de la durée de prise d'un mortier. Or il n'en est rien; mes expériences personnelles, des expériences semblables faites par M. Deval au laboratoire de la Ville de Paris et par M. Féret au laboratoire de Boulogne, ont montré que la fin de la prise d'un mortier se déterminait avec la même précision que celle de la pâte pure.

Étant établi qu'il est possible de faire des expériences de prise sur les mortiers, une seconde question se pose maintenant. Faut-il faire les essais de prise sur des mortiers identiques de tous points à ceux des travaux, ce qui entraînerait une diversité fâcheuse dans les clauses des cahiers des charges, ou peut-on se contenter d'un petit nombre de mortiers types? Il semble, étant donné que l'on s'est contenté jusqu'ici des essais sur la pâte

pure, que l'on réaliserait déjà, par l'emploi d'un mortier unique de composition moyenne, un progrès assez considérable pour que l'on puisse provisoirement au moins et peut-être définitivement s'en contenter; mais avant de discuter cette question et de définir un semblable mortier, s'il y a lieu, il faut passer en revue les diverses circonstances étrangères à la nature du ciment qui font varier la rapidité de prise.

L'influence d'un certain nombre de ces conditions : température, eau de gâchage, qui a été étudiée par M. Vétillart et par M. Candlot est aujourd'hui bien connue; il suffit de rappeler rapidement les principales de ces conditions.

Température. — La prise des ciments étant due à des phénomènes chimiques, croît très rapidement avec la température, comme tous les phénomènes semblables. Mais cette variation est très inégale d'un produit à un autre. Ainsi M. Candlot a trouvé que, pour différents portlands, le rapport des durées de prises entre 30° et 0° pouvait varier de 1,55 à 10. Pratiquement il n'est pas possible de faire tous les essais de prise à une température rigoureusement invariable; tout ce que l'on peut espérer, c'est de se maintenir dans l'intervalle de 15 à 20°. Cet écart de 5° amènera, dans les essais des ciments portlands, une incertitude moyenne d'au moins 50 p. 100.

Eau de gâchage. — La durée de prise est très différente, suivant que le gâchage est fait à l'eau douce ou à l'eau de mer, et la différence est très variable d'un ciment à un autre. Elle peut aller de 1,5 à 15, suivant la nature et l'état de conservation du ciment. Il est donc indispensable d'avoir deux essais de prise : l'un à l'eau douce, l'autre à l'eau de mer, correspondant à l'emploi particulier auquel le ciment est destiné. On pourrait,

d'après les recherches de M. Candlot, employer pour les essais de prise, à défaut d'eau de mer, une solution de chlorure de calcium à 20 grammes par litre.

Addition de matières solides. — Certaines matières pulvérulentes et solides ajoutées au ciment, telles que le sulfate de chaux, la chaux et la magnésie, peuvent augmenter considérablement la durée de prise, aller même jusqu'à la décupler.

Consistance initiale de la pâte. — Il semble utile, dans le cas de ciment pur tout le monde du moins est d'accord sur ce point, d'employer pour les essais de prise des pâtes de même consistance. On adopte unanimement, comme consistance normale, celle qui est intermédiaire entre la consistance boueuse et la consistance sèche ou sableuse. Elle correspond à un point de transition nettement défini que l'on peut caractériser, comme le fait le cahier des charges de Boulogne, par son degré d'adhérence à la truelle ou par l'emploi de la sonde Tetmajer. Le second procédé est certainement plus rationnel, puisqu'il procède par des mesures de résistance mécanique; c'est celui qui a été adopté par la Commission d'unification des méthodes d'essai. Le premier procédé est beaucoup plus simple, puisqu'il n'exige l'emploi d'aucun appareil, et il est aussi précis, contrairement à ce que l'on supposerait *a priori*. En outre, la consistance qu'il donne est exactement la même que celle de la sonde Tetmajer. Cela a été très exactement établi par les expériences de MM. Alexandre et Féret. Si donc on voulait conserver les essais de prise sur pâte pure, il est indifférent de définir la consistance normale par l'un ou par l'autre de ces procédés.

Pour les mortiers, il est moins aisé de s'entendre sur la consistance normale la plus convenable. Il n'est même pas prouvé que des essais doivent nécessairement porter

sur des mortiers de consistance définie. Celle qui paraîtrait *a priori* devoir être choisie serait évidemment une consistance plastique analogue à celle des mortiers employés sur les chantiers. Mais cette consistance a le grave inconvénient pour les essais de donner des briquettes d'épreuve qui ne sont pas homogènes. D'une part, il est impossible d'en chasser les bulles d'air; d'autre part, sous l'influence des plus légères trépidations, sous l'action même de la pesanteur seule, il se produit un départ entre l'eau et le ciment qui enrichit en ciment la partie basse des éprouvettes. Il peut en résulter un écart du simple au double dans la durée de prise des faces supérieure et inférieure. Ces deux inconvénients ne sont pas moins graves dans les essais de résistance à la rupture, qu'il est désirable de pouvoir faire sur le même mortier que les essais de prise. On évite ces deux inconvénients en employant un mortier demi-ferme qui nécessite un léger battage pour remplir le moule. L'air emprisonné dans le mortier ne se réunit plus en grosses bulles; la majeure partie s'échappe pendant le battage de la masse qui est poreuse au début. L'autre partie reste sous forme de petites bulles assez uniformément réparties pour ne pas détruire l'homogénéité des éprouvettes. D'autre part, en raison de la consistance plus considérable de la masse, le ciment et l'eau ne peuvent pas cheminer entre les grains de sable de façon à se séparer.

Il m'a semblé, d'après quelques essais en trop petit nombre encore, que la consistance la plus favorable pour le mortier 1:3 de ciment portland et sable normal pouvait être définie par la condition que la sonde Tetmajer chargée de 3 kilogrammes s'enfonce à mi-profondeur dans le mortier battu légèrement jusqu'à ressuage et enfermé dans le moule de 40 millimètres de hauteur et 80 millimètres de diamètre. Mais il faut d'abord voir si la consistance peut pour tous les essais être maintenue

invariable, c'est une question qui est liée à la composition du mortier.

Composition du mortier d'épreuve. — La durée de prise varie considérablement avec la composition du mortier, comme le montrent les chiffres donnés plus haut pour la comparaison des pâtes pures et des mortiers 1:3. C'est pour ce motif que l'essai sur les pâtes pures a dû être rejeté. Comment doit-on déterminer la composition du mortier d'épreuve, ou des mortiers d'épreuve, s'il y a lieu d'en employer plusieurs?

La composition d'un mortier est définie par trois variables indépendantes :

Le rapport du poids d'eau au poids de ciment;

Le rapport du poids de sable au poids de ciment;

Le degré de tassement produit par un battage plus ou moins énergique.

Le principe absolu dans toute expérience de comparaison est de faire ces comparaisons, toutes choses égales d'ailleurs, en maintenant invariables, au moins dans la limite du possible, toutes les conditions étrangères aux objets de la comparaison, c'est-à-dire au ciment. Il faudrait donc garder invariable, dans les essais de prise, en outre de la consistance, la proportion d'eau, la proportion de sable et le tassement. Mais cela n'est pas possible, car la consistance est entièrement déterminée par les trois conditions ci-dessus et réciproquement, de telle sorte que l'on ne peut plus disposer arbitrairement que de deux de ces conditions sur trois. Le tassement doit nécessairement être défini pour avoir des briquettes homogènes et comparables entre elles. Pour tous les essais, c'est l'usage, — et l'on ne voit guère moyen de faire autrement, — de s'arrêter quand l'eau reflue à la surface des briquettes : ce qui correspond à un tassement nul

pour les mortiers plastiques et un tassement de plus en plus grand à mesure que les mortiers deviennent plus secs.

Il ne reste donc plus que l'eau et le sable; il faut nécessairement, si l'on tient à maintenir invariable la consistance, faire varier l'un des deux quand on a affaire à des produits dont le degré de finesse n'est pas identique. L'usage général dans tous les essais est de conserver la quantité de sable constante et de faire varier la proportion d'eau, mais la raison d'être de cet usage est assez difficile à donner. On ne semble pas jusqu'ici s'être posé la question; il semble pourtant à première vue que l'eau qui intervient chimiquement pour produire le durcissement est un facteur autrement important que le sable, et que, par suite, son poids devrait être maintenu constant. Mais on peut invoquer un argument plus précis. Les recherches de M. Féret ont mis en évidence ce fait bien vraisemblable *a priori* que l'inégale résistance à la rupture des différents mortiers sableux ne dépend que de leur *compacité*, c'est-à-dire du rapport du poids de ciment au volume des vides existant dans le mortier entre les grains de sable. Les comparaisons de résistance devraient donc se faire à compacité égale: c'est le principe qu'a posé M. Guillain dans le cahier des charges de Boulogne, pour les essais de résistance proprement dit; il a en même temps indiqué le moyen de réaliser cette égalité de compacité. Il suffit de laisser fixe le rapport du poids d'eau au poids de ciment et de battre le mortier jusqu'à ce que l'eau reflue à la surface. Le même principe semble logiquement devoir s'appliquer aux essais de prise. On laisserait la proportion d'eau constante et on ferait varier, soit la quantité de sable, soit la consistance. Les essais comparatifs du tableau précédent relatifs au ciment du Dauphiné justifient ce mode de procéder.

Il est facile, pour chaque nature de produits hydrauliques, de définir une quantité d'eau fixe qui se rapproche plus ou moins de la moyenne employée dans les travaux, mais il ne paraît pas possible de garder la même quantité pour toutes les catégories de produits, en raison, d'une part, des différences de finesse, d'autre part, des différences d'emploi. Il faudrait au moins deux proportions d'eau différentes :

Pour les ciments à prise lente (artificiels, naturels, grappiers et laitiers) une quantité à déterminer comprise entre 0,40 et 0,50 du poids du ciment;

Pour les ciments de Vassy et les chaux hydrauliques une quantité à déterminer comprise entre 0,60 et 0,80.

Le poids d'eau une fois fixé, on ferait varier le poids de sable pour atteindre la consistance normale choisie pour le mortier. Quant à la nature du sable, il semble logique de prendre le même que pour les essais de rupture.

Mesure de la résistance. — On se sert actuellement pour les essais de prise soit de l'aiguille Vicat, soit simplement du pouce : ces deux procédés ont à peu près la même précision, mais ils permettent seulement de mesurer la *durée* de prise. Pour mesurer au contraire, comme cela est désirable, le degré de durcissement à un moment donné, il faut employer un appareil qui permette de produire et de mesurer des efforts variables. On peut songer à employer la sonde Tetmajer et chercher l'effort nécessaire pour produire un enfoncement donné. Ce procédé a un inconvénient : il n'intéresse que la surface du mortier. Il semble plus rationnel de mesurer l'effort de rupture de petites briquettes comme on le fait dans l'essai de résistance proprement dit, de telle sorte que l'essai de prise se fondrait avec l'essai de rupture ordinaire. Il faudrait seulement procéder à la rupture par écrasement, parce qu'il serait impossible de

démouler et d'installer dans l'appareil de rupture des briquettes destinées à l'arrachement. Il n'y a aucune difficulté, au contraire, pour les briquettes destinées à l'écrasement dont les formes géométriques sont beaucoup plus simples. On peut même, dans ce cas, pour les mortiers un peu fermes, faire le démoulage aussitôt après le moulage.

C'est par ces procédés qu'ont été obtenus les résultats donnés plus haut dans le tableau de la page 320.

Il ressort de cette discussion que dans l'état actuel, faute d'expériences assez nombreuses sur les mortiers, on ne peut que conserver provisoirement l'essai de prise sur les pâtes pures tel qu'il est actuellement usité. Mais cet essai est mauvais parce qu'il ne donne pas les indications réellement utiles, qui seraient les résistances prises sur des mortiers au bout d'un temps défini.

Il faut espérer que l'on pourra prochainement définir un essai de prise sur mortiers et il est à prévoir que cet essai finira par se confondre avec l'essai de résistance proprement dit auquel il se rattache directement.

7° Essai de résistance à la rupture.

L'essai de rupture est et doit rester l'essai fondamental pour la réception des produits hydrauliques ; non pas tant parce qu'il fait connaître la résistance mécanique des mortiers à l'emploi que parce qu'il donne à un certain point la mesure de la quantité totale de composés chimiques actifs renfermés dans un ciment. Or, il est bien évident que la résistance des ciments aux agents de dégradation croît *à peu près* dans le même sens. La réserve « *à peu près* » est indispensable, parce qu'il existe différents éléments actifs, aluminate et silicate de chaux, qui ne concourent pas au durcissement d'une façon absolument proportionnelle à leur résistance aux agents extérieurs. Il serait donc imprudent de vouloir classer rigoureusement par qualité, comme on est trop enclin à le faire, les produits hydrauliques d'après leur seule résistance à la rupture.

La Commission d'unification a prévu un grand nombre d'essais de rupture distincts en recommandant d'en varier le choix suivant les usages auxquels les produits sont destinés. Il y a là une erreur de principe contre laquelle on ne saurait protester trop énergiquement. Tous les essais de rupture, quand ils sont bien faits, doivent donner les mêmes résultats, c'est-à-dire donner le même classement relatif pour différents produits comparés entre eux. Les erreurs accréditées à ce sujet sont tellement répandues qu'il y a lieu d'entrer dans quelques détails.

On étudiera à ce point de vue :

1° L'influence du mode de rupture ;

2° L'influence de la composition du mortier d'essai.

Il s'agit d'établir non pas qu'il existe des rapports constants entre les différents chiffres de rupture, ce qui arrive pourtant la plupart du temps, mais seulement une relation numérique définie qui peut être plus complexe que le rapport simple. Pour le constater, il est indispensable de faire la comparaison *toutes choses égales d'ailleurs*. Autrement dit en appelant R et R′ la résistance à la rupture dans deux conditions différentes déterminées ; on doit avoir

$$R' = f(R, a, b, c, d, \ldots).$$

Les paramètres a, b, c, d, représentant la proportion et la nature du sable, celle de l'eau, la compacité, la température, l'âge des briquettes. Si l'on compare différents ciments en ayant soin de donner aux paramètres a, b, c, dans tous les cas les mêmes valeurs, on trouve qu'à des résistances R égales entre elles correspondent des résistances R′ également les mêmes. Si l'on mécon-

nait souvent l'existence de cette loi, c'est que l'on se refuse trop souvent à tenir compte des erreurs expérimentales, qui sont toujours importantes, et que, d'autre part, on admet souvent que la seule relation définie possible entre deux grandeurs est le rapport constant.

Influence du mode de rupture. — La Commission d'unification a défini trois modes de rupture :

La flexion, l'arrachement, l'écrasement.

Toutes les expériences faites sur la flexion montrent que les résultats sont rigoureusement proportionnels à ceux obtenus par arrachement. Ils devraient même à première vue être égaux; M. Durand-Claye a montré pourquoi cette égalité n'existait pas. Les expériences de M. Durand-Claye donnent pour les pâtes de ciment pur, à 7 jours et 28 jours, le rapport constant 1,9.

$$\frac{\text{Flexion}}{\text{Arrachement}} = 1{,}9.$$

Ces expériences ont porté sur 80 ciments; les valeurs extrêmes du rapport trouvé pour un ciment isolé ont été 1,6 et 2,3, ce qui donne pour les écarts extrêmes, par rapport à la moyenne, des différences en plus ou en moins de 20 p. 100, et ce qui ne donnerait certainement pas pour l'écart moyen 10 p. 100. Les erreurs habituelles sur les expériences de rupture sont non seulement de cet ordre, mais généralement plus élevées encore. Elles suffisent et au delà pour expliquer les variations du rapport observées d'une série d'expériences à une autre.

M. Féret, dans des expériences faites sur des mortiers sableux de composition variée, conservés dans des conditions différentes, est arrivé à des résultats semblables.

Le tableau suivant donne les différentes valeurs du rapport en question. Chaque chiffre a été obtenu par deux séries de rupture de 20 briquettes :

Mortier	1 : 2	1 : 3	1 : 5
Eau douce	1,95	2,4	2,35
Eau de mer	2,1	2	2,1

Tous ces rapports sont tellement voisins que, dans l'état actuel de précision que comportent les expériences de rupture, il est impossible de tirer une conclusion différente des essais de rupture et d'arrachement. Il est donc absolument inutile de les faire simultanément. Tout au plus pourrait-on dire que, si l'on considère la constance de ce rapport 2 établie pour tous les cas, il est indifférent de mesurer la résistance à la rupture par flexion ou par arrachement direct (*).

La comparaison des expériences à l'écrasement et à l'arrachement ne donne pas un résultat tout à fait aussi simple; il n'existe plus un rapport absolument constant dans tous les cas; cette constance n'existe que pour les briquettes d'âge moyen; elle est un défaut pour les âges extrêmes : 7 jours et 1 an, par exemple. Voici les résultats du calcul effectué sur les expériences du laboratoire des ponts et chaussées publiées dans le 3e fascicule de la Commission des ciments. On a pris les expériences relatives au mortier sableux âgé de 28 jours et de 6 mois, qui sont les plus intéressantes pour les essais de réception.

(*) Les résistances à l'arrachement sont prises sur des briquettes allemandes de 5 centimètres carrés de section; on divise la résistance totale observée par 5. Les résistances à la flexion, pour des prismes d'un décimètre de longueur, sont calculées par la formule

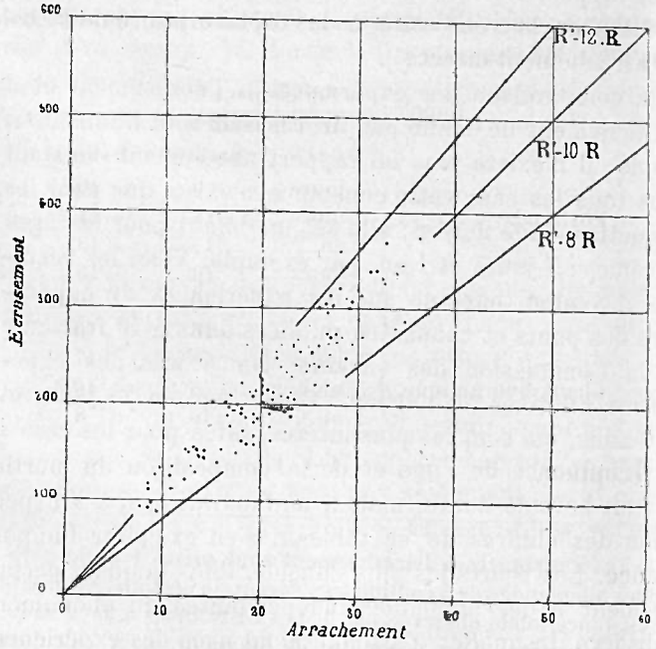
$$R = 15 \cdot \frac{F}{a^3};$$

F, effort total de rupture; a, côté du prisme supposé carré.

Mortier 1 : 3 — Rapport $\frac{\text{Écrasement}}{\text{Arrachement}}$.

	28 jours.	6 mois.
Portland artificiel	10,9	11,4
Naturel lent	10,5	8,9
Naturel rapide	11,0	9,3
Grappier	12,2	10,0
Ciment de laitier.	10,5	10,3
Chaux hydraulique.	12,7	8,15

Le graphique ci-dessous donne l'ensemble des résultats qui ont servi à calculer ces moyennes.



On voit que tous ces points se groupent autour de la ligne

Écrasement = 10. Arrachement

avec des écarts qui ne dépassent pas 25 p. 100 en plus

ou en moins, c'est-à-dire compatibles avec les erreurs que comportent de semblables expériences. Ce résultat est relatif au laboratoire de l'École des ponts et chaussées, mais il ne saurait être généralisé. Le rapport varie en effet d'un laboratoire à un autre, en raison très vraisemblablement des différences qui existent d'une machine d'écrasement à une autre : question qui sera discutée plus loin.

Parmi les conditions qui influent le plus sur ce rapport, il faut citer l'âge des briquettes et la composition du mortier. Le tableau ci-dessous a été calculé au moyen des mêmes séries d'expériences du laboratoire de l'École des ponts et chaussées.

Rapport $\frac{\text{Écrasement}}{\text{Arrachement}}$.

		Pâte pure.	Mortier 1 : 3.
Portland	7 jours . . .	9	10
	3 mois . . .	14	11,2
	1 an.	17	13
Naturel rapide . . .	7 jours . . .	10	15
	3 mois . . .	10	10,1
	1 an.	15	10
Chaux hydraulique.	7 jours . . .	8	17
	3 mois . . .	8	10,3
	1 an.	10	8

L'influence de l'âge et de la composition du mortier paraît hors de doute, mais il ne faudrait pas, à l'inspection des chiffres de ce tableau, s'en exagérer l'importance. Les écarts les plus considérables tiennent certainement à des anomalies indépendantes du phénomène observé, lesquelles s'atténueraient avec des expériences faites dans de meilleures conditions.

Il faut d'abord signaler l'influence de la carbonatation qui se fait très inégalement sentir sur les briquettes d'arrachement de petites dimensions et les gros cubes de rupture.

En second lieu, la fragilité spéciale des briquettes de ciment pur, qui, avec les moutures très fines aujourd'hui usitées, donnent des chiffres à l'arrachement extrêmement irréguliers et beaucoup trop faibles. Il faudrait, pour de semblables briquettes, des machines de rupture évitant toute torsion, ce qui n'a pas lieu dans les machines employées.

Enfin, les briquettes de mortier de chaux à 7 jours sont encore tellement fragiles que les chiffres de rupture par arrachement ne méritent guère de confiance.

Ces causes d'erreurs suffisent en grande partie sans doute pour produire la variation du simple au double, soit de 8 à 16, de ce rapport; il semble difficile cependant d'admettre qu'il soit tout à fait constant comme celui de l'arrachement à la flexion.

Influence de la composition du mortier. — La Commission d'unification recommande de faire porter les essais de rupture simultanément sur le mortier 1 : 3 et sur la pâte pure; une semblable disposition existait déjà dans le cahier des charges de Boulogne. A l'étranger, au contraire, on a depuis longtemps renoncé aux essais de rupture sur la pâte pure. La Commission d'unification a conservé les deux essais pour le seul motif qu'ils sont actuellement usités; MM. Guillain et Vétillart, pour justifier l'essai de pâte pure, ont invoqué exclusivement des considérations théoriques bien abstraites et bien hypothétiques. Ils supposent, ce qu'il serait difficile de prouver, que l'essai de pâte pure donne la mesure de la *cohésion* des hydrates cristallisés qui se forment pendant le durcissement et que l'essai de mortier donne la mesure de l'*adhérence* des mêmes cristaux soit les uns avec les autres, soit avec le sable. Il n'est peut-être pas téméraire de supposer que c'est là un simple prétexte, et que le motif véritable de la conservation d'un double essai

était le désir de ne pas soulever de protestations trop vives en renonçant brusquement à l'essai de pâte pure qui avait jusque-là été exclusivement employée pour les essais de réception. Il y a lieu aujourd'hui de se demander si l'on doit indéfiniment persévérer dans les mêmes errements sans motif plus sérieux.

Une première question à se poser est de savoir si les résultats des essais de pâte pure et de mortier sont réellement différents; et dans le cas où ils seraient différents quelle conclusion on peut tirer de ces différences. En général, il existe une relation définie très simple entre la résistance de différents mortiers sableux ou de pâte pure préparée avec un même ciment. On a, en appelant R la résistance à la rupture et c la compacité, c'est-à-dire le poids de ciment renfermé dans l'unité volume des vides laissés par le sable,

$$R = f(c),$$

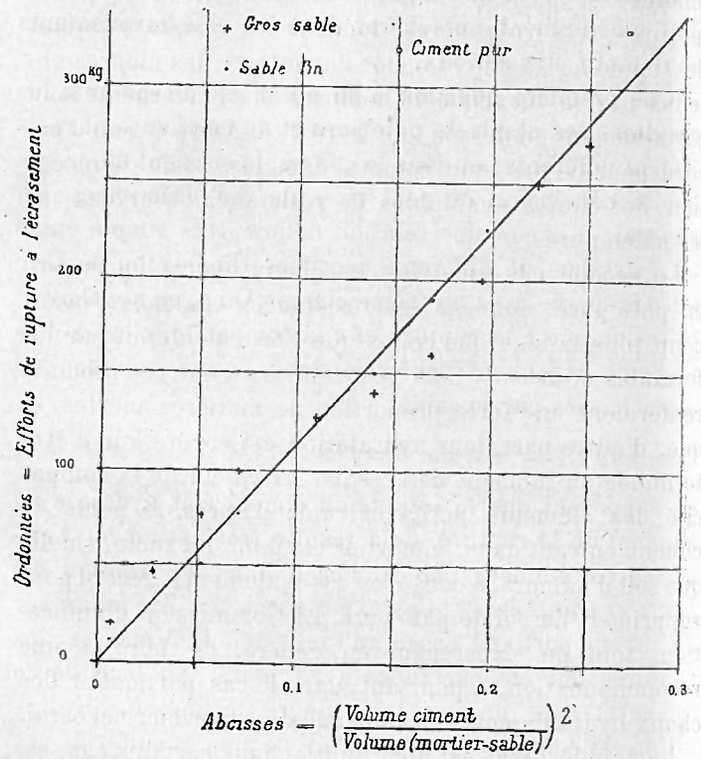
en supposant que la totalité du ciment soit hydratée au moment de la rupture. Cela résulte très nettement d'expériences publiées par M. Féret, dans les *Annales des ponts et chaussées* (*). Ces expériences ont été faites sur du ciment portland passé au tamis de 5.000 mailles; les ruptures ont été effectuées à 28 jours. Au bout de ce temps et avec un semblable degré de finesse, l'hydratation est complète. Il semblerait, de plus, résulter de ces expériences que la fonction de la compacité est pour l'arrachement du premier degré, et pour l'écrasement du second :

Arrachement.	Écrasement.
$R = k \cdot c$	$R = k' c^2$

Voici une courbe relative à l'écrasement. Les abscisses

(*) *Annales des ponts et chaussées*, juillet 1892.

donnent les carrés de la compacité et les ordonnées la résistance à l'écrasement par centimètre carré.



Dans tous les cas où une semblable relation existe, les deux essais simultanés sont parfaitement inutiles, puisque les résultats de l'un permettent de calculer ceux que donnera l'autre. Il y a deux cas cependant où cette règle semble se trouver en défaut et où l'institution simultanée des deux essais pourrait se défendre.

Le premier cas est celui des ciments très fins, gâchés à l'eau de mer, et essayés à trois mois ou plus. On trouve

alors pour les pâtes pures des résistances très faibles; mais ce résultat tient à une fragilité spéciale des briquettes, analogue à celle du verre. La fente une fois amorcée se propage dans une direction quelconque; les mesures, très irrégulières, donnent des résultats variant du simple au double et même davantage; les chiffres obtenus par la moyenne de nombres aussi divergents sont certainement en dessous de la réalité. Aussi est-on d'accord pour ne pas tenir compte, dans les essais de réception, des chutes semblables de résistance observées sur les pâtes pures.

Le second cas est celui des chaux hydrauliques qui, en pâte pure, donnent des résistances également beaucoup plus faibles que celles que l'on calculerait par les formules ci-dessus. Cela peut tenir à ce que ces produits renferment une forte proportion de matières inertes et que, d'autre part, leur hydratation est encore loin d'être terminée au moment des essais. La valeur de la compacité des éléments actifs calculée d'après le poids de ciment entrant dans le mortier est donc inexacte. Quelle que soit d'ailleurs la cause, on est également d'accord pour supprimer, l'essai de pâte pure. La Commission d'unification, tout en s'abstenant en général de faire aucune recommandation, a pourtant, dans le cas particulier des chaux hydrauliques, recommandé de supprimer cet essai.

Le double essai est donc inutile dans certains cas, et, pour les cas où son utilité serait discutable, une entente depuis longtemps établie a amené la suppression de l'essai de pâte pure : il semble donc logique de supprimer cet essai dans tous les cas.

Le terrain se trouve ainsi déblayé en ce qui concerne la multiplicité des modes de rupture et la multiplicité des mortiers. Reste maintenant à choisir un *procédé de rupture*, une *composition de mortier* et des *dates de rupture*, etc., en un mot à fixer toutes les conditions étran-

gères à la qualité du ciment dont dépendent les efforts de rupture.

Choix du procédé de rupture. — Les arguments que l'on peut faire valoir en faveur du choix de l'un ou l'autre des modes de rupture sont les suivants :

Flexion. — C'est le procédé de beaucoup le plus simple, il n'exige l'emploi d'aucune machine coûteuse. Il est très regrettable que, sous l'influence d'idées théoriques erronées, on ait renoncé à ce mode d'essai, qui avait été employé par Vicat. Le reproche le plus grave qu'il mérite, est de faire travailler principalement la surface des briquettes qui est la plus exposée à des altérations accidentelles, produites par l'action du milieu ambiant, eau, acide carbonique, sels magnésiens, etc.

Arrachement. — Ce procédé a pour lui d'être le plus généralement employé ; il s'est depuis longtemps substitué à la flexion ; on lui attribuait l'avantage de faire travailler uniformément tous les points de la section de rupture. C'est là une erreur, comme M. Durand-Claye l'a établi par des recherches expérimentales et théoriques. La résistance obtenue dépend presque exclusivement de l'état de la surface ; il suffit d'une bulle d'air au voisinage de la surface libre pour occasionner une chute considérable de résistance. A ce point de vue, l'essai par arrachement n'a donc aucun avantage sur l'essai par flexion. Les machines qui servent à mesurer cette résistance à la rupture présentent d'ailleurs une exactitude et une simplicité d'emploi très satisfaisantes.

Écrasement. — L'essai par écrasement est certainement le plus satisfaisant, non pas, comme on le dit souvent, parce qu'il fait travailler les matériaux de construction dans des conditions se rapprochant plus de celles de leur emploi usuel, mais parce qu'il intéresse toute la masse, et non pas seulement la surface, comme dans les deux

essais précédents. On sait que, dans l'écrasement d'un prisme isolé, la rupture se fait toujours par cisaillement ; dans l'écrasement des maçonneries sur elles-mêmes il en est tout autrement. Dans ce cas, le mortier renferme toujours, s'il est assez maigre ou si sa prise n'est pas trop avancée, seules occasions où il puisse se produire des écrasements dans les travaux, un volume de vide considérable qui est occupé par de l'eau ou par de l'air. Ces vides permettent, par le glissement et le rapprochement des grains de sable, un tassement du mortier sur lui-même qui diminue son volume apparent, réduit l'épaisseur des joints entre les pierres, mais il n'y a rien là qui ressemble à un cisaillement. Pour produire un écrasement semblable dans les essais, il faudrait que les briquettes d'épreuves fussent enfermées latéralement dans une enveloppe métallique inextensible. Cela serait d'ailleurs un très mauvais système d'essai, parce que les mortiers suffisamment durcis résisteraient à toute tentative de rupture.

Du moment où la rupture dans les conditions usuelles d'écrasement se fait par cisaillement, l'effort de rupture doit être proportionnel à la section des briquettes, à condition bien entendu qu'elles aient des formes géométriques semblables. C'est bien ce que l'expérience confirme dans les limites de précision que comportent des essais de cette nature. Voici, par exemple, des résultats d'expériences faites sur des cylindres de hauteur égale au diamètre par M. Siméon. Les mortiers expérimentés ont été, soit des pâtes pures, soit des mortiers 1 : 3 fortement battus ; les ruptures ont été faites à sept jours, vingt-huit jours et trois mois. Les dimensions des cylindres étudiés ont été 20, 30, 40, 45 millimètres. Le tableau récapitulatif ci-dessous donne le rapport de la résistance par centimètre carré observée sur chaque cylindre à la résistance du cylindre de 30 millimètres :

DIMENSIONS du cylindre	PATE PURE			MORTIER 1 : 3			MOYENNES
	7 jours	28 jours	84 jours	7 jours	28 jours	84 jours	
45 millimètres	0,74	0,83	0,89	1,00	1,16	0,97	0,93
40 —	0,84	0,91	0,90	0,91	1,30	1,08	0,99
20 —	0,89	1,16	0,98	0,87	0,72	0,78	0,90

Les écarts n'obéissent à aucune loi et ne dépassent pas les erreurs possibles d'expériences.

Des expériences de M. Féret faites sur des cubes conduisent à des résultats identiques. Le tableau suivant donne le rapport des résistances à l'écrasement de cubes de 70 millimètres de côté par rapport à des cubes de 40 millimètres de côté. Chacun de ces rapports est déduit de deux moyennes de vingt expériences. Les briquettes ont été conservées à l'air, à l'eau douce ou à l'eau de mer :

Mortier.	Modes de conservation.	Rapport.
1 : 5	Air	1,02
	Eau douce.	0,87
	Eau de mer	0,95
1 : 3	Air	0,92
	Eau douce.	0,80
	Eau de mer	0,97
1 : 2	Air	1,03
	Eau douce.	0,82
	Eau de mer	0,86
	Moyenne générale. . . .	0,92

Il résulte en outre des expériences de M. Siméon que la résistance à l'écrasement est la même, qu'elle soit mesurée sur des cubes ou sur des cylindres de diamètre égal à la hauteur. Voici le rapport des résistances observées sur des cubes de 50 millimètres et des cylindres de 30 millimètres :

CUBE	PATE PURE			MORTIER 1 : 3			MOYENNE
	7 jours	28 jours	84 jours	7 jours	28 jours	84 jours	
50 millimètres de côté.	0,72	0,84	1,32	0,76	0,93	0,78	0,89

Il résulte également des expériences de M. Siméon, qui confirment sur ce point d'anciennes expériences de M. Durand-Claye, que la résistance à l'écrasement ne diminue que très peu, si même elle diminue, quand on passe d'un cube ou d'un cylindre de hauteur égale au diamètre à un prisme de hauteur double. Le tableau ci-dessous donne, d'après M. Siméon, le rapport des résistances observées dans ces conditions sur des prismes carrés et des cylindres.

PRISMES		CIMENT PUR			MORTIER 1 : 3			MOYENNES
		7 jours	28 jours	84 jours	7 jours	28 jours	84 jours	
Cylindres.	45 millim.	0,81	1,00	1,08	0,68	0,84	0,74	0,88
	40 —	0,89	0,97	1,15	0,80	0,74	0,64	0,86
	30 —	0,79	0,90	0,95	0,80	0,68	0,69	0,80
	20 —	1,12	0,85	1,10	0,75	1,15	1,00	1,00
Cubes. . .	70 millim.	1,00	1,06	(0,55)?	0,79	0,90	0,75	0,92
	50 —	0,95	1,10	0,89	0,77	0,95	0,81	0,91

L'augmentation de hauteur ne produit pour les pâtes pures aucune diminution de résistance ; il semblerait, au contraire, y avoir un effet marqué pour le mortier. Mais il se pourrait bien que l'augmentation de hauteur n'agisse qu'en exagérant les causes d'erreurs inhérentes au remplissage des moules.

La réduction de hauteur à moitié du diamètre augmente, au contraire, d'une façon certaine, la résistance comme le montre la série d'expériences ci-dessous due également à M. Siméon.

DIMENSION	CIMENT PUR			MORTIER 1 : 3			MOYENNE
	7 jours	28 jours	84 jours	7 jours	28 jours	84 jours	
Hauteur = 1/2 diamètre.	1,4	1,72	1,20	2,3	1,90	1,49	1,7

Il résulterait de là qu'il est indifférent d'employer, pour les essais d'écrasement des cubes ou des cylindres, des hauteurs égales ou doubles des diamètres, et des dimensions absolues quelconques. Si l'on doit faire un choix, ce ne peut être qu'en se laissant guider par certaines conditions pratiques relatives à la facilité et à la régularité des essais. On peut indiquer un certain nombre de points de vue qui peuvent conduire à une préférence ou à une autre, mais la question n'est pas encore suffisamment étudiée pour que l'on puisse émettre un avis définitif.

1° Il y a intérêt à adopter un type de briquette défini, bien que cela semble en théorie inutile, parce que les irrégularités dans la confection des briquettes dépendent sûrement dans une certaine mesure de la forme et de la dimension des moules. On aura des essais plus comparables en employant un seul type de briquette.

2° Il y aurait grand intérêt, au point de vue de la facilité des essais et de la simplification des machines, à employer de très petites briquettes; mais la grosseur du sable normal ne permet guère de descendre au-dessous de 25 millimètres; d'autre part, les expériences de M. Féret indiqueraient que les erreurs accidentelles sont d'autant moindres que les cubes sont plus gros. L'écart moyen des chiffres de rupture de 200 briquettes aurait été pour les :

Cubes de 70 millimètres de côté 2,9
Cubes de 40 millimètres de côté 6,2

Il est vrai que les opérateurs avaient l'habitude de confectionner les cubes de 70 millimètres et n'en avaient jamais fait auparavant de 40 millimètres.

3° La forme cylindrique semble préférable en raison de sa symétrie et de l'absence d'arêtes vives qui constituent des points faibles. Par contre, la difficulté d'obtenir des surfaces terminales parfaitement planes et régulières peut être une cause d'erreurs accidentelles notables. Ainsi, M. Féret, en comparant l'écrasement de cubes comprimés de lit en lit ou en délit, c'est-à-dire pressés par les surfaces terminales libres, ou par des surfaces formées intérieurement dans le moule et par suite les plus planes, a trouvé que, dans le premier cas, les erreurs accidentelles étaient quatre fois plus grandes que dans le second cas. Mais c'est là un résultat qui demanderait à être vérifié de plus près, car il résulte d'une unique comparaison entre deux séries de six briquettes. De plus la moyenne des ruptures a été exactement la même dans les deux cas; ce qui n'aurait pas dû arriver. Aux erreurs accidentelles plus fortes aurait dû correspondre une moyenne plus faible.

Enfin il serait intéressant d'étudier les prismes carrés de hauteur double de la base, qui ont la propriété de cisailler suivant un plan diagonal.

Choix des machines de rupture. — Il n'y a pas en principe de choix à faire entre les différentes machines de rupture; elles devraient toutes donner des résultats également exacts. En fait, aucune de celles qui sont aujourd'hui employées pour l'écrasement ne donne des résultats satisfaisants; ce motif à lui seul doit faire renoncer pour le moment aux essais par écrasement qui, à tous les autres points de vue, seraient cependant bien préférables. Il serait nécessaire de faire une étude des machines d'écrasement comme cela a déjà été fait pour les machines à essayer les métaux. On arriverait sans peine à reconnaître l'importance des causes d'erreur inhérentes à l'emploi de ces machines et à trouver les moyens de les faire disparaître.

Les principaux types de machines employées pour l'écrasement des matériaux de constructions sont :

Les presses hydrauliques;

Les machines à levier;

Les machines à membranes flexibles du type Galy-Cazalat.

Les principales erreurs, qui ont été reconnues dans leur emploi, proviennent de deux causes distinctes :

Les frottements et résistances passives;

La répartition inégale de la charge sur les surfaces pressées.

Les frottements dans les presses hydrauliques sont négligeables quand les cuirs emboutis sont en bon état; cela a été établi depuis longtemps par les expériences de MM. Bourdon, Marcel Deprez, Marié, Lebasteur. Mais quand les cuirs sont en mauvais état, il peut se produire des grippements et même des coincements qui faussent toutes les mesures sans que rien en avertisse. Pour ce motif, on a complètement renoncé à l'emploi des presses hydrauliques pour les essais de métaux.

J'ai fait quelques expériences de vérification sur la petite presse du laboratoire de l'École des ponts et chaussées en employant la méthode des crushers. Ces crushers m'avaient été remis par M. Vieille, ils provenaient d'un lot taré avec beaucoup de soin. On peut répondre par cette méthode de l'exactitude des résultats à 50 kilogrammes près.

Pression indiquée.	Pression réelle.
200kg	150kg
400	380
600	560
1.000	1.000
2.000	1.900
3.000	2.850
4.000	4.000

Ces résultats sont donc, en ce qui concerne les frottements, absolument satisfaisants.

Les frottements dans les appareils à levier sont toujours considérables; M. Vieille a montré que pour la balance de Jœssel par exemple ils faussaient de 15 p. 100 les indications fournies. Deux essais à peu près concordants, faits par la méthode des crushers sur la machine à levier du laboratoire de l'École des Ponts et Chaussées ont donné les résultats suivants :

Pression indiquée.	Pression réelle.
200kg	160kg
400	270
600	400
1.000	825
2.000	1.680
3.000	2.670
4.000	3.600

Ce qui représente un frottement toujours supérieur à 10 p. 100.

Des expériences analogues faites avec les machines Schikert du laboratoire des ponts et chaussées de Boulogne ont donné les résultats suivants :

Pression indiquée.	Pression réelle.
500kg	379kg
750	663
1.000	925
1.250	1.184
1.500	1.428
1.750	1.708
2.000	1.985
2.250	2.227
2.500	2.537

Au-dessus de 1.500 kilogrammes, l'écart dû au frottement cesse de se manifester; c'est là un résultat difficile à expliquer. Peut-être le tarage de la machine est-il fait

en modifiant dans les calculs la longueur du bras de levier, dans le but précisément de tenir compte du frottement. Peut-être ce résultat a-t-il simplement été amené par un mauvais centrage du crusher.

Une seconde série de mesures faites en écrasant simultanément 5 crushers a conduit à des résultats semblables.

Pression indiquée.	Pression réelle.
1.000^{kg}	925^{kg}
2.000	1.777
3.000	2.785
4.000	4.035
5.000	4.950
6.000	6.000
7.000	7.050
8.000	8.030
9.000	9.350
10.000	10.825
11.000	11.880

Dans les machines à membrane flexible, le frottement est nécessairement nul ; la tension du caoutchouc est toujours négligeable ; la seule cause d'erreur provient du coincement du caoutchouc si le plateau prend un déplacement trop considérable, ce qui peut se produire quand la quantité d'eau enfermée sous le caoutchouc est trop faible et surtout lorsqu'on a laissé de l'air enfermé avec cette eau. Voici des résultats obtenus avec une machine de ce type que nous avons, mon frère et moi, étudiée il y a une dizaine d'années, en vue des essais de ciment. (Voir le croquis de cette machine, p. 415, à l'annexe IV.)

Pression indiquée.	Pression réelle.
200^{kg}	156^{kg}
600	572
1.000	920
2.000	1.985
3.000	2.950
4.000	4.650

A la pression de 4.000 kilogrammes, il a dû se produire un coincement qui peut seul expliquer l'écart brusque de 650 kilogrammes qui existe entre la pression réelle et la pression indiquée.

Pour éviter cet inconvénient, j'ai fait remplacer le caoutchouc par un tore en maillechort, qui a été fait avec un métal beaucoup trop épais 0^{mm},7.

Un essai fait au crusher a donné la comparaison suivante entre la pression réelle et la pression calculée en négligeant la raideur et la déformation du tore. Pour faire ce calcul, on est parti, ne connaissant pas le diamètre réellement utile du plateau, de la pression mesurée de 4.000 kilogrammes et on a admis que la pression effective variait proportionnellement à la pression de l'eau accusée par le manomètre.

Pression indiquée.	Pression réelle.
200^{kg}	300^{kg}
600	700
1.000	1.110
2.000	2.120
3.000	3.130
4.000	

Pour toutes les pressions supérieures à 200 kilogrammes on a très exactement, en appelant F l'effort produit et H la pression manométrique en atmosphère,

$$F = 100 + 575\,H.$$

Un second inconvénient des machines à écrasement, plus grave peut-être encore que celui qui résulte des frottements, provient de l'irrégularité de la répartition des efforts sur les surfaces pressées ; cette répartition peut varier d'une expérience à une autre, suivant la mise en place des briquettes. Dans les presses hydrauliques, si le guidage du piston était parfait et si les faces

des briquettes étaient rigoureusement planes et parallèles, on obtiendrait une répartition uniforme des pressions en les centrant convenablement sur la tête du piston. Si au contraire les faces ne sont pas parallèles, la mise en charge se fera exclusivement sur une arête ou même sur un angle, et l'écrasement se fera de proche en proche avec un effort très faible ; les mesures seraient absolument fausses. En fait, le guidage du piston n'est jamais absolu, parfois même il n'existe pas, et sa tête peut s'incliner de façon à s'appliquer sur la surface pressée. Mais alors le plus léger défaut de centrage modifie complètement la répartition des efforts, et il tend à se développer des efforts tangentiels qui modifient les conditions de rupture.

Dans les machines à levier, les points d'articulation des surfaces pressantes sont généralement beaucoup trop éloignées de ces surfaces, mais il serait facile de remédier à ce défaut. Voici quelques expériences d'écrasement de crushers qui permettent de se rendre compte de ce défaut ; elles ont été faites, sur ma demande, par M. Féret, directeur du laboratoire de Boulogne-sur-Mer. Les cinq crushers soumis à l'écrasement ont été placés, quatre au sommet d'un carré de 7 centimètres de côté, et le cinquième au centre. Les crushers des sommets se sont écrasés inégalement : celui du centre a donné, comme cela devait être, un écrasement égal sensiblement à la moyenne des cinq. Le tableau suivant donne l'effort moyen résultant de l'écrasement des cinq crushers, et les efforts extrêmes supportés par les deux crushers le plus et le moins écrasés :

Moyennes.	Maximum.	Minimum.
2.785	2.895	2.675
4.950	5.060	4.765
7.090	6.365	7.660
9.350	8.890	9.725
11.880	12.590	11.020

L'écart entre les efforts extrêmes est généralement voisin de 10 p. 100 de l'effort moyen ; dans une des expériences cependant il atteint 20 p. 100. Or il suffit, pour provoquer la rupture des briquettes, que sa résistance limite soit surpassée en un de ses points. Les chiffres de rupture indiqués par l'appareil sont donc inférieurs à l'effort que l'on s'est proposé de mesurer, et l'écart sera variable d'une expérience à l'autre.

Dans l'appareil à plateau et membrane système Galy-Cazalat que nous avons fait construire, nous avons assuré la répartition uniforme des pressions par l'artifice suivant qui pourrait être appliqué dans tous les cas. La pression est exercée par un bloc d'acier ayant exactement la même section horizontale que la briquette, ce qui permet d'assurer le centrage de la briquette d'une façon rigoureuse et très simple ; en outre, la pression est transmise au bloc d'acier par une pointe mousse, la pointe de la vis de pression dans notre appareil, qui vient attaquer le bloc en un point aussi voisin que possible de la surface de contact avec la briquette. Si cette pointe arrivait jusqu'à cette surface, la pression serait toujours centrée, quelle que soit l'inclinaison de la briquette, mais pour éviter les déformations ou la rupture du bloc d'acier, il faut laisser sous la pointe une certaine quantité de métal. On peut s'arrêter par exemple à une épaisseur égale au 1/3 du diamètre du poinçon.

En dehors de ces deux défauts principaux : frottements et répartition inégale de la charge, les machines à écrasement ont un troisième défaut, dont l'importance peut varier du tout au tout, suivant le soin des opérateurs qui les font fonctionner. Dans les types usuels, la mise en charge ne se fait pas d'une façon continue et automatique comme dans l'appareil d'arrachement, mais à la main : soit en mettant des poids dans un seau, soit en faisant fonctionner une pompe, soit en tournant une vis. On

sait que, dans le cas des poids, l'accroissement d'effort produit croît très rapidement avec la vitesse de chute des poids ; la destruction de leur force vive produit des pressions instantanées qui peuvent être très grandes. C'est donc un système très mauvais, s'il n'est pas entre les mains d'opérateurs extrêmement soigneux et consciencieux. Mais même en l'absence de tout choc, la vitesse de mise en charge a une influence encore très grande sur les résultats. La rupture se produira sous un effort d'autant moindre que son action sera plus longtemps prolongée. Il est donc indispensable, pour avoir des essais comparables, de faire la mise en charge avec une vitesse constante et toujours la même.

On peut se rendre compte pratiquement que l'influence de ces diverses causes d'erreur des appareils de compression n'est pas négligeable, en écrasant parallèlement avec deux machines différentes des briquettes similaires. Cette comparaison a été faite par M. Féret entre une presse hydraulique et une machine à levier, système Schickert. Les nombres du tableau ci-dessous donnent la résistance totale à l'écrasement de petites briquettes en huit :

NATURE DU MORTIER	AGE	PRESSE hydraulique	MACHINE Schickert
Ciment pur	4 ans.	10.023	8.450
Id.	id.	9.500	8.208
Id.	3 mois.	7.089	6.375
Id.	id.	7.389	7.333
Id.	1 mois.	9.434	9.033
Mortier normal	4 ans.	4.586	4.096
Id.	id.	3.556	2.954
Id.	1 an.	3.521	3.258
Mortier plastique	1 an.	1.377	1.254

La machine Schickert a donné des résultats toujours plus faibles que ceux de la presse hydraulique. L'écart a varié de 15 à 20 p. 100. Chaque chiffre est la moyenne de trois ruptures de briquettes ; la comparaison de ces

trois ruptures entre elles montre, en outre, que les erreurs accidentelles sont environ moitié moindres avec la presse hydraulique qu'avec la machine Schickert.

On comprend donc que, dans l'état actuel, il serait prématuré de substituer dans les essais de rupture l'écrasement à l'arrachement. Il faudra y arriver un jour, mais il faut d'abord faire une étude plus complète des machines à écrasement.

Composition du mortier d'épreuve. — La composition du mortier employé pour les essais de rupture est un des points sur lesquels il est le plus difficile d'arriver à une entente, parce que les conséquences auxquelles conduisent le point de vue empirique et le point de vue scientifique sont diamétralement opposées. En outre, certaines préoccupations commerciales introduisent un nouveau point de vue absolument distinct des deux précédents. Enfin, les partisans de la conciliation viennent brocher sur le tout en proposant des solutions intermédiaires qui ne donnent satisfaction à personne.

Le point de vue empirique conduirait à employer des mortiers identiques à ceux qui servent pour les travaux, c'est-à-dire d'une nature variable à l'infini, tant comme quantité d'eau que comme quantité et qualité du sable. Ce système rigoureusement appliqué serait la négation de toute unification, car, pour recevoir un seul ciment destiné à être employé sur un même chantier, il faudrait plusieurs mortiers d'essai différents. Mais personne ne va aujourd'hui jusque-là ; on est d'accord pour employer un même sable normal qui, quelle que soit sa composition, ne pourra jamais ressembler même de loin aux sables naturels dont il n'y a pas deux semblables. Les défenseurs de l'empirisme se rabattent sur la proportion d'eau ; ils réclament des mortiers mous, des mortiers plastiques semblables à ceux qui servent pour les tra-

vaux. On ne comprend pas bien l'intérêt attaché à cette consistance, dont l'influence sur la résistance finale est bien moins directe que dans les essais de prise où elle est déjà très faible. Au point de vue purement expérimental, cette consistance plastique est d'ailleurs très mauvaise pour deux motifs. Les mortiers mous retiennent des bulles d'air qu'il est impossible de chasser et dont la présence surtout dans les essais d'arrachement est très nuisible. En outre, ces mortiers très mous se liquatent par le repos dans les moules, surtout si on leur communique de légères trépidations qu'il est toujours impossible d'éviter complètement. L'eau s'écoule par le joint inférieur du moule en faisant descendre une certaine quantité du ciment qui s'accumule à la partie inférieure de la briquette, ce qui détruit complètement son homogénéité. Cette influence perturbatrice se fait d'ailleurs plus ou moins sentir d'un essai à un autre suivant l'intensité des trépidations, l'ouverture des joints du moule et la rapidité de prise.

Le point de vue commercial, celui qui a triomphé dans la Commission d'unification, bien que les industriels n'aient pas semblé y attacher grande importance, conduit à employer des mortiers très secs et fortement battus. On arrive ainsi, en diminuant les vides entre les grains de sable, à obtenir avec le mortier 1 : 3 la même résistance qu'avec un mortier 1 : 2 gâché à consistance ordinaire. On a fait valoir qu'en renonçant à cet usage, on causerait aux fabricants de ciment un préjudice sérieux. C'est là une opinion bien contestable, du moment où tous les essais sont faits de même et où le mode opératoire est rigoureusement défini; peu importe, au point de vue des comparaisons, que les chiffres de résistance portés sur les certificats délivrés par les laboratoires de l'état soient plus ou moins élevés. Pour que ces chiffres élevés aient un intérêt au point de vue de la concurrence,

il faut éviter toute définition précise et laisser subsister une équivoque sur les conditions expérimentales des essais. C'est ainsi qu'avec des cahiers des charges mentionnant, comme celui de Boulogne, une proportion d'eau de 12 p. 100, on employait en fait des quantités bien moindres, descendant jusqu'à 9 p. 100. On comprend l'intérêt de cette pratique. Le résultat serait encore le même si, sans rien en dire, on venait à substituer au sable normal actuel un sable mélangé; ou encore si, en faisant les essais sur le mortier 1 : 2, on délivrait aux industriels des certificats constatant qu'ils ont été faits avec le mortier 1 : 3. Mais une semblable manière de faire ne saurait trouver aucun défenseur; tout le monde aujourd'hui est d'accord pour définir rigoureusement les conditions d'essais, peu importe au point de vue commercial le choix de ces conditions. Il ne faut pas oublier d'ailleurs que tous les gros consommateurs font eux-mêmes leurs essais et ne se fient pas à des certificats qui se rapportent presque toujours à des produits de choix. Les petits consommateurs ne connaissent rien aux valeurs absolues des chiffres de résistance; ils ne les utilisent qu'en les comparant à ceux d'autres produits sur la qualité desquels ils se croient fixés. En changeant pour tous les produits les conditions d'essais, on ne modifiera en rien les résultats de ces comparaisons. L'intérêt commercial invoqué sur ce point est donc nul.

Le point de vue scientifique conduit d'abord à reconnaître que l'objet des essais de rupture est double. Ils ont comme premier but de faire connaître la résistance qu'un mortier aura pris au bout d'un temps déterminé relativement court, donnée qui est parfois utile à définir, dans le cas, relativement rare du reste, où l'on sera pressé de décintrer une voûte, pour des travaux d'égouts par exemple. Un semblable essai n'est que la continuation des essais de prise; les considérations développées à

l'occasion de l'essai de prise pourront donc être répétées ici. Il faudra faire cet essai avec des mortiers où la proportion d'eau, la compacité et la consistance seront maintenues constantes. Il y aura intérêt, comme quantité d'eau et compacité, à se rapprocher des conditions les plus fréquentes dans les travaux.

Le second but, et de beaucoup le plus important, des essais de rupture, est de donner la mesure de la quantité d'éléments réellement actifs renfermés dans le ciment. A ce point de vue il n'y a aucunement à se préoccuper de choisir un mortier plus ou moins semblable à celui des travaux, il suffit que ce mortier permette d'obtenir de la façon la plus précise possible le renseignement cherché. Il est bien évident *a priori*, et toutes les expériences le confirment, que pour obtenir une certaine proportionnalité entre les efforts de rupture et les quantités de matières actives, il faut que le vide offert au ciment soit le même dans tous les essais et ne change pas d'un ciment à un autre. Un même ciment ne donne la même résistance dans différents mortiers qu'autant que la compacité est la même : les mêmes conditions sont donc nécessaires pour juger de l'équivalence ou de la différence de ciments divers. Ce principe capital avait été énoncé très nettement par M. Guillain dans son rapport, et l'on peut s'étonner que la Commission d'unification l'ait abandonné sans aucune discussion, sans même peut-être s'en être rendu compte.

« Il est évident que les résultats des essais ne seront comparables que si toutes choses sont égales d'ailleurs :

« 1° Quant à la compacité primitive du mortier, c'est-à-dire quant à l'étendue des pores à obstruer et à étrésillonner en quelque sorte par la cristallisation....

« Supposons la proportion d'eau constante dans tous les cas. Si le damage dans le moule est continué dans tous les cas jusqu'à ce que l'eau commence à suinter à la surface du mortier, on peut être assuré que le degré de compacité sera presque constant. »

On peut être d'autant plus surpris de voir la Commission renoncer à cette règle, que des expériences de l'un de ses membres ont donné la consécration absolue du principe posé par M. Guillain, en s'inspirant de vues purement théoriques. M. Durand-Claye, dans une étude sur le choix du sable normal, a eu l'occasion de comparer des mortiers faits avec des dosages en eau différents et avec des sables de natures différentes. Il résulte de ces chiffres, que les mortiers faits avec des quantités d'eau constantes et des sables différents, donnent des résistances identiques, tandis qu'en faisant changer même très peu la quantité d'eau, on fait varier considérablement la résistance.

Poids d'eau constant et sable variable.

EAU pour 100 de ciment	NATURE DU SABLE	ARRACHEMENT		ÉCRASEMENT		RAPPORT moyen
		7 jours	28 jours	7 jours	28 jours	
41,6	Artificiel de Boulogne. .	17,4	23,35	154	228	0,95
	Naturel de Leucate . . .	17,35	23,45	166	215	
41,6	Artificiel de Boulogne. .	14,9	24,7	158	243	1,02
	Naturel de Leucate . . .	15	24	160	232	
41,6	Artificiel de Boulogne. .	17,25	25,5	175	229	1,07
	Naturel de Saint-Hilaire.	15,95	23,85	163	221	
41.6	Artificiel de Boulogne. .	25,55	35,55	261	346	0,96
	Naturel de Rosières. . .	24,25	37,35	283	292	

Les mortiers faits avec les sables naturels avaient une consistance beaucoup plus molle que ceux faits avec le sable artificiel, ce qui montre que la consistance initiale n'a pas d'influence sur les essais de durcissement final. La variation de la proportion d'eau recommandée par la Commission, qui a pour unique objet de donner aux mortiers des consistances analogues, n'est donc pas justifiée.

Voici maintenant les résultats des expériences faites par M. Durand-Claye dans lesquelles la quantité d'eau a varié, la nature du sable étant restée la même :

PROPORTION d'eau	ARRACHEMENT		ÉCRASEMENT	
	7 jours	28 jours	7 jours	28 jours
39,6	16,92	25,3	174	258
41,6	15	24	160	233
43,6	13,3	22,7	118	198

Trois autres séries d'expériences semblables ont donné les mêmes résultats.

Le principe de l'uniformité de compacité doit être respecté d'une façon absolue dans les essais de résistance. Tout au plus peut-on se demander si, étant donné que l'on ne cherche jamais à comparer la chaux avec les ciments, il n'y aurait pas lieu de fixer pour ces deux catégories de produits une quantité d'eau différente; mais cela ne paraît pas indispensable. Le chiffre absolu choisi pour la proportion d'eau importe peu en lui-même, mais il ne faut pas le prendre trop faible si l'on veut que le même mortier puisse servir aux essais de prise. A ce point de vue, le chiffre donné par le cahier des charges de Boulogne, 48 p. 100 du poids du ciment, paraît très convenable ; peut-être seulement pourrait-on arrondir ce chiffre et prendre 50 p. 100. Si l'on désirait un chiffre différent pour les chaux, on pourrait prendre 70 p. 100 qui donnerait, avec la même proportion de sable normal, du mortier de consistance analogue à celle du mortier de ciment portland de même dosage en sable avec 50 p. 100 d'eau.

La proportion d'eau définie, reste à choisir la nature de cette eau qui pourra être soit de l'eau douce, soit de l'eau de mer. Si les essais de rupture sont destinés à

faire connaître la rapidité du durcissement, il est indispensable d'employer l'eau qui sera employée sur les chantiers, parce que la rapidité de prise peut, suivant la nature de l'eau, varier dans des limites extrêmement considérables. Au contraire, s'il s'agit de l'essai normal effectué après hydratation complète pour obtenir la mesure de la quantité d'éléments actifs, la nature de l'eau importe peu, la résistance finale en est sensiblement indépendante, comme l'ont montré les expériences de MM. Vétillart, Alexandre et Candlot, l'écart entre les essais à l'eau douce et à l'eau de mer, à vingt-huit jours et à trois mois, varie de 10 à 20 p. 100 seulement et se produit tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre. C'est évidemment l'eau douce qu'il faut préférer pour l'essai normal parce qu'on peut s'en procurer partout sans difficulté. Toutes les eaux potables peuvent être considérées comme identiques au point de vue des essais de ciment.

Le choix de la nature du sable ne peut donner lieu non plus à de grandes difficultés. Tous les sables formés par des roches dures, et dont les grains sont arrondis et dépolis, peuvent à grosseur égale être considérés comme rigoureusement équivalents. Tous les sables roulés de mer ou de rivière satisfont nécessairement à ces diverses conditions. Ils sont durs, car les roches tendres sont réduites rapidement en boue impalpable, ils sont dépolis et arrondis par le fait même de leur frottement mutuel. On peut donc employer indifféremment tous les sables naturels roulés, après leur avoir fait subir un tamisage préalable.

Les expériences suivantes ont établi que la résistance des mortiers était indépendante de la nature chimique des sables.

La première série est empruntée à un mémoire de M. Féret, publié aux *Annales des ponts et chaussées :*

	Résistance à 3 mois du mortier 1 : 3.
Sable normal artificiel	22,9
Porphyre	22,5
Granite	18,5
Calcaire siliceux	18,9
Marbre de Marquise	23,6
Briques pilées	22,6
Mâchefer	22,3
Feldspath	22,7

La seconde série est extraite d'une note présentée par M. Durand-Claye à la Commission d'unification. Il faut rapprocher les nombres sur une même ligne horizontale qui se rapportent à un même ciment.

Sables divers.		Sable de quartzite normal.
Sable de Leucate	15,43	15,32
Id.	15	14,9
Sable de Rosières	24,25	24,5
Sable de Saint-Hilaire	15,85	15,9

Enfin M. Siméon a indiqué, dans une des séances de la Commission d'unification, que les résistances des mortiers des chaux hydrauliques étaient, à grosseur égale du sable, les mêmes pour le sable de Seine et le sable normal de quartzite broyé ; le sable du Rhône donnerait des résistances d'un dixième plus élevées qui pourraient être attribuées à la présence de roches volcaniques pouzzolaniques. Mais il n'est guère possible de tirer aucune conclusion d'un écart si faible qui ne dépasse pas les erreurs d'expériences.

La grosseur du sable, tant au moins qu'elle ne varie pas dans des limites très étendues, paraît sans influence sur les résultats des essais. M. Féret a montré qu'à *compacité égale* des mortiers faits avec des sables de grosseurs très différentes donnaient sensiblement la même

résistance. Sans aller aux extrêmes, on peut prendre un sable de grosseur moyenne passant entre les tamis dont la maille ait $0^{mm},5$ et 2 millimètres. Il pourra sembler préférable à bien des personnes de préciser davantage la grosseur et la nature du sable ; cela n'est peut-être pas utile, mais cela ne peut en tout cas avoir aucun inconvénient. En cas de contestation avec un fournisseur, il est évidemment préférable d'employer un mode opératoire aussi identique que possible de part et d'autre. La nature de sable et la grosseur recommandées par la Commission d'unification semblent très convenables. C'est le sable de la plage de Leucate (Hérault), retenu entre deux tôles perforées de trous circulaires de 1 millimètre et $1^{mm},5$ de diamètre.

Le seul point délicat est de définir la proportion de sable à mêler au ciment pour les essais de rupture. L'usage universel est de conserver constant le rapport du poids de sable au poids de ciment. Il faut alors que les mortiers aient une consistance variable. Il semblerait plus logique *a priori* de faire varier le poids de sable en maintenant la consistance peu variable, au voisinage de la consistance demi-ferme dont les avantages pour la confection des briquettes ont été signalés plus haut. C'est une question insuffisamment étudiée, qui demanderait de nouvelles expériences.

Dates de rupture. — Il est indispensable de distinguer avec soin les essais de rupture qui ont pour objet de mesurer la rapidité initiale du durcissement, et ceux qui ont pour objet exclusif de donner une idée de la proportion d'éléments actifs renfermés dans un produit donné.

Les dates auxquelles doivent être faites les premiers de ces essais doivent être définies exclusivement par les besoins de la pratique. Il semble que les dates suivantes pourraient être recommandées :

1° 6 heures pour les ciments rapides à la mer, les bétons de ciment portland;

2° 48 heures pour les ciments rapides et de portland destinés aux travaux d'égout;

3° 7 jours pour les mortiers de ciment ordinaires et les chaux hydrauliques.

4° 28 jours pour les mortiers de chaux hydrauliques.

Pour la seconde catégorie d'essais, il serait nécessaire d'attendre que la majeure partie de l'hydratation soit terminée, ce qui peut exiger de vingt-huit jours à un an, suivant la nature des produits, leur degré de finesse, mais, d'autre part, la nécessité des travaux ne comporte pas d'essais plus éloignés que vingt-huit jours. Diverses solutions peuvent être proposées pour chercher à concilier ces conditions contradictoires.

MM. Guillain et Vétillart ont proposé, pour les ciments de Portland, de déterminer la résistance à trois mois, qu'ils considèrent comme satisfaisante, par extrapolation des résultats obtenus à sept et vingt-huit jours. Cette solution peut être appliquée également aux ciments de laitiers, aux ciments de grappiers et aux ciments naturels à prise lente.

On pourrait encore, pour les mêmes produits, se contenter de l'essai à 28 jours, à condition de faire subir au ciment un nouveau broyage pour le faire passer totalement à travers le tamis de 4.900 mailles par centimètre carré. Les expériences de M. Vétillart ont, en effet, montré que pour ces poudres fines l'hydratation est complètement terminée au bout d'un mois. Mais ce broyage serait une opération bien difficile à effectuer dans les laboratoires d'essai. On ne peut se contenter de tamiser le ciment tout venant et de rejeter les parties les plus grosses, car la nature de ces deux parties peut être très différente.

Mais le procédé qui semble *a priori* le plus rationnel pour accélérer ces essais est d'effectuer le durcissement

dans l'eau chaude. On sait que l'élévation de température amène une accélération considérable de toutes les réactions chimiques. Il en est de même pour le durcissement des ciments dont l'origine est purement chimique. Ce mode d'essai est particulièrement avantageux pour les chaux et pour certains mortiers de pouzzolanes dont le durcissement complet à froid demande au moins une année. On pourrait, en faisant durcir les briquettes dans l'eau bouillante, faire pour tous les produits les essais définitifs de rupture à sept jours. Ce mode d'essai, préconisé depuis longtemps par M. Tetmajer, n'a jusqu'ici rencontré aucun crédit parce que les ingénieurs et fabricants qui font des essais de ciments sont toujours dominés par la préoccupation de se rapprocher dans les essais des conditions de la pratique. Mais lorsque l'empirisme aura cédé la place aux méthodes scientifiques, les essais à l'eau chaude seront appréciés comme ils le méritent. La question n'est pas encore mûre actuellement.

La *conclusion* de cette discussion est qu'il faut provisoirement conserver, pour l'essai de résistance à la rupture, le procédé par arrachement tel qu'il est indiqué au cahier des charges de Boulogne, avec les modifications suivantes :

1° Suppression de l'essai de pâte pure ;

2° Substitution pour le gâchage de l'eau douce à l'eau de mer ;

3° Substitution du sable naturel de Leucate au sable de quartzite broyé.

Il y aurait lieu pour l'avenir de se mettre en mesure de substituer l'écrasement à l'arrachement et d'étudier s'il n'y aurait pas lieu de substituer aux mortiers de composition constante et consistance variable des mortiers de consistance fixe et dosage en sable variable.

(*La suite à la prochaine livraison.*)

BULLETIN

STATISTIQUE DE L'INDUSTRIE MINÉRALE DES ÉTATS-UNIS EN 1892.

L'*Engineering and Mining Journal*, de New-York, qui, depuis assez longtemps déjà, donnait dès les premiers mois de chaque année, des renseignements statistiques très complets sur les principales branches de l'industrie minérale pour l'année qui venait de se terminer, a entrepris pour 1892 un travail d'ensemble d'une importance considérable, qui a paru dans le courant du mois de mars 1893 et qui constitue le premier volume (*) d'une série destinée à se continuer désormais d'année en année.

Ce volume, dû à l'initiative de la direction du journal, de M. R. P. Rothwell en particulier, renferme sur l'industrie minérale non seulement des États-Unis, mais de tous les pays du globe, des données du plus haut intérêt, et dont la valeur est garantie par les noms des différents collaborateurs de l'œuvre, choisis parmi les spécialistes les plus compétents. Pénétré de l'intérêt qu'il y a pour tous les industriels, pour tous ceux qui s'occupent d'affaires de mines ou de métallurgie, à être renseignés le plus tôt possible sur les conditions de production des différentes substances et sur leur valeur dans les différents marchés, convaincu d'autre part que les statistiques officielles, en raison de leur caractère même, ne peuvent jamais arriver à voir le jour qu'avec un retard notable, M. R. P. Rothwell a fait appel à l'obligeance et à l'empressement de chacun, et a si bien su

(*) *The mineral industry, its statistics, technology and trade, in the United States and other countries from the earliest times to the end of* 1892. Vol. I. Edited by Richard P. Rothwell. New-York, Scientific Publishing Co. In-8°, XXIV-628-115 pages.

stimuler le zèle de tous, qu'il est parvenu à livrer au public, moins de trois mois après la fin de l'année, cet énorme volume de 650 pages, qui ne saurait être trop recommandé à l'attention de tous ceux qui s'intéressent à l'industrie minérale et aux données statistiques qui s'y rapportent.

Il n'est pas sans intérêt de noter en passant que, pour les États-Unis notamment, les chiffres de production sont indiqués en tonnes métriques en même temps qu'en mesures locales. M. R. P. Rothwell exprime même « le plus vif regret de n'avoir pu employer exclusivement les poids et mesures du système métrique, qui a cours légal aujourd'hui dans presque tous les pays civilisés et devrait être universellement adopté », et d'avoir dû, pour se conformer à l'usage, conserver « ce cauchemar de poids et mesures qui, sous le nom de système anglais, demeure, comme un reste de barbarie, dans tous les pays de langue anglaise ».

A la suite de la statistique générale des substances minérales, non métalliques et métalliques, produites aux États-Unis durant chacune des années 1880 à 1892, l'ouvrage comprend une série d'articles spéciaux des plus remarquables consacrés à chaque substance en particulier : on y trouve des données d'un grand intérêt sur les gisements soit de la substance elle-même, soit des minerais dont on l'extrait, puis les tableaux de production pour les États-Unis d'abord, ensuite pour les pays producteurs les plus importants et, le plus souvent, pour l'ensemble du globe, accompagnés de commentaires détaillés, ainsi que d'indications relatives à l'exportation et à l'importation pour les États-Unis, et enfin à la situation des principaux marchés. Il est rendu compte, pour la plupart des métaux, des derniers progrès réalisés dans leur métallurgie : il convient de citer notamment, comme particulièrement intéressants, les renseignements de ce genre relatifs à l'aluminium, au cuivre, et à l'or. L'une des parties les plus remarquables de l'ouvrage est celle qui est consacrée à l'or et à l'argent, à la statistique de leur production dans les différents pays du globe depuis le milieu ou même le commencement du XVIe siècle, et à leurs variations de valeur.

Enfin, le volume se termine par des statistiques spéciales, très documentées et riches en renseignements intéressants, sur différents pays du globe, à savoir le Canada, l'Amérique du Sud, les Iles-Britanniques, la France, la Belgique, l'Allemagne, l'Autriche-Hongrie, la Russie, la Suède, l'Espagne, l'Italie, la Chine et le Japon.

Les tableaux qui vont suivre ne seront pas les seuls que les *Annales des mines* emprunteront à cet ouvrage, qui mérite d'être signalé comme un merveilleux exemple de ce que sait réaliser l'initiative privée aux États-Unis. Le cadre du présent recueil ne permettra guère d'y faire d'autres emprunts que des tableaux de chiffres, d'autant que si l'on abordait les commentaires relatifs à ces tableaux, on serait entraîné à tout citer ; mais ces chiffres sont par eux-mêmes assez intéressants et assez utiles à consulter pour mériter, à eux seuls, d'être reproduits, sauf aux lecteurs à se reporter à l'ouvrage original pour renseignements plus détaillés.

Production minérale des États-unis en 1892 (*).

	POIDS	VALEUR
1° Métaux.	tonn. métr.	francs
Fonte	9.269.349	708.659.820
Cuivre	152.168	196.063.000
Plomb	198.276	92.810.060
Zinc	75.589	39.904.544
Mercure	974	5.800.150
Nickel	43	298.839
Aluminium	134	990.950
Etain	65	154 504
Antimoine	433	267.288
Argent (kilogrammes)	2.018.616 kil.	434 649.168
Or (idem)	49.657	170 940.000
Platine (idem)	11	9.065
2° Matières minérales.	tonn. métr.	
Charbon. (Anthracite	45.144.958	386.555.500
Charbon. (Houille bitumineuse	110.725.600	632.061.580
Asphalte	49.896	1.508.675
Ozokérite (raffinée)	59	40.404
Pétrole	7.603.049	156.586.883
Gaz naturel	»	67.340.000
Graphite	589	336.286
Pyrites de fer	107.985	1.849.260
Fer chromé	3.048	155.400
Minerai de manganèse	17.277	880.600
Oxyde de cobalt	4	33.411
Soufre	1.656	283.605
Pierre à bâtir	»	233.100.000
Marne	126.505	349.650
Castine	4.634.750	10.865.568

(*) Pour les années précédentes, voir la 3e livraison des *Annales des mines*, 1893.

	POIDS	VALEUR
	tonn. métr.	francs
Chaux	6.352.087	199.430.000
Ciment	»	34.415.988
Pierre meulière	»	2.590.000
Pierre à fusil	16.262	331.520
Pierre à meules	»	82.880
Novaculite	»	777.000
Tripoli	»	103.600
Argile à poterie	457.349	5.180.000
Ardoise	»	103.600
Phosphate de chaux	651.801	12.231.114
Gypse	204.175	3.496.500
Borax	6.462	4.795.696
Barytes	26.932	549.080
Amiante	91	25.900
Talc fibreux	46.279	2.377.620
Stéatite	17.241	1.377.880
Mica	34	518 000
Feldspath	16.262	310.800
Rutile	304	4.144
Spath-fluor	8.167	279.720
Corindon	1.997	455.840
Pierres précieuses	»	973 840
Couleurs minérales	50.817	3.367.000
Blanc de zinc	»	6.216.000
Sel	1.471.875	30.454.370
Brome	172	334.172
Eaux minérales	»	15.540.000

Résumé des valeurs.	francs
1° Métaux	1.650.547.388
2° Matières minérales indiquées	1.817.969.028
3° — non dénommées (estimation)	51.800.000
Total général	3.520.316.446

(*Extrait du volume* The mineral Industry, its statistics, technology and trade.)

PRODUCTION DE LA HOUILLE DANS LE MONDE.

ANNÉES	GRANDE-BRETAGNE	ÉTATS-UNIS	FRANCE	ALLEMAGNE	AUTRICHE-HONGRIE	BELGIQUE	ESPAGNE	RUSSIE	AUTRES PAYS	TOTAUX
	tonn. métr.	tonn. métr.	tonn. métr.	tonn. métr.	tonn. métr.	tonn. métr.	tonn. métr.	tonn. métr.	tonn. métr.	tonn. métr.
1864	94.308.986	22.860.000	11.242.634	26.167.410	4.662.438	11.138.336	425.000	292.000	2.653.506	173.770.000
1865	99.759.613	24.790.400	11.840.000	28.327.000	2.098.089	11.840.603	450.000	331.000	2.712.495	182.080.000
1866	103.946.618	29.317.613	12.000.000	28.624.600	4.893.931	12.774.662	475.000	373.000	3.020.576	194.776.000
1867	106.213.603	28.815.636	11.856.945	30.982.500	6.098.804	12.755.892	500.000	412.000	3.114.690	200.730.000
1868	104.831.996	31.982.678	12.053.047	33.274.400	7.021.756	12.908.589	537.532	451.008	3.174.914	205.696.000
1869	109.188.664	34.301.186	12.580.830	34.379.600	7.063.043	12.942.094	560.000	550.000	3.483.583	215.649.000
1870	112.211.531	29.948.562	13.300.000	34.880.600	8.355.945	13.697.110	661.932	696.209	4.041.111	217.893.000
1871	119.275.832	35.670.426	12.758.400	38.391.300	8.437.401	13.733.176	500.000	829.722	4.097.743	233.695.000
1872	125.521.862	45.744.135	15.201.470	43.059.300	8.825.896	15.658.940	580.000	1.117.045	5.550.652	261.262.000
1873	130.789.643	50.000.851	17.479.311	47.131.800	10.104.769	15.713.293	580.000	1.392.880	6.076.423	279.969.000
1874	128.665.356	46.857.536	16.907.913	46.286.300	12.631.364	14.794.886	560.000	1.345.558	6.276.087	274.325.000
1875	135.491.837	48.914.201	16.956.840	48.592.400	13.062.738	15.011.331	610.000	1.171.736	6.238.917	285.300.000
1876	136.393.939	46.577.329	17.101.448	49.134.700	13.000.000	14.329.578	600.000	1.260.000	6.477.006	284.824.000
1877	136.379.640	52.081.696	16.804.529	48.451.700	13.500.000	13.938.523	650.000	1.300.000	7.670.912	290.850.000
1878	134.786.031	49.460.466	16.960.916	50.519.899	13.900.000	14.899.175	700.000	2.483.575	8.365.938	292.046.000
1879	135.912.531	61.878.067	17.110.979	53.470.716	14.500.000	15.447.292	770.000	2.900.931	8.792.484	310.792.000
1880	149.378.744	66.831.213	19.361.564	59.148.035	14.800.000	16.886.698	847.128	3.266.814	9.079.774	339.370.000
1881	156.711.911	80.079.338	19.775.983	61.540.485	15.304.813	16.873.951	1.271.410	3.437.840	9.839.269	364.825.000
1882	159.065.550	89.113.201	20.603.704	65.378.211	15.555.202	17.590.989	1.496.255	3.803.508	10.995.290	383.302.000
1883	166.421.545	98.078.147	21.333.884	70.442.648	17.047.961	18.177.754	1.044.480	4.366.682	11.663.699	408.577.000
1884	163.393.136	100.177.140	20.093.514	72.413.820	18.000.000	18.051.499	977.350	3.950.000	12.318.341	409.005.000
1885	161.963.736	102.186.761	19.510.530	73.675.515	20.435.463	17.437.603	945.904	4.273.476	12.389.072	412.818.000
1886	160.100.752	104.047.452	19.909.894	73.682.384	20.779.441	17.285.543	921.142	4.507.516	12.973.676	414.208.000
1887	164.777.514	118.859.364	21.987.589	76.932.618	23.125.000	18.378.624	1.038.305	4.464.174	14.007.892	442.164.000
1888	172.721.042	132.005.632	22.602.894	81.900.083	24.000.000	19.218.481	1.036.566	5.106.345	15.324.957	473.976.000
1889	179.816.998	125.387.388	24.343.509	84.973.230	25.326.417	19.869.980	1.014.720	6.118.560	16.062.198	492.773.000
1890	184.594.830	141.627.596	26.083.118	89.290.834	26.100.000	20.365.960	1.179.779	7.000.000	16.887.863	513.130.000
1891	188.519.767	153.851.132	26.024.893	94.252.278	27.000.000	19.865.345	1.286.000	7.000.000	17.126.385	534.926.000

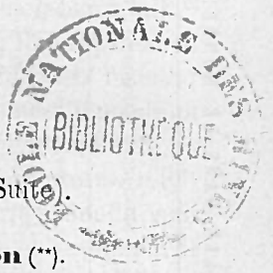
(*Extrait du volume* The mineral Industry, its statistics, technology and trade, *statistical supplement of the* Engineering and Mining Journal.)

PROCÉDÉS D'ESSAI

DES MATÉRIAUX HYDRAULIQUES

Par M. H. LE CHATELIER, Ingénieur en chef des mines,
Professeur à l'École nationale supérieure des mines.

[Suite et fin] (*).



V. — MÉTHODES D'ESSAI (Suite).

8° Essai de déformation (**).

La destruction des chaux et ciments se manifeste presque toujours par des fissures qui, en s'étendant progressivement dans tous les sens, finissent par en amener la désagrégation complète. Ces fentes sont accompagnées tantôt d'un gonflement, tantôt au contraire d'un retrait, mais dans tous les cas d'un changement de volume apparent de la masse.

Les essais de déformation ont pour objet de reconnaître par des expériences de courte durée la production de ces changements de volume. Des essais semblables, s'il en existait de satisfaisants pour tous les cas, suffiraient presque à eux seuls pour apprécier complètement toutes les qualités des ciments, puisque leur ruine est toujours accompagnée de changement de volume. Les principales

(*) Voir *supra*, p. 252 à 361.

(**) Ce chapitre est la reproduction d'un rapport présenté à la Commission d'unification des méthodes d'essai.

causes de changement de volume sont les suivantes :

1° Présence des expansifs : chaux et magnésie ;

2° Action de la gelée ;

3° Action de l'air sec et chaud ;

4° Action des sels de magnésie des eaux de la mer.

Il ne sera question ici que des essais d'invariabilité de volume destinés à déceler la présence des expansifs, les seuls qui aient fait jusqu'ici l'objet d'expériences assez concluantes pour servir de bases à une méthode d'essai.

Un grand nombre de circonstances influent sur le gonflement produit par les expansifs ; il est indispensable de préciser ces influences avant de chercher à définir la méthode d'essai qui devra être employée pour constater ce gonflement.

La *nature chimique* des expansifs a, en premier lieu, une influence prépondérante. La chaux, la magnésie libre, le mélange de ces deux bases, ont une action très différente comme *rapidité* et comme *intensité* du gonflement.

Voici les résultats d'expériences faites en ajoutant à un ciment portland de bonne qualité 5 p. 100 de son poids de chaux ou de magnésie de l'azotate, qui avaient été chauffés à la température de fusion du fer et passés au tamis de 10.000 mailles par centimètre carré.

La rapidité du gonflement est beaucoup plus grande pour la chaux que pour la magnésie pure.

	RAPIDITÉ DU GONFLEMENT			
	A FROID		A 100°	
	Commencement	Fin	Commencement	Fin
Ca O	3 heures.	36 heures.	Immédiat.	1/2 heure.
Mg O	6 mois.	»	6 heures.	40 heures.

L'intensité du gonflement est beaucoup plus grande avec la chaux qu'avec la magnésie. Les proportions ci-dessus indiquées amènent avec la chaux la désagrégation complète du mortier, tandis qu'avec la magnésie il y a eu dans les essais à chaud gonflement sans production d'aucune fente apparente.

A poids égal la chaux libre est donc plus dangereuse que la magnésie ; celle-ci, par contre, passe facilement inaperçue dans les essais usuels, en raison de la lenteur de son action ; aussi, est-elle, pour ce motif, particulièrement redoutable.

L'état *physique* de la chaux et de la magnésie a une influence considérable sur la rapidité avec laquelle leur action se fait sentir et, par suite, sur les effets qu'elles produisent. La chaux et la magnésie obtenues par calcination à basse température, au-dessous de 1.000°, de composés infusibles : carbonate ou hydrate, s'éteignent soit en totalité, soit au moins pour la majeure partie, pendant le gâchage. Dans ce cas, l'influence de ces corps, sans jamais être favorable, n'est que relativement peu nuisible ; elle oblige seulement à employer une plus grande quantité d'eau pour le gâchage, ce qui augmente d'autant la porosité. Mais à mesure que la cuisson de la chaux et de la magnésie a été faite à une température plus élevée, et surtout que des composés plus fusibles ont concouru à la production de ces corps, leur extinction devient de plus en plus lente ; s'effectuant en majeure partie après la prise complète, elle amène la dislocation des mortiers signalée plus haut.

Des expériences ont été faites en ajoutant à un ciment portland de bonne qualité 10 p. 100 de chaux ou magnésie provenant de la calcination soit des carbonates, soit des azotates. Dans le premier cas, il n'y a eu ni fente, ni gonflement ; dans le second cas, le mortier s'est complètement désagrégé avec la chaux, a gonflé et s'est fendillé considérablement avec la magnésie. La magnésie, comme la chaux, était grossièrement broyée.

La *grosseur* des grains de chaux ou magnésie libre a une grande influence sur leur mode d'action. A poids égal, des matières très fines ne produiront qu'un gonflement sans fissuration, tandis que des matières plus grossières amèneront un fendillement énergique. C'est un fait bien connu qu'un blutage plus soigné des chaux et ciments sujets à fendre suffit pour faire disparaître ce défaut; de même dans les soulèvements d'écailles sur les galettes d'épreuve, l'examen à la loupe révèle presque toujours, au fond des cratères formés, la présence d'un gros grain dont l'extinction à soulevé l'écaille.

Des expériences faites avec la magnésie ont donné des résultats identiques. En employant de la magnésie de l'azotate passée au tamis de 10.000 mailles par centimètre carré, il n'y a jamais eu de fentes visibles, bien que parfois le gonflement linéaire relatif ait dépassé 10 p. 100. Les fendillements étaient au contraire très accentués avec de la magnésie moins fine.

La *proportion* de chaux ou de magnésie libre a évidemment une influence considérable sur l'intensité des effets obtenus comme le montrent les chiffres ci-dessous.

	ALLONGEMENT RELATIF	
	à froid après 1 mois	à 100 degrés
Chaux. . . . 1 p. 100.	0	1,6 p. 100
Chaux. . . . 2 —	1,5 p. 100	6,0 —
Chaux. . . . 3 —	> 5,0 —	Désagrégation.
Chaux. . . . 5 —	Désagrégation totale.	Désagrégation totale.
Magnésie . . 5 —	0	6 p. 100
Magnésie . . 10 —	0	> 10 —
Dolomie cuite, 5 —	0	4 —

Toutes les conditions dont l'influence vient d'être étudiée : nature, état physique, proportion de la chaux ou magnésie libre, se rapportent aux expansifs eux-mêmes. Mais l'effet qu'ils produisent est encore grandement influencé par certaines conditions qui leur sont extérieures, telles que la *composition* des mortiers, leur *mode de conservation*, la *température*, la *présence de corps étrangers*, tels que le chlorure de calcium.

La *composition* des mortiers a une influence marquée, mais de sens non déterminé; tantôt c'est la pâte de ciment pur, tantôt le mortier, qui gonfle le plus. Voici quelques chiffres relatifs à deux échantillons d'un même ciment siliceux naturel. Les gonflements ont été mesurés après vingt-quatre heures de séjour à l'eau bouillante.

	ÉCHANTILLON A	ÉCHANTILLON B
Ciment pur	9,0 p. 100	3 p. 100
Mortier 1 : 3	1,5 —	12 —

La raison de ces résultats contradictoires paraît être que la valeur du gonflement tend à croître quand la résistance mécanique du mortier diminue; elle tend au contraire à décroître quand la porosité initiale du mortier est plus grande et offre des vides disponibles pour loger le gonflement de la chaux. On comprend que, de ces deux influences de signe contraire, ce soit tantôt l'une, tantôt l'autre qui l'emporte.

L'emploi d'un excès d'eau dans le gâchage de la pâte de ciment pur réduirait le gonflement.

Ciment à prise prompte. . .	gâché à bonne consistance . .	3,4	Essai fait à 100°.
	gâché en bouillie liquide . . .	1,6	

La *conservation* à l'eau ou à l'air des briquettes a des effets très différents; le gonflement est beaucoup plus rapide sous l'eau qu'à l'air. Ainsi un mélange de ciment portland avec 2 p. 100 de chaux d'azotate, grossièrement broyé, a fendu sous l'eau au bout de deux jours, tandis qu'à l'air les fentes ne se sont manifestées que le dixième

jour. Voici des expériences faites sur des incuits de ciment portland qui conduisent à la même conclusion.

TEMPS ÉCOULÉ	GONFLEMENT	
	à l'eau	à l'air
0	0	0
1 jour	3,6	1,4
1 jour 4 heures	5,2	2,4
1 jour 8 heures	6,4	3
4 jours	Désagrégé.	4,2

Les gondolements, soulèvements des bords, que l'on observe dans les galettes d'essai conservées à l'air, proviennent de ce que la base inférieure, toujours plus humide, gonfle plus vite que la face supérieure.

Si le gonflement est plus long à se produire à l'air il n'en résulte pas qu'il soit finalement moins important. Il semble au contraire résulter des expériences de M. Tetmajer que des produits douteux dont la tenue est irréprochable à l'eau froide finissent à la longue, mais seulement au bout d'un grand nombre de mois, par s'altérer à l'air. Les expériences rapportées ici n'ont pas été poursuivies assez longtemps pour donner aucune indication sur ce dernier point.

La *température* a une influence énorme sur le gonflement de la chaux et de la magnésie; elle l'amplifie et l'accélère considérablement. Ce sont là deux conditions particulièrement favorables pour l'institution des méthodes d'essai; aussi le rôle de la température a-t-il été l'objet d'une étude détaillée. Les expériences rapportées dans le tableau ci-joint ont été effectuées en laissant la prise se produire sous l'eau et en immergeant les briquettes dans l'eau bouillante aussitôt la fin de la prise. Le dispositif expérimental employé qui sera décrit plus loin ne permettait pas de suivre le gonflement au delà de 5 à 6 p. 100. C'est le motif de l'interruption des observations

pour un certain nombre de produits avant que le maximum du gonflement ait été atteint. Le degré de précision de la méthode employée ne permettait pas de constater avec certitude les gonflements inférieurs à 0,2 p. 100. Les guillemets indiquent l'absence d'observations.

De l'influence de la température sur le gonflement.

	EAU FROIDE					EAU BOUILLANTE				
	1 jour	2 jours	4 jours	8 jours	28 jours	15 minutes	1 heure	4 heures	1 jour	4 jours
Ciment portland de très bonne qualité; grosse mouture, ancienne fabrication. — Prise : ½ heure	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Idem + 1 p. 100 Ca O de l'azotate, surcuite à la température de fusion du fer (1.500°) et passée au tamis de 10.000 mailles	0	0	0	0	0	0,2	1,5	1,5	1,5	1,5
Idem + 2 p. 100 *idem*	0,1	»	0,9	1,1	»	5,2	7	Désagrégé.		
Idem + 3 — *idem*	0,2	»	4,7	Désagrégé.		5	Désagrégé.			
Idem + 5 — *idem*	»	7,4	Désagrégé.			6	Désagrégé.			
Idem + 5 — Mg O traitée comme la chaux	0	0	0	0	0 (*)	0,1	0,2	0,3	5,2	6,3
Idem + 10 — *idem*	0	0	0	0	0 (**)	»	1,5	5	10	»
Idem + 5 — dolomie à 6 p. 100 d'argile calcinée à 1.500°	0	0	0	0	0	0,6	3,2	3,7	»	»
A. Ciment portland de roches grises. (Incuits.)	3,5	6	Désagrégé.			6	Désagrégé.			
Idem après addition de 4 p. 100 d'eau et chauffage 24 heures à 100°	0	0	0	0	0	0,5	0,6	1,1	»	»
B. Autre ciment de roches grises	0	0	0	0	0	»	3	4	4	»
Idem après addition de 2 p. 100 d'eau et chauffage 24 heures à 100°	0	0	0	0	0	0,2	0,2	0,4	0,4	»
Idem gâché avec une solution de Ca Cl : 40gr par litre	0	0	0	0	0	»	0,8	1,1	»	»
D. Ciment prompt naturel	0	0	0	0	0	0	1,5	3,4	3,4	3,4
Idem après addition de 2 p. 100 d'eau et chauffage 24 heures à 100°	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Idem gâché avec Ca Cl à 40gr par litre	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E. Ciment demi-lent naturel	0	0	0	0	0	0	0,2	0,6	0,6	»
Idem après addition de 2 p. 100 d'eau et chauffage 24 heures à 100°	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Grappiers broyés sans extinction	0	1,2	4,6	Désagrégé.		0,7	2,8	4,2	Désagrégé.	

(*) Ce mélange a commencé à gonfler au bout de huit mois.
(**) Ce mélange a commencé à gonfler au bout de six mois, et à partir de ce moment le gonflement a marché très rapidement.

Ces essais montrent que par l'eau bouillante on peut déceler des quantités de chaux et de magnésie très faibles qui dans les essais à froid auraient, tout au moins, dans le délai d'un mois, passé inaperçues. La durée suffisante pour les essais à l'eau bouillante est de quatre heures quand il s'agit de reconnaître la chaux seule ou la chaux mêlée à la magnésie, et de vingt-quatre heures pour la magnésie libre isolée. Mais ce dernier cas ne semble pas pouvoir se rencontrer dans les ciments ; l'essai de quatre heures serait donc, dans tous les cas, suffisant ; on pourrait, pour plus de sécurité, le prolonger jusqu'à six heures, comme l'a proposé M. Tetmajer.

La question capitale qui se pose ici est de savoir si, réciproquement, de ce qu'un ciment ne résiste pas à l'essai à chaud, on est autorisé à en conclure la présence de chaux ou magnésie libre ; de plus, est-il certain que ce défaut de résistance à chaud soit l'indice d'un défaut de qualité ? Il n'est pas impossible *a priori* que certains composés tels que : aluminate basique de chaux, sulfo-aluminate de chaux, qui seraient susceptibles de faire prise à froid et de concourir, par suite, d'une façon utile au durcissement, s'éteignent au contraire en gonflant dans l'eau bouillante. Les expériences de laboratoire n'ont jamais jusqu'ici rien révélé de semblable, mais les fabricants de ciments sont unanimes à déclarer que certains produits de qualité incontestable, qui ont fait leurs preuves dans les travaux, ne résistent pas à ce mode d'essai.

Des échantillons de ciments semblables ont été demandés à deux usines fabriquant, l'une des ciments portlands artificiels, l'autre des ciments naturels. Ils sont désignés dans le tableau, les premiers par les lettres A, B et les seconds par les lettres D, E.

Les ciments A, B proviennent de la mouture de roches grises qui, sans être tout à fait incuites, n'ont pas cependant l'aspect normal des roches de ciment portland bien

cuites. Sur les trois échantillons, l'un A gonflait déjà énormément à froid ; la présence d'une grande quantité de chaux libre résultant d'un défaut de cuisson ne saurait être contestée. Le second B seul pourrait rentrer dans la catégorie de produits recherchés. A froid, au bout d'un mois, il n'a pas présenté trace de gonflement ; à chaud, au contraire, il a rapidement gonflé.

Pour rechercher si le gonflement à l'eau chaude ne devait pas, pour ce produit comme pour le précédent, être attribué à la chaux, on a fait les expériences suivantes :

Le ciment B fut gâché avec une dissolution de CaCl à 40 grammes par litre, qui a la propriété, comme l'a établi M. Candlot, de rendre l'extinction de la chaux complète avant la prise. Les briquettes immergées après prise dans l'eau bouillante ont présenté un gonflement quatre fois moindre que gâchées à l'eau pure.

Dans une seconde expérience, le ciment B fut additionné de 2 p. 100 de son poids d'eau, enfermé dans un flacon bouché à l'émeri et chauffé pendant vingt-quatre heures à 100°, ce qui paraît suffisant pour assurer l'extinction à peu près complète de la chaux. Le ciment ainsi traité fut soumis à l'action de l'eau bouillante et il n'y eut qu'un gonflement très faible.

Ces deux faits rapprochés de ce que ce ciment a été obtenu par une cuisson insuffisante, dans des conditions semblables à celles du ciment A, prouvent d'une façon indéniable que le gonflement du ciment B à l'eau chaude est bien dû à la présence d'une petite quantité de chaux libre.

Le ciment prompt naturel D fut soumis aux mêmes épreuves.

Gâchées avec une solution de CaCl à 40 grammes par litre ou gâchées à l'eau douce après extinction au moyen de 2 p. 100 d'eau, les briquettes immergées à l'eau bouil-

lante n'ont présenté aucun gonflement. Si l'on rapproche ce fait de ce que le ciment à prise demi-lente obtenu par une cuisson plus complète du même calcaire ne gonfle pour ainsi dire pas à l'eau chaude, on peut affirmer que dans ce cas encore le gonflement est dû à la présence de chaux libre.

Il faut ajouter que dans le cas des ciments à prise rapide, dont le durcissement initial est principalement dû aux aluminates de chaux, l'effet de l'action de l'eau bouillante est encore exagéré parce qu'en détruisant en partie les hydrates des aluminates la chaleur diminue brusquement la résistance du ciment et facilite ainsi le travail de désagrégation de la chaux. Cette chute brusque de résistance se manifeste très nettement en immergeant les briquettes un quart d'heure (*) seulement dans l'eau bouillante, comme le montrent les chiffres suivants :

	RÉSISTANCE A L'ÉCRASEMENT du cylindre de 30 millimètres de diamètre (après 24 heures)	
	Froid	Froid et 15′ à 100°
	kilogr.	kilogr.
Ciment gâché à l'eau douce.	300	100
Ciment D gâché avec Ca Cl.	600	100

Il résulte donc de l'ensemble de ces expériences que l'essai de gonflement à l'eau bouillante permet de conclure avec certitude la présence de chaux ou magnésie libre dans les ciments.

Le temps qui s'est écoulé entre la fin de la prise et le moment où l'immersion est faite a certainement une influence, mais elle est beaucoup moins grande qu'on ne

(*) Ce mode d'action de l'eau chaude signalé par M. Alexandre pourrait sans doute être utilisé dans les recherches sur la constitution des différents produits hydrauliques.

pourrait être tenté de le supposer; ce n'est qu'au bout d'un temps relativement très long que l'eau chaude cesse d'avoir une action.

Voici quelques résultats d'expériences à l'appui des indications données ici :

		EAU CHAUDE		
		15 minutes	1 heure	4 heures
D. Ciment prompt naturel	Immergé aussitôt la prise, soit 10 minutes après le gâchage.	»	1,5	3,4
	Immergé 48 heures plus tard . .	1,3	4,0	»
	Immergé 30 jours plus tard . . .	0	0	0
Ciment portland additionné de 5 p. 100 de dolomie calcinée.	Immergé après la prise qui s'est faite en 1 heure.	0,6	3,2	3,9
	Immergé 2 jours plus tard. . . .	1,7	3,4	3,4
	Immergé 4 jours plus tard	0,5	1,5	2,8

La conclusion de ces expériences est que pour les essais à l'eau bouillante on peut se contenter de faire l'immersion dans les vingt-quatre heures qui suivent la prise complète sans s'astreindre à choisir exactement le moment de cette prise.

La rapidité d'élévation de température n'a généralement pas d'influence appréciable sur le gonflement; dans la plupart des cas celui-ci est le même, que les briquettes soient immergées brusquement dans l'eau bouillante ou mises dans de l'eau froide que l'on échauffe progressivement. Cependant, pour certains ciments éventés, l'immersion dans l'eau bouillante donne un gonflement plus marqué.

	ÉCHAUFFEMENT brusque		
	15 minutes	1 heure	4 heures
Ciment rapide éventé	0	0,4	0,4
Ciment portland éventé (poussières lourdes)	0	0,2	0,4

	ÉCHAUFFEMENT lent		
	15 minutes	1 heure	4 heures
Ciment rapide éventé	0	0,2	0,2
Ciment portland éventé (poussières lourdes)	0	0	0

Il semble donc préférable, dans tous les cas, d'employer un échauffement progressif.

L'influence de la présence du *chlorure de calcium* dans l'eau de gâchage du ciment ou dans l'eau de conservation des briquettes est, à certains points de vue, analogue, comme l'a depuis longtemps montré M. Candlot, à l'influence d'une élévation de température. La présence de ce sel active considérablement l'extinction de la chaux, d'autant plus que la solution est plus concentrée. Par contre, elle ralentit au contraire la prise, surtout pour les produits à prise rapide qui sont riches en aluminate de chaux.

Il résulte de ces propriétés du chlorure de calcium que, suivant son mode d'emploi, il peut diminuer ou exagérer le gonflement dû à la chaux.

En gâchant le ciment avec une solution de chlorure de calcium suffisamment concentrée, on empêche tout gonflement en rendant l'extinction de la chaux complète avant la fin de la prise. La teneur en chlorure de calcium nécessaire varie de 20 à 60 grammes par litre suivant la

nature du ciment, la proportion de chaux qu'il renferme et surtout son degré de finesse.

En employant une solution un peu moins concentrée, insuffisante pour assurer une extinction totale de la chaux avant prise, on réduit l'importance du gonflement, mais parfois on l'accélère, parce que l'action du chlorure de calcium n'est pas terminée avant la prise et achève l'extinction peu de temps après la prise.

Voici quelques chiffres :

	GONFLEMENT à l'eau froide		
	15 minutes	1 heure	4 heures
D. Ciment prompt Dauphiné gâché à l'eau pure	»	1,5	3,4
— — solution à 20gr de Ca Cl.	»	2,1	2,1
— — solution à 40gr de Ca Cl.	0	0	0

	GONFLEMENT à l'eau bouillante		
	1 jour	2 jours	4 jours
Portland + 3 p. 100 Ca O d'azotate gâché à l'eau pure	0,2	»	4,7
— solution de Ca Cl à 20gr	3,9	5,4	»
A. Ciment de roches grises gâché à l'eau douce	3,5	6	Désagr.
— gâché avec 20gr Ca Cl	»	2	»

En employant au contraire le chlorure de calcium dans l'eau de conservation des briquettes après les avoir gâchées à l'eau douce, on augmente un peu et on accélère toujours beaucoup le gonflement dû à la chaux; l'action est nulle sur la magnésie libre. Le tableau ci-dessous résume quelques expériences comparatives faites sur des ciments gâchés à l'eau douce et conservés dans de l'eau douce froide, de l'eau chaude et une dissolution de chlorure de calcium à 40 grammes par litre :

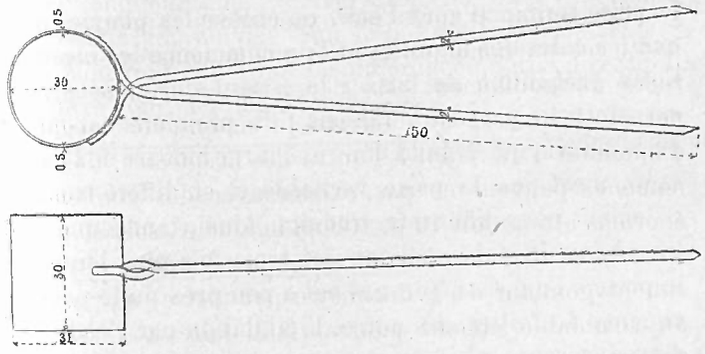
	EAU DOUCE			CaCl			EAU CHAUDE		
	1 jour	4 jours	28 jours	1 jour	2 jours	4 jours	15 minutes	1 heure	4 heures
Ciment portland + 3 p. 100 CaO d'azotate calciné à 1.500°. . . .	0,2	4,7	»	4	5,2	»	3	Désagrégé.	
Ciment portland + 5 p. 100 de dolomie surcuite.	0	0	0	0	0	0	0,2	3,2	3,7
B. Ciment portland de roches grises.	0	0	0	0,2	0,3	»	»	3	4
Ciment portland + 1 p. 100 de chaux d'azotate	0,1	0,9	»	0,8	1,9	2,1	5,2	7	Désagr.

L'effet du chlorure de calcium, nul sur la magnésie, est beaucoup plus faible sur la chaux que l'élévation de température. Dans ces conditions, il ne semble pas y avoir lieu de recommander l'usage du chlorure de calcium dans les épreuves de déformation, à la place de l'eau chaude.

Le seul procédé employé jusqu'ici pour les essais de déformation est celui des galettes, dans lequel on observe la production de fentes ou soulèvement d'écailles, ou de gondolements. D'après les expériences rapportées plus haut, ces phénomènes ne sont que la conséquence indirecte du gonflement; ils dépendent pour une grande part de la finesse de mouture du ciment, des inégalités d'humidité d'un point à l'autre des briquettes. Ces phénomènes peuvent ne pas exister avec des gonflements énormes atteignant 10 p. 100 en longueur, soit 30 p. 100 en volume. On ne pourrait employer à aucun usage un ciment gonflant de 1 décimètre par mètre, et pourtant un semblable ciment pourrait satisfaire à l'essai des galettes immergées, sinon indéfiniment, au moins pendant plusieurs mois. Un semblable essai ne saurait donc être recommandé.

Le seul procédé rationnel pour reconnaître le gonflement d'un ciment est de le mesurer directement et non pas d'en observer seulement une conséquence plus ou moins lointaine. Différents procédés peuvent être employés dans ce but. MM. Durand-Claye et Debray emploient depuis longtemps à l'École des ponts et chaussées un procédé semblable, qui consiste à mesurer, après amplification par un levier, l'allongement de longues baguettes de ciment. Ce procédé présente une très grande précision, puisqu'il permet de constater des variations de longueur de 1/10.000, c'est-à-dire de l'ordre de grandeur de la dilatation thermique ou élastique. Cette méthode, excellente pour des expériences de recherches, est beaucoup trop délicate pour des essais pratiques.

Le procédé suivant, d'un emploi beaucoup plus simple, conduit à des résultats d'une précision un peu moindre, mais est encore largement suffisant pour atteindre le but poursuivi. La pâte normale de ciment pur est enfermée dans des moules cylindriques de 30 millimètres de diamètre et 30 millimètres de hauteur, faits avec un métal de $0^{mm},5$ d'épaisseur et fendus suivant une génératrice.



L'ouverture du moule suivant cette génératrice donnera la mesure du gonflement : pour amplifier cette ouverture, deux aiguilles de 150 millimètres sont soudées de part et d'autre de la fente. Grâce à cette disposition, le déplacement relatif des pointes des deux aiguilles semble se

rapprocher du gonflement linéaire qu'éprouverait un bloc de ciment ayant $0^m,60$ de dimension ; cette relation résulterait de quelques mesures de comparaison directes. C'est en partant de cette relation, peut-être contestable, qu'ont été calculés les gonflements p. 100 donnés dans les tableaux précédents. On a admis qu'un déplacement de 6 millimètres des pointes des aiguilles correspondait à un gonflement de 1 p. 100. Pour empêcher l'ouverture du moule pendant le remplissage, on doit réunir les deux aiguilles par une cale que l'on n'enlève qu'après la fin de la prise. Il est indispensable, surtout pour les produits à prise très lente comme les chaux, dont l'eau s'évaporerait ou s'égoutterait à l'air, de les immerger aussitôt moulés, sans attendre la prise. On peut le faire sans craindre aucun délavage en ayant soin de poser les moules sur une plaque de verre, et de les recouvrir d'une seconde lame de verre. On transporte les moules aussitôt remplis et enfermés entre ces deux plaques de verre, dans une cuve remplie d'eau. Aussitôt la prise terminée sous l'eau, on enlève les plaques ainsi que les cales des aiguilles et l'on commence les mesures. Cette précaution de laisser le ciment durcir sous l'eau est motivée par deux raisons : la première est que la prise à l'air, qui dépend dans une large mesure de l'égouttage, n'est pas la prise véritable et en diffère très inégalement pour différents produits. Ainsi, tandis que pour les chaux la prise à l'eau est trois fois plus lente que la prise à l'air, la différence est à peu près nulle pour les ciments de laitier. En outre, l'imbibition par l'eau d'une masse poreuse plus ou moins sèche amène un certain gonflement de la masse qui peut même aller jusqu'à la désagrégation pour les produits insuffisamment hydrauliques. Cette précaution d'effectuer le durcissement sous l'eau est surtout indispensable pour les essais à l'eau chaude. C'est pour avoir laissé durcir ses galettes

d'épreuves à l'air que M. Tetmajer avait été conduit à penser que l'essai à l'eau chaude était sans valeur pour les chaux.

On peut se demander si le gonflement mesuré par ce procédé et par celui des longues baguettes de MM. Durand-Claye et Debray a la même valeur. S'il s'agissait simplement de dilatation analogue à la dilatation thermique, c'est-à-dire s'effectuant également dans toutes les directions, il devrait nécessairement en être ainsi. Mais le gonflement est le résultat d'une infinité de petites ruptures qui peuvent se produire inégalement dans les diverses directions. Il semble *a priori* que ces ruptures doivent se produire dans les directions de moindre résistance, c'est-à-dire normalement aux surfaces libres en se propageant de l'extérieur vers l'intérieur. S'il en est réellement ainsi, le gonflement relatif sera plus important dans les directions de moindre épaisseur. Une baguette mince devrait proportionnellement s'allonger moins dans le sens de la longueur que transversalement. Les expériences ci-dessous poursuivies dans le but d'élucider cette question montrent qu'en fait les différences d'une direction à à l'autre sont peu importantes.

	BAGUETTE RECTANGULAIRE de 120 millimètres de longueur et de 10 millimètres de largeur		CYLINDRES de 30mm de hauteur et 30mm de largeur
		p. 100	p. 100
Ciment additionné de 5 p. 100 de MgO et immergé à l'eau bouillante	Longueur	3,3	6,2
	Largeur	3,1	
Ciment additionné de 1 p. 100 de CaO et immergé dans l'eau bouillante	Longueur	1,17	1,5
	Largeur	1,4	

Dans le cas des cylindres, la résistance de l'enveloppe métallique suffit, malgré son élasticité, pour rendre le gonflement perpendiculaire à l'axe, moitié moindre que

dans la direction de l'axe. Les chiffres donnés dans les tableaux représentent le gonflement moyen.

Les mesures de gonflement faites par cette méthode donnent des résultats suffisamment concordants comme le montrent les chiffres suivants relatifs à un même échantillon de ciment.

		15 minutes	1 heure	4 heures	1 jour	Remarques
Ciment prompt naturel placé dans l'eau bouillante.	A	0	1,5	3,4	3,4	Immergé brusquement dans l'eau bouillante aussitôt la prise.
	B	0,2	3,2	3,4	3,4	
	C	0	2,8	3,4	3,2	Immergé dans l'eau froide aussitôt la prise.
	D	2	3,4	4,2	4,2	Gâché un peu ferme et immergé 24 heures après la prise.
	F	0,2	2,6	4	4	

9° et 10° Essais de porosité et de perméabilité.

La Commission d'unification des méthodes d'essai a défini un essai de porosité et un essai de perméabilité. Des expériences semblables sont certainement intéressantes comme études générales sur les propriétés des mortiers, mais elles ne peuvent rien apprendre sur les qualités individuelles d'un produit hydraulique et ne peuvent par suite être utilisées pour les essais de réception.

La porosité dépend exclusivement de la quantité d'eau employée au gâchage, du tassement du mortier et de la quantité d'eau déjà entrée en combinaison au moment des mesures, c'est-à-dire des grandeurs rigoureusement indépendantes de la qualité du produit.

La perméabilité dépend pour la majeure partie des mêmes facteurs que la porosité, et accessoirement de la proportion de fine poussière qui est déjà déterminée par un essai antérieur, peut-être enfin dans une très faible mesure de la nature chimique du produit considéré. Mais

cette dernière influence est trop faible pour pouvoir se manifester d'une façon certaine au milieu des autres causes plus importantes, et impossibles à conserver invariables, dont dépend le phénomène en question.

Il ne semble pas d'ailleurs que personne ait encore songé sérieusement à utiliser pour les réceptions ces essais de porosité et de perméabilité.

11° Essais de décomposition à l'eau de mer.

Cette question des essais de résistance à l'eau de mer a une importance capitale. Si les essais d'immersion et de filtration à l'eau de mer définis par la Commission donnaient sur ce sujet une indication même approchée de la valeur des ciments, il faudrait, quelque imparfaits qu'on puisse les juger, les adopter avec empressement. Mais une confiance même aussi restreinte serait bien difficile à justifier. La Commission d'unification n'a même pas tenté de le faire. Pour cet essai, et seulement pour celui-là, elle n'a pas présenté de rapport détaillé à l'appui de ses conclusions.

Les méthodes actuellement essayées pour ces essais dans différents laboratoires et qui ont été adoptées sans modification importante par la Commission sont exclusivement empiriques. On place au laboratoire des briquettes de ciment exposées à l'action de l'eau de mer dans des conditions que l'on s'efforce de rendre identiques à celles de la pratique. Mais pour cet essai, plus encore que pour tous les autres, cette identité est impossible à obtenir, et cela pour deux causes.

En premier lieu l'action de l'eau de mer ne se manifeste que très lentement. Les études très complètes de M. Alexandre (*) sur ce sujet, montrent que dans l'essai par immersion les premiers indices de dégradation ne

(*) *Annales des ponts et chaussées*, septembre 1890, p. 131.

commencent à se manifester au plus tôt qu'au bout de quelques mois, mais ne le font souvent qu'après des années. Dans l'essai beaucoup plus énergique par filtration, les résultats ne sont guère plus rapides. « Bien que ce dernier procédé soit évidemment le plus rapide, il exige encore de longs délais, c'est souvent après cinq ou six mois de filtration seulement qu'apparaissent dans les blocs les premiers signes d'une altération extérieure du mortier. » Il ne saurait cependant être question de faire durer six mois des essais de réception.

Mais un second défaut beaucoup plus grave de ces essais est de ne donner en fait aucune indication sur la façon dont un mortier se comportera dans les travaux. Tous les membres de la Commission, qui ont eu l'occasion de faire personnellement des essais semblables, ont reconnu que des ciments qui se comportaient très bien au laboratoire peuvent très mal se comporter dans les travaux et réciproquement. L'explication de ce fait est facile à comprendre : Vicat a établi que les produits hydrauliques, même les meilleurs, sont immédiatement décomposés lorsqu'ils sont soumis à l'action chimique directe des sels de magnésie, et cela a été confirmé depuis par toutes les expériences ultérieures. Si les maçonneries peuvent résister à la mer, c'est uniquement parce que la pénétration des sels de magnésie se trouve empêchée par des causes diverses : défaut de porosité ou de perméabilité, carbonatation, toutes circonstances qui dépendent beaucoup plus des conditions d'emploi du ciment que de ses qualités. Il est possible cependant qu'à pénétration égale l'altération marche moins rapidement pour certains ciments que pour d'autres. Cela semble résulter des recherches de M. Candlot sur le rôle des sulfates et des aluminates de chaux, mais les essais recommandés par la Commission sont trop profondément affectés par les conditions d'emploi du ciment pour mettre en évidence

une influence semblable, surtout dans des expériences à brève échéance comme celles qui ont pour objet des essais de réception.

On peut dire que cette question si capitale des essais à l'eau de mer est encore complètement à étudier. Il serait regrettable d'adopter, en dehors de toute base expérimentale précise, des essais non concluants qui auraient le grave inconvénient d'inspirer une sécurité fallacieuse et de détourner d'entreprendre sur ce sujet de nouvelles recherches indispensables.

Pour faire avancer la question il y aurait lieu de reprendre et de compléter les études de M. Candlot sur le rôle des sulfates et des aluminates de chaux. Si le rôle entrevu pour ces derniers sels était reconnu exact, il y aurait lieu alors de chercher des procédés d'essais qui permettent de caractériser la présence en plus ou moins grande quantité des aluminates de chaux. On pourrait songer à utiliser dans ce but les deux remarques suivantes faites par M. Alexandre et par M. Candlot.

M. Alexandre a reconnu que certains ciments, portés à 100° pendant quelques minutes, perdaient une fraction importante de leur résistance à la rupture. D'après quelques essais que j'ai faits sur le même sujet, la perte de résistance pourrait varier de 0 à 90 p. 100. Elle m'a paru plus accentuée pour les ciments à prise rapide, qui sont plus riches en aluminate de chaux.

M. Candlot a reconnu que la rapidité de prise d'un ciment pouvait, dans certains cas, être diminuée considérablement par la substitution à l'eau douce pour le gâchage d'une solution de chlorure de calcium à 2 p. 100. Ce ralentissement, nul pour les silicates de chaux, ne se ferait sentir que sur l'aluminate de chaux.

Enfin j'ai reconnu que l'addition de chaux éteinte ou de magnésie aux ciments alumineux produisait également un ralentissement considérable de la prise.

12° Essai d'adhérence.

L'adhérence du ciment aux matériaux de construction, au sable, est certainement une qualité utile à l'emploi, qui peut varier d'un produit à un autre. Elle doit dépendre de la constitution chimique de chaque produit hydraulique, comme toutes les qualités des ciments d'ailleurs. Étant donné que l'on n'a pas encore le moyen de déterminer par des essais directs cette constitution, et que l'on est provisoirement réduit à se contenter d'essais empiriques, il est bien certain que l'institution d'un essai d'adhérence semble assez justifié, à condition cependant que l'adhérence varie notablement d'un produit similaire à un autre et vaille par suite la peine d'être mesurée. Or il ne semble pas en être ainsi d'après les essais, en très petit nombre il est vrai, donnés par M. Candlot dans son rapport à la Commission d'unification. Trois mortiers de ciments portlands différents, comprimés au dosage 1 : 3, ont donné respectivement à vingt-huit jours des résistances par centimètre carré égales à :

$$7^{kg},08, \quad 7^{kg},80, \quad 7^{kg},73,$$

c'est-à-dire des valeurs identiques.

Il est vrai que, pour des produits de nature différente, les écarts sont notables. L'adhérence des ciments de laitier ne serait que moitié de celle des ciments portlands. C'est là un fait qui pouvait se prévoir *a priori :* les cristaux d'hydrate de chaux qui se forment pendant le durcissement du portland doivent en effet, au point de vue de l'adhérence, jouer un rôle prépondérant. Mais le rôle des essais de réception n'est pas en général de comparer entre eux des produits de nature différente. Cette comparaison doit faire l'objet de recherches spéciales pour-

suivies simultanément dans les laboratoires et sur les chantiers. Pour cette catégorie des recherches de laboratoire, les essais d'adhérence sont certainement intéressants ; peuvent-ils être également utiles pour des essais de réception? c'est possible, mais avant de trancher la question il faudrait au moins avoir quelques données expérimentales. Il serait prématuré d'introduire dès maintenant un semblable essai dans un cahier des charges.

VI. — CONCLUSIONS. — PROJET DE RÉDACTION D'UN CAHIER DES CHARGES.

L'objet unique de ce mémoire a été de rechercher quels sont les essais qui peuvent utilement donner des renseignements avant l'emploi sur la qualité des produits hydrauliques. De semblables essais, utiles au fabricant pour contrôler sa fabrication, sont absolument indispensables au consommateur pour les réceptions des matériaux qui lui sont livrés pour ses travaux et dont il n'a généralement pas pu surveiller la fabrication.

Je résumerai les idées développées au cours de cette étude en les formulant sous forme de clauses susceptibles d'être insérées dans un cahier des charges. Mais avant d'aborder ce résumé, il y a lieu de discuter au préalable deux questions d'ordre général qui se rattachent à la rédaction de tout cahier des charges :

1° Peut-on se contenter d'un cahier des charges unique pour un produit donné qui serait appliqué à des fournitures faites pour des travaux quelconques, ou bien faut-il varier les clauses des cahiers des charges avec la nature de ces travaux?

MM. Guillain et Vétillart, en rédigeant un cahier des charges pour les travaux du port de Boulogne, avaient en vue son application à des travaux quelconques. M. Vétillart le dit très nettement au début de son rapport.

« Tous les ingénieurs recherchent également le produit qui devra donner les mortiers les plus résistants et les plus stables, celui qui assure aux maçonneries la cohésion la plus forte et la plus constante, quelle que soit l'intensité d'action de certains agents de décomposition peu connus sans doute, mais presque toujours les mêmes. Il serait donc désirable qu'il y eût un accord complet entre toutes les clauses des cahiers des charges relatives à la qualité et aux conditions de réception du ciment, et il est nécessaire que ces conditions uniformes soient parfaitement en rapport avec l'état d'avancement de l'industrie et conçues de manière à en favoriser le progrès. »

La Commission d'unification des méthodes d'essais s'est arrêtée à une conclusion diamétralement opposée qui est formulée en tête du rapport général : « Il y a lieu d'observer que les différents essais auxquels on soumet un produit sont destinés à reconnaître s'il possède les propriétés répondant à l'emploi spécial qui doit en être fait. Pour certains constructeurs qui voudront se servir de ciment pour des ouvrages provisoires à la mer, la rapidité de prise aura une importance capitale et la résistance au bout de quelques mois sera tout à fait indifférente; pour d'autres, au contraire, qui auront à confectionner des tuyaux de conduite forcée, la rapidité de la prise ne présentera aucun intérêt sérieux, tandis que la résistance finale à l'extension sera l'une des propriétés les plus importantes à considérer. Ces deux exemples, que l'on pourrait multiplier, suffisent pour montrer que tel essai, indispensable dans un cas déterminé, devient inutile dans un autre... »

Avant de prendre parti entre ces deux opinions contraires, il faut établir une distinction capitale entre les méthodes d'essai employées et la valeur numérique exigée pour les grandeurs dont ces essais donnent la mesure. Il ne viendra certainement à l'idée de personne de demander pour tous les produits hydrauliques la même rapidité de prise; cela n'empêchera pas cependant de faire dans tous les cas le même essai de prise. Une variation semblable pourra également, quoique à un moindre degré, être admise pour d'autres essais. On conçoit, par exemple, que, pour des travaux peu importants, on pourra se contenter d'une résistance à la rupture plus faible, à condition, bien entendu, de payer le ciment moins cher. Mais si l'on veut un produit de première qualité, la même résistance devra être exigée, quels que soient les travaux en vue. Aucun fait connu n'autorise jusqu'ici à penser qu'il puisse y avoir dans une même catégorie, celle des ciments portlands par exemple, des produits de qualité supérieure jouissant de propriétés notablement différentes et convenant par suite mieux pour tel ou tel emploi. Un acier dur et un fer doux, tous deux de première qualité, sont certainement très différents; il en serait de même pour deux ciments portlands constitués exclusivement l'un par de l'aluminate de chaux et l'autre par du silicate. Mais, dans l'état actuel de la fabrication, ces nuances, qui doivent cependant exister, échappent à nos procédés d'investigation; il serait tout à fait prématuré de vouloir dès à présent en tenir compte dans les méthodes d'essai.

Il n'y a du reste, en fait, que deux catégories d'essai pour lesquelles le rapport général de la Commission d'unification réclame effectivement de varier les méthodes employées. Ce sont :

1° Les essais de résistance à la rupture;

2° Les essais de résistance à l'action de l'eau de mer.

Pour les essais de rupture, le motif invoqué pour employer tantôt la flexion, tantôt l'arrachement, tantôt l'écrasement, repose sur la supposition gratuite qu'il n'existe aucune relation entre les résistances à ces trois

modes de rupture. J'ai discuté tout au long cette question dans le corps du mémoire et montré que cette supposition était absolument contredite par les faits; il n'y a pas lieu d'insister davantage.

L'essai à l'eau de mer semble en effet, *a priori*, inutile pour les ciments destinés à être employés à l'eau douce ou à l'air, mais ce n'est encore là qu'une supposition. La supposition contraire est également soutenable et, pour ma part, je serais assez porté à croire que les qualités de résistance à l'eau de mer et aux intempéries atmosphériques sont extrêmement voisines, sinon identiques. Mais il n'y a pas lieu, pour le moment, de s'appesantir outre mesure sur cet essai, pour lequel rien de satisfaisant n'a encore été fait. En mettant les choses au pis, c'est-à-dire en supposant que l'essai à l'eau de mer, lorsqu'il sera trouvé, soit tout à fait inutile pour les ciments employés aux travaux non maritimes, on sera conduit à introduire dans le cahier des charges général un article que l'on supprimera là où il sera jugé sans intérêt.

La rédaction d'un cahier des charges unique est donc possible: l'expérience des pays voisins, l'Allemagne, la Suisse, la Russie, est d'ailleurs là pour le prouver et la nôtre aussi dans une certaine mesure, puisque le cahier des charges de Boulogne rédigé en vue de travaux à la mer est appliqué aujourd'hui par le Génie militaire à des fournitures destinées aux travaux de fortifications.

La seconde question d'ordre général à discuter avant d'aborder la rédaction d'un projet de cahier des charges est la suivante.

Il est indispensable de n'introduire dans un cahier des charges général que des essais sur l'efficacité desquels tout le monde soit d'accord. On ne peut demander à un ingénieur d'apprécier la qualité d'un produit qui lui est livré d'après des caractères qui ne lui semblent mériter aucune con-

fiance; il est également difficile d'imposer à un fabricant des conditions de réception onéreuses pour son industrie quand il n'est pas impossible de soutenir qu'ils n'apportent aucune garantie sérieuse au consommateur. Cependant les essais sur lesquels tout le monde peut se mettre d'accord aujourd'hui sont absolument insuffisants, et personne ne conteste qu'il y ait intérêt à en chercher de nouveaux. Mais pour faire accepter ces nouveaux essais d'une façon générale, il faudra qu'ils aient auparavant fait leur preuve à l'usage. On se trouve donc pris dans un cercle vicieux dont il faut sortir.

On pourrait le faire, ce me semble, en divisant comme l'avaient d'ailleurs fait MM. Guillain et Vétillart, les essais en deux catégories :

Les essais de réception proprement dits, ou essais de qualité;

Les essais d'identification.

Dans la première catégorie, on mettrait les essais dont l'efficacité est incontestée.

Dans la seconde catégorie, les essais contestés, soit les nouveaux essais qui doivent faire leurs preuves avant de passer dans la première catégorie, soit au contraire les essais reconnus défectueux et appelés à disparaître, mais que l'on ne veut cependant pas, par respect pour la tradition, éliminer trop brusquement. C'est pour cette seconde catégorie que M. Guillain avait imaginé la classe en question. Je laisserai de côté, comme je l'ai dit au début, les essais appelés à disparaître, que les intéressés pourront, dans chaque cas particulier, rétablir à leur guise; je ne m'occuperai que des nouveaux essais qui paraissent assez sérieux pour devoir figurer un jour dans tous les cahiers des charges, mais dont l'efficacité absolue n'est pas encore reconnue d'une façon générale. En demandant seulement à ces essais d'établir l'identité d'un produit déterminé avec un produit similaire reconnu

antérieurement de bonne qualité, il semble difficile de contester leur utilité relative.

Essais de qualité.

Les seuls essais sur l'utilité desquels tout le monde soit d'accord sont au nombre de deux : l'essai de *rapidité de prise* et l'essai de *résistance à la rupture*.

Essai de rapidité de prise. — Il faut conserver cet essai sous sa forme actuelle, en attendant que l'essai sur mortier qui sera indiqué aux essais d'identification ait fait ses preuves.

Les dispositions du cahier des charges de Boulogne, qui sont aujourd'hui les plus généralement adoptées, doivent donc être gardées telles quelles, en indiquant seulement parallèlement à l'emploi de l'eau de mer celui de l'eau douce ; le choix de l'eau sera fait d'après la nature des travaux auxquels le ciment est destiné.

Essai de résistance à la rupture. — Il est à désirer que l'essai de résistance à la rupture se fasse exclusivement par écrasement ; mais la question n'est pas encore mûre en ce qui concerne la nature des machines et les dimensions des briquettes d'épreuve à employer. Il faut donc provisoirement conserver la rupture par arrachement, qui est la plus usitée aujourd'hui.

On peut, pour cet essai, conserver la rédaction du cahier des charges de Boulogne, après modification des points suivants :

1° Suppression de l'essai de pâte pure ;

2° Substitution de l'eau douce à l'eau de mer ;

3° Substitution du sable de Leucate au sable de quartzite broyé ;

4° Suppression de la tolérance, exceptionnelle en principe, mais devenue très générale dans la pratique, de faire varier la proportion normale de 12 p. 100 d'eau pour la confection des mortiers ;

5° Emploi de toutes les briquettes rompues pour le calcul de la moyenne.

Essais d'identification.

Les essais d'identification dont l'usage peut être recommandé d'une façon générale, sans préjudice des essais variés que chacun pourra y ajouter à sa guise, sont, dès à présent au nombre de trois : *finesse de mouture*, *durcissement initial* et *déformation par les expansifs*.

Essai de finesse de mouture. — L'utilité d'un semblable essai est reconnue d'une façon générale et il pourrait à ce titre figurer au nombre des essais de qualité. Le seul motif pour l'en écarter provisoirement est que l'on n'est pas fixé d'une façon définitive sur les avantages ou inconvénients d'une mouture plus ou moins fine.

Le cahier des charges de Boulogne ne contient aucune clause relative à la finesse de mouture. Les cahiers des charges des pays étrangers limitent la proportion des grains retenus sur le tamis de 900 mailles. La Commission d'unification propose un tamisage à trois tamis : 320, 900 et 4.900 mailles au centimètre carré.

De ces tamis, celui à 900 semble seul devoir être conservé ; il peut y avoir intérêt pour se faire une idée de la proportion de fine poussière de compléter ce tamisage pour la détermination de la quantité d'eau nécessaire pour la confection de la pâte normale.

Les constantes numériques de cet essai seront fixées après des essais comparatifs faits sur des produits reconnus de bonne qualité provenant des usines auxquelles le cahier des charges doit s'appliquer. Les ingé-

nieurs qui se croiront en mesure de déterminer *a priori* les valeurs les plus convenables à exiger pour ces constantes numériques pourront faire passer cet essai au nombre des essais de qualité.

Essai de durcissement initial. — Cet essai, destiné à remplacer progressivement l'essai de prise ordinaire, pourra se faire par écrasement de mortiers sableux moulés dans des cylindres de $30^{mm} \times 30^{mm}$ qui serviront également pour l'essai de déformation. La machine de rupture par arrachement usitée pour les briquettes de 5 centimètres sera employée après addition de mâchoires convenables. Le mortier sera gâché avec une quantité d'eau fixe pour un poids donné de ciment. Les ruptures se feront à des dates fixes échelonnées depuis 1 heure jusqu'à 28 jours.

Par exemple : 1 heure, 6 heures, 2 jours, 7 jours, 28 jours, dont on ne conserverait pour chaque produit que deux ou trois d'entre elles convenablement choisies.

Les résistances exigées à chaque date seraient fixées d'après des expériences préliminaires faites sur les produits de l'usine ou de la région à laquelle s'applique le cahier des charges. On aurait, au bout de peu temps, réuni un assez grand nombre de données semblables pour pouvoir fixer *a priori* les résistances exigibles et faire passer cet essai au nombre des essais de qualité en le substituant à l'essai de prise.

Essai d'invariabilité de volume. — Cet essai pourrait, dès à présent, figurer au nombre des essais de qualité ; si on ne le fait pas, c'est pour donner satisfaction à quelques-uns des membres de la Commission d'unification qui jugent cet essai trop rigoureux pour les produits de leur fabrication.

La rédaction adoptée par la Commission d'unification peut être conservée sans changement.

On fixera provisoirement le gonflement accordé à chaque produit par des expériences préalables faites sur des produits de choix recueillis dans les diverses usines.

Voici la rédaction que l'on pourrait adopter pour les clauses d'un cahier des charges général, destiné aux essais de réception.

Art. I. Le présent cahier des charges s'applique à une fourniture de [chaux hydraulique, ciment naturel (proprement dit, à prise rapide ou de grappier), ciment artificiel, ciment mixte (de laitier, etc.)].

Art. II. Le produit fourni proviendra exclusivement des usines du soumissionnaire et aura été fabriqué avec tous les soins reconnus utiles à sa bonne qualité.

La *chaux hydraulique* sera obtenue par cuisson à température élevée de calcaires argileux ou de mélanges artificiels de calcaire et d'argile d'une composition convenable. L'extinction se fera en grande masse et sera prolongée au moins pendant une huitaine de jours. Les seules matières ajoutées après cuisson à la chaux seront des grappiers broyés sous la réserve qu'ils soient composés pour la majeure partie de ciment véritable, qu'ils ne renferment que très peu de calcaire incuit ou de chaux non éteinte, et qu'ils aient été soumis avant mélange à un silotage suffisamment prolongé pour leur faire perdre toute tendance au gonflement.

Les *ciments naturels* seront obtenus par la cuisson de calcaires chimiquement et physiquement homogènes dans toutes leurs parties ; ils seront soumis à un silotage suffisamment prolongé pour leur faire perdre toute tendance au gonflement. Il ne sera fait au ciment aucune addition de matières étrangères.

Le *ciment artificiel* sera produit par la mouture de roches scorifiées, obtenues au moyen de la cuisson jusqu'à

ramollissement d'un mélange intime de carbonate de chaux et d'argile, rigoureusement dosé, chimiquement et physiquement homogène dans toutes ses parties. Il ne sera fait au ciment moulu aucune addition de matières étrangères autres que la petite quantité d'eau et d'acide carbonique qu'il peut absorber à l'atmosphère.

Le ciment de laitier sera obtenu par le mélange absolument intime de chaux bien éteinte, hydraulique ou non, et de laitiers de haut fourneau non fusants; ces laitiers devront, à leur sortie du creuset et avant leur solidification, avoir été précipités brusquement dans une grande quantité d'eau froide, et ensuite soumis à un broyage très fin.

Art. III. Toute fourniture partielle, dès son arrivée au magasin du chantier, donnera lieu à une vérification, pour constater que le ciment est parfaitement sec. L'entrée du magasin sera refusée à tout sac qui aurait été exposé à l'humidité et dont le contenu ne serait pas absolument pulvérulent dans toutes ses parties.

Puis, la partie de la fourniture reconnue admissible au point de vue de la siccité, sera soumise aux essais définis par les articles suivants relatifs :

1° A la durée de prise ;

2° A la résistance à la rupture ;

3° A la finesse ;

4° A la rapidité du durcissement initial ;

5° A la déformation par les expansifs.

Art. IV. *Confection des pâtes et mortiers normaux.* — La pâte *normale* plastique de ciment (chaux) pur sera définie par sa consistance, qui devra correspondre au passage de la consistance boueuse à la consistance sèche, cet état ayant été obtenu après un gâchage de cinq minutes (deux minutes pour les ciments à prise rapide), effectué sur 1 kilogramme de ciment. La consistance sera considérée comme convenable, lorsque une petite quantité de

pâte prise avec la truelle se détachera par une secousse sans y laisser aucune partie adhérente et qu'une augmentation de 10 p. 100 de la quantité d'eau donnera une pâte boueuse, caractérisée par son adhérence à la truelle (*).

Pour déterminer la proportion d'eau à mélanger avec le ciment, on fera un essai préliminaire en opérant sur un poids de ciment voisin de 1 kilogramme prélevé sur une quantité pesée de $1^{kg},500$; on l'étalera sur une table imperméable en faisant une couronne au centre de laquelle on versera tout d'abord une quantité d'eau mesurée et assez considérable pour donner certainement une consistance boueuse, puis on ajoutera peu à peu de nouvelles quantités de ciment, jusqu'au moment ou la consistance plastique sera atteinte. La pesée de la quantité de ciment non employée fera connaître, en la retranchant de $1^{kg},500$, celle qui sera entrée dans la composition de la pâte. On vérifiera la convenance de la proportion d'eau employée en répétant l'expérience sur 1 kilogramme de ciment, auquel on ajoutera d'un seul coup la quantité d'eau déterminée par l'essai préalable et en prolongeant le gâchage exactement cinq minutes. Si le résultat n'est pas satisfaisant, on fera une troisième expérience en faisant varier d'un dixième la quantité d'eau.

Le mortier *normal* d'essai sera confectionné avec un sable naturel provenant de la plage de Leucate ; ce sable sera tamisé de façon à ne conserver que les grains ayant passé au tamis en tôle perforée de trous de $1^{mm},5$ et ayant été retenu par le tamis à trous de 1 millimètre ; le mortier sera dosé en poids.

La quantité d'eau à employer sera pour les ciments à prise lente, égale aux cinq dixièmes du poids du ciment

(*) On peut également définir la consistance normale de la pâte par la sonde Tetmajer, qui donne des résultats équivalents à ceux obtenus par le procédé indiqué ici.

entrant dans la confection du mortier, et pour les ciments de Vassy et les chaux hydrauliques, égale aux sept dixièmes de ce même poids.

La quantité de sable sera, dans tous les cas, égale à trois fois le poids du ciment.

Pour confectionner le mortier on opérera sur 1 kilogramme de matières sèches (250 grammes de ciment et 750 grammes de sable) qu'on mélangera intimement à sec avec une spatule dans une capsule, puis on versera d'un seul coup la quantité d'eau à employer, soit 125 grammes pour le ciment à prise lente, ou 175 grammes pour les chaux et ciments à prise rapide ; et le mélange sera ouvré fortement avec la spatule pendant cinq minutes.

Art. V. *Essai de prise*. — Les essais de prise porteront sur la pâte normale de ciment pur, définie comme il a été dit ci-dessus. Ils comporteront la détermination du début et de la fin de la prise.

Au moment du gâchage, les températures du ciment, de l'eau et de l'air devront être comprises entre 15 et 18° C.

Immédiatement après sa confection, la pâte sera introduite dans une boîte métallique à fond plat, de forme tronconique, ayant $0^{m},08$ de diamètre à la base inférieure, $0^{m},09$ à la base supérieure et $0^{m},04$ de profondeur. On lissera la surface en faisant glisser la truelle sur le bord supérieur du moule et en évitant tout tassement et toute trépidation.

Aussitôt remplie, la boîte sera immergée dans un bac contenant de l'eau dont la température sera maintenue entre 15 et 18°. La boîte ne sera extraite du bac que pendant le temps nécessaire à chaque constatation.

On emploiera pour les essais une aiguille en métal, dite aiguille Vicat, cylindrique, lisse, propre, sèche, terminée par une section nette et d'équerre d'un millimètre carré (diamètre $1^{mm},13$) et pesant 300 grammes.

On appellera *début de la prise* l'instant où cette aiguille

descendue normalement à la surface de la pâte, avec précaution et sans qu'on lui laisse acquérir de vitesse, ne pourra plus pénétrer jusqu'au fond de la boîte.

On appellera fin de la prise, l'instant à partir duquel la surface de la pâte pourra supporter la même aiguille, sans qu'elle y pénètre d'une quantité appréciable.

Les durées correspondantes seront comptées à partir du moment où l'eau de gâchage aura été mise au contact du ciment.

Si le produit commence à prendre avant un délai de minutes et après un délai de minutes, ou s'il termine sa prise avant un délai de heures et après un délai de heures, la fourniture partielle d'où provient l'échantillon sera refusée.

Art. VI. *Essai de résistance à la rupture*. — Ces essais se feront par traction sur des briquettes de mortier normal; on fera usage d'éprouvettes en forme de 8, dites *briquettes normales*, ayant une section au milieu de 5^{cm^2}.

Les moules présentant en creux la forme des briquettes seront placés sur une plaque de marbre ou de métal poli après avoir été, ainsi que la plaque, bien nettoyés et frottés d'un linge gras.

On remplira d'une même gâchée six moules à la fois et quatre s'il s'agit de ciment à prise rapide, en mettant du premier coup dans chaque moule assez de matière pour qu'elle déborde. Le mortier sera damé dans le moule avec une spatule du poids de 250 grammes, d'abord à petits coups répétés sur le pourtour de la briquette, puis au centre. On frappera ensuite plus énergiquement en suivant toujours le même chemin et en continuant le damage jusqu'à ce que la masse commence à prendre un peu d'élasticité et que l'eau ressue à la surface. On enlèvera alors le trop-plein du moule avec une lame de couteau bien droite et on lissera la surface en promenant le couteau appuyé sur les bords du moule.

On procédera au démoulage en faisant glisser les moules sur la plaque, en les desserrant et en les éloignant des briquettes sans les soulever, au bout de 24 heures comptées à partir du commencement du gâchage et avant, s'il est nécessaire, au cas où la prise serait certainement terminée.

Dans tous les cas, pendant ce délai de vingt-quatre heures, les briquettes seront conservées sur leur plaque, dans une atmosphère saturée d'humidité, à l'abri des courants d'air et des rayons directs du soleil. A l'expiration de ce délai de 24 heures, les briquettes seront immergées dans l'eau douce et y seront conservées jusqu'au moment de la rupture.

L'appareil de rupture sera disposé de telle sorte que l'effort de traction exercé sur une briquette puisse être continu et croitre à raison de 5 kilogrammes par seconde.

La résistance par centimètre carré du mortier sableux normal, constatée au bout de 28 jours et calculée en prenant la moyenne des résultats fournis par la rupture de six briquettes, sera d'au moins kilogrammes. Toute fourniture partielle d'où proviendrait un échantillon ne satisfaisant pas à cette condition, serait refusée.

Essais d'identification.

Art. VII. *Essai de finesse.* — 1° Le ciment (ou la chaux) ne doit pas laisser sur un tamis de 900 mailles au centimètre carré avec fils de $0^{mm},15$ (maille de $0^{mm},18$ de largeur) un résidu supérieur à un minimum qui sera déterminé ultérieurement. Le tamis aura un diamètre de 300^{mm} et sera agité à la main.

Le tamisage sera effectué sur un échantillon de 100 grammes; il sera considéré comme terminé lorsqu'il passera moins de $0^{gr},1$ de matière sous l'action de 25 tours de bras.

Le résidu maximum obligatoire sera fixé de la manière

suivante : avant tout commencement de fourniture, on fera dans l'usine, sous les yeux de l'ingénieur ou de son délégué, par les moyens ordinaires de l'usine et dans les conditions usuelles, le traitement (mouture, extinction, blutage, silotage) d'un lot de roches bien cuites choisies par l'ingénieur au pied d'un four en vidange qu'il aura désigné. Le produit ainsi obtenu sera soumis au tamisage et le chiffre trouvé, augmenté d'un cinquième pour tolérance, donnera le résidu maximum obligatoire.

2° Le ciment (ou la chaux), ne doit pas, pour être gâché à consistance normale en se conformant aux prescriptions de l'article IV, exiger une quantité d'eau supérieure à un maximum qui sera déterminé en augmentant d'un dixième pour tolérance la quantité d'eau nécessaire pour gâcher l'échantillon type dont les conditions de prélèvement ont été définies ci-dessus.

Art. VIII. *Essai de déformation par les expansifs.* — Cet essai portera sur la pâte normale de ciment pur qui a été définie à l'article IV. Elle sera moulée en éprouvettes cylindriques de $0^{m},03$ de diamètre et $0^{m},03$ de hauteur, qui seront confectionnées dans des moules en métal de $0^{mm},5$ d'épaisseur. Ces moules seront fendus suivant une génératrice, et porteront soudées, de chaque côté de la fente, deux aiguilles de $0^{m},150$ de longueur. L'augmentation de l'écartement des extrémités de ces deux aiguilles donnera une mesure du gonflement.

Les moules aussitôt remplis seront immergés dans l'eau froide; une fois la prise terminée, et dans un délai qui n'excédera pas 24 heures au delà de cette prise, la température de l'eau sera élevée progressivement à 100 degrés, en un temps qui devra être compris entre un quart d'heure et une demi-heure. La température de 100 degrés sera maintenue pendant 6 heures consécutives, et on laissera ensuite refroidir pour faire les mesures finales.

L'augmentation de la distance entre les pointes des deux aiguilles ne devra pas dépasser un maximum obligatoire qui sera déterminé comme il va être dit. Toute fourniture partielle d'où proviendrait un échantillon ne satisfaisant pas à cette condition serait refusée.

Le maximum obligatoire sera déterminé au moyen d'un échantillon type prélevé dans les conditions prévues à l'article VII, en augmentant d'un cinquième pour tolérance l'écartement observé sur cet échantillon, sans que jamais cependant le maximum obligatoire puisse être fixé au-dessous de 2 millimètres.

Art. IX. *Essai de durcissement initial* (*). — Ces essais se feront par écrasement sur des briquettes de mortier normal tel qu'il a été défini à l'article IV (**). On fera usage de briquettes cylindriques dont le diamètre égal à la hauteur sera de 30 millimètres (***). Les moules, fendus suivant une génératrice, porteront soudés, de chaque côté de la fente, deux appendices disposés de façon à permettre l'entre-bâillement du moule par une pression des doigts et à assurer sa fermeture par l'introduction d'une cale.

Pour la confection et le démoulage des briquettes, on se conformera aux prescriptions indiquées à l'article VI.

L'appareil de rupture sera disposé, dans la mesure du

(*) Cet essai est destiné à remplacer ultérieurement l'essai de prise et l'essai de résistance à la rupture, conservés provisoirement jusqu'à ce que les conditions les plus favorables pour les essais de rupture par écrasement soient complètement définies.

(**) Il y aurait lieu d'essayer si, en conservant toujours constant le rapport du poids d'eau au poids de ciment, il ne serait pas préférable de faire varier la quantité de sable employé de façon à maintenir dans tous les essais la consistance du mortier identique.

(***) Il y aurait lieu d'essayer des dimensions et des formes différentes : des cubes, des prismes hexagonaux et particulièrement des prismes à base carrée de hauteur égale au double de leur largeur.

possible, de telle sorte que l'effort de compression exercé sur une briquette croisse d'une façon continue et avec une vitesse par seconde définie, comprise entre un dixième et un centième de l'effort de rupture (*).

Les ruptures seront faites aux âges suivants (**) : 1 heure, 6 heures, 48 heures, 7 jours et 28 jours, en supprimant les premiers essais dans le cas où l'on est assuré qu'ils ne peuvent rien donner en raison de la nature du produit, et les autres essais qui ne seront pas jugés utiles pour les travaux en vue.

Les résistances obtenues à chacune de ces dates devront être inférieures ou supérieures à une résistance calculée en modifiant d'un cinquième pour tolérance les résistances obtenues avec un échantillon type prélevé dans les conditions prévues à l'article VII.

Pour les ciments destinés aux travaux à la mer, cet essai sera complété par un second essai (***) semblable, dans lequel l'eau de mer sera substituée à l'eau douce. Pour ce second essai, les ruptures à 1 heure, 6 heures et 48 heures seront seules conservées.

Toute fourniture partielle d'où proviendrait un échantillon ne satisfaisant pas à ces conditions serait refusée.

(*) Il n'existe pas actuellement d'appareil de compression qui satisfasse complètement à cette condition de continuité. Pour les faibles résistances, on pourrait avec avantage employer la machine servant aux essais d'arrachement en remplaçant les griffes par un dispositif approprié.

(**) Il y aurait lieu de voir si l'essai à 28 jours ne devrait pas être complété, pour avoir une appréciation plus exacte du durcissement définitif, par un essai à 3 mois, ou par un essai à 28 jours sur la poussière fine, ou par un essai à 7 jours à l'eau bouillante.

(***) Il y aurait lieu de voir si, dans tous les cas, le double essai ne serait pas intéressant. Ce second essai pourrait être fait en employant soit l'eau de mer ou une solution de chlorure de calcium à 2 p. 100, soit en mêlant au ciment de la magnésie ou de la chaux hydratée.

APPENDICE I.

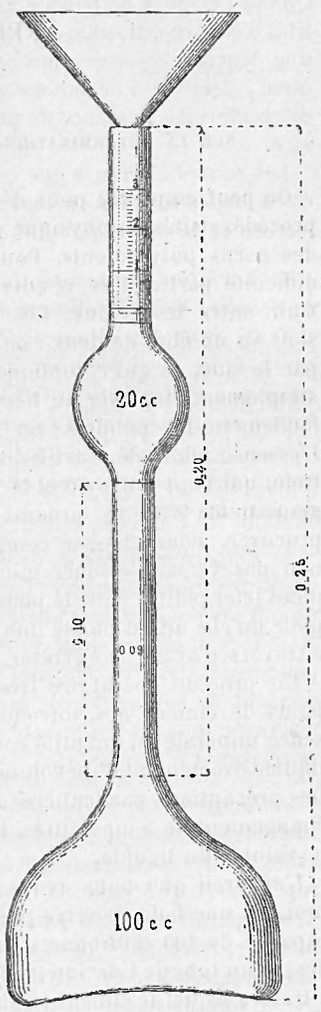
SUR LA DÉTERMINATION DE LA DENSITÉ DES CIMENTS.

On peut employer pour déterminer la densité des ciments les procédés usités en physique pour la détermination de la densité des corps pulvérulents. Pour de semblables corps, il y a une difficulté particulière résultant de l'emprisonnement de bulles d'air entre les grains. Les moyens de tourner cette difficulté sont au nombre de deux : on peut chasser l'air par l'ébullition, par le vide, ce qui complique et allonge les opérations, ou plus simplement employer au lieu d'eau un liquide qui mouille plus facilement les poudres; on se sert habituellement de benzine. L'essence minérale, c'est-à-dire la portion la plus volatile du pétrole, qui bout entre 80 et 90°, peut être employée aussi avantageusement; c'est un produit moins coûteux et plus facile à se procurer. Pour chasser complètement les bulles d'air, il faut non pas verser l'essence minérale sur la poudre, mais inversement jeter petit à petit la poudre dans le liquide en s'arrangeant pour qu'elle ait au moins une hauteur de liquide de 1 décimètre à traverser avant de s'arrêter au fond.

Un procédé opératoire très simple consiste à déterminer le poids de ciment qui, introduit dans un vase contenant de l'essence minérale en quantité convenable, fait élever le niveau du liquide exactement d'un volume donné, soit 20 centimètres cubes. Des précautions particulières doivent être prises pour éviter tout changement de température, toute évaporation qui ferait varier le volume du liquide.

L'appareil que nous avons établi dans ce but, M. Candlot et moi, est une fiole en verre présentant à la partie inférieure une capacité de 100 centimètres cubes où se réunira le ciment; au-dessus un tube de 1 décimètre de long et 1 centimètre de diamètre à travers lequel le ciment tombera en chute libre dans le liquide en abandonnant son air; puis un petit renflement de 20 centimètres cubes de capacité, exactement repéré avec deux traits; enfin un second tube de 5 centimètres de longueur et 1 centimètre de largeur gradué en dixièmes de centimètre cube. Un entonnoir à queue aussi large que possible est posé sur l'appareil

précédent et descend à 5 millimètres du trait supérieur. Il sert à introduire la poudre du ciment en l'empêchant de toucher les parois. Tout l'appareil est immergé dans un vase plein d'eau pour maintenir sa température invariable.



Pour faire une expérience, on introduit de l'essence jusqu'à ce que le ménisque affleure au trait inférieur à la boule; puis on introduit du ciment par l'entonnoir de façon à faire remonter le niveau du liquide à une division de la graduation supérieure. Le poids de ciment est déterminé soit par une pesée directe, soit par l'augmentation du poids de l'appareil.

Pour constater plus nettement le moment où le liquide affleure les traits de repère, il est utile de placer derrière le tube une feuille de papier blanc bien éclairée sur laquelle est tracée une bande noire horizontale. La ligne de démarcation est placée au niveau du ménisque. On arrive ainsi, suivant le soin que l'on apporte aux opérations, à obtenir une précision dans les mesures variant du 1/100 au 1/500. Il est bon, une fois l'opération terminée, de s'assurer qu'il n'est pas resté de bulles d'air emprisonnées dans le ciment; pour cela on incline l'appareil à 45° et on le fait tourner entre les doigts, les bulles d'air se dégagent et viennent se réunir au point le plus haut de la capacité inférieure, où l'on peut juger de leur importance et voir s'il y a lieu de recommencer l'opération.

Pour enlever le ciment de l'appareil, on le ferme avec le pouce et on le retourne dans un vase plus grand plein d'essence de pétrole; quelques secousses font tomber le ciment dans ce vase

et l'appareil est de nouveau rempli d'essence et prêt à servir. Quand l'essence de pétrole tient en dissolution de petites quantités d'eau, ce qui est le cas habituel, il peut se produire par places une légère agglomération du ciment. Pour éviter cet inconvénient, il est bon de laisser en permanence dans le réservoir où est renfermée l'essence de pétrole quelques fragments de chaux vive.

Les causes d'erreurs que comporte ce mode de détermination des densités sont les suivantes, en laissant de côté les erreurs de lecture et de pesée que tout observateur soigneux saura éviter.

1° *Variation de température du liquide qui en fait changer le volume.* — Pour obtenir des mesures suffisamment précises, il faut, pour les dimensions de l'appareil indiquées ci-dessus, qu'entre les deux lectures la variation de la température ne dépasse pas 1°. On obtient facilement cette constance de la température en immergeant l'appareil dans une grande terrine remplie d'eau, l'y laissant séjourner une dizaine de minutes avant de commencer les mesures, et n'en retirant la fiole que le temps de faire les lectures.

2° *Emprisonnement de bulles d'air.* — L'emploi de benzine ou d'essence minérale assure l'élimination complète des bulles d'air, quand les poudres sont absolument meubles et non agglomérées. Mais il peut en rester au centre des petites agglomérations qui se produisent dans les ciments éventés ou autrement. Il est donc prudent de soumettre au préalable le ciment à un tamisage et d'écraser tous les grumeaux qui restent sur le tamis afin de les faire passer à travers.

3° *Évaporation du liquide.* — C'est là la cause d'erreur la plus importante, surtout en été où la tension de vapeur de la benzine et de l'essence minérale est déjà considérable. Il faut faire aussi rapidement que possible l'introduction de la poudre de ciment. Cette opération est un peu délicate au début et à la fin du remplissage, parce qu'il tend à se faire des tampons de ciment dans les tubes étroits. On évite la formation du tampon au début en ayant soin de placer le trait inférieur immédiatement au voisinage de la petite boule de 20 centimètres cubes, à 3 millimètres au plus au-dessous de sa naissance par exemple; on évite la formation du tampon supérieur en employant un entonnoir dont la queue soit assez longue pour arriver jusqu'au sommet de la même boule et en le relevant peu à peu au moment où il va être

atteint par le liquide. Quand un semblable tampon s'est formé, il faut chercher à le détruire par agitation de la fiole, mais jamais en le poussant avec une baguette de verre qui, en se retirant, emporterait par capillarité une certaine quantité du liquide.

APPENDICE II.

SUR LE DOSAGE DE L'EAU ET DE L'ACIDE CARBONIQUE.

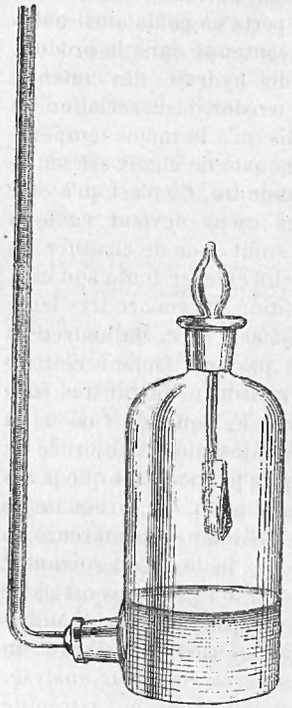
Il peut être intéressant, dans certains cas, de doser les petites quantités d'eau et d'acide carbonique que contiennent les poudres de ciments et chaux, dans le but de se faire une idée de leur degré d'éventement, des conditions de leur extinction ou de la proportion d'incuits qu'ils renferment. La détermination de la perte totale à la calcination qui confond l'eau et l'acide carbonique ne comporte aucune interprétation précise. Les méthodes d'analyse chimique employées habituellement pour doser l'eau et l'acide carbonique sont d'un usage très délicat quand on veut les appliquer à des teneurs aussi faibles que celles auxquelles on a affaire dans le cas considéré ici. On peut obtenir des résultats suffisamment précis par les deux méthodes suivantes dont l'emploi est très simple.

1° *Dosage de l'acide carbonique.* — Le procédé indiqué par M. de Mondésir pour le dosage du calcaire dans les terres peut, avec de légères modifications, être appliqué aux poudres de ciment. Le principe de cette méthode consiste à décomposer le carbonate par un acide et à mesurer l'accroissement de pression produit dans une capacité close.

Un vase en verre de 1/2 litre porte mastiqué sur une tubulure latérale inférieure un tube de 1 millimètre de diamètre intérieur, 500 millimètres de longueur, qui est divisé en millimètres et sera utilisé comme manomètre pour mesurer les variations de pression intérieure. Il est fermé par un bouchon à l'émeri portant un crochet en verre auquel on attachera, enveloppée dans un morceau de papier à cigarettes, la matière à analyser.

On introduit dans le flacon 100 centimètres cubes exactement mesurés d'une solution d'acide chlorhydrique à un équivalent

soit 36gr,5 par litre qui a été saturée de chlorure de sodium pour diminuer la solubilité de l'acide carbonique. Puis on immerge le flacon dans une grande masse d'eau où on le laisse 10 minutes pour établir l'équilibre de température. On agite alors vivement le flacon pour saturer le liquide acide d'air à sa température actuelle. On débouche ensuite le flacon en ayant soin de ne le toucher que par le col pour éviter de l'échauffer; on attache au crochet du bouchon la matière à analyser; on referme le bouchon et le flacon étant placé sur une table de niveau, on fait la lecture de la hauteur du liquide dans le tube manométrique. On agite alors vivement de façon à mouiller et déchirer le papier; on continue à agiter doucement jusqu'à ce que la matière paraisse complètement attaquée, ce qui, avec la finesse habituelle des poudres de ciment, demande au plus 5 minutes. On remet le flacon 10 minutes dans la masse d'eau pour rétablir l'équilibre de température initiale, puis on agite très vivement pour dégager du liquide une certaine quantité d'acide carbonique qui peut y rester en solution sursaturée. On fait alors la seconde lecture du niveau du liquide dans le tube manométrique.



Pour déduire de la variation de pression ainsi mesurée la quantité d'acide carbonique cherchée, il faut faire une expérience comparative avec un poids de 0gr,1 de carbonate de chaux pur et noter la variation de pression observée. Avec les dimensions d'appareil indiquées ci-dessus, l'élévation de la colonne de liquide salé est d'environ 0m,40.

Cette hauteur ne peut être mesurée qu'à 0m,02 près; il faut donc, pour répondre à 10 p. 100 près du dosage d'acide carbonique, opérer sur un poids de ciment qui donne une dénivellation d'au moins 0m,20.

2° *Dosage de l'eau.* — On peut, par une calcination modérée faite à une température rigoureusement définie, chasser toute l'eau d'une chaux ou d'un ciment sans enlever notablement d'acide carbonique de telle sorte que la perte de poids ainsi obtenue fasse connaître la quantité d'eau contenue dans le produit.

L'hydrate de chaux, le plus stable des hydrates des ciments, présente à la température de 450° une tension de dissociation ou d'efflorescence de 760 millimètres, tandis qu'à la même température la tension de dissociation du carbonate de chaux est seulement de 12 millimètres, soit 60 fois moindre. Ce n'est qu'à 812° que la tension de dissociation de ce corps devient égale à 760 millimètres, soit 1 atmosphère. Il suffit donc de chauffer un ciment très peu au-dessus de 450° pour lui enlever toute son eau, mais à cette température la décomposition est encore très lente et il est pratiquement préférable entre 500 et 550°. Malheureusement une semblable température n'est pas très facile à réaliser par des procédés simples. On peut au contraire obtenir très facilement une température de 600° qui est le point de fusion du mélange à poids égaux de chlorure de potassium et chlorure de sodium. C'est à l'emploi de cette dernière température que je me suis arrêté, bien que la tension de dissociation du carbonate de chaux y soit déjà un peu forte, soit 46 millimètres de mercure.

Pour faire ce dosage d'eau, on procède de la façon suivante: Un poids connu de chaux ou ciment de 2 à 5 grammes est placé dans un tube à essai de 15 millimètres de diamètre et 100 millimètres de longueur, bouché à l'extrémité inférieure et fait avec un verre peu fusible : verre de Bohême ou verre vert pour analyse. Un petit bouchon en verre soufflé non jointif ferme l'extrémité ouverte pour empêcher la rentrée trop facile de l'air plus ou moins chargé d'acide carbonique. Un certain nombre de tubes semblables sont placés debout dans un creuset en nickel de 70 millimètres de profondeur. On peut employer au lieu de nickel le platine, mais il a l'inconvénient d'avoir un prix beaucoup plus élevé, ou le fer, mais il a l'inconvénient de s'oxyder et de se percer beaucoup plus rapidement. Entre les tubes, on met le mélange de chlorures alcalins préalablement fondu et concassé; puis on chauffe sur un fort bec de gaz et on rajoute des chlorures au fur et à mesure de la fusion de façon à remplir le creuset. Aussitôt la fusion terminée et le creuset rempli, on peut admettre que toute l'eau a été chassée; on retire alors les tubes avec une pince en bois et on les met à refroidir. On les lave extérieurement pour enlever les chlorures alcalins adhérents et on détermine la perte de poids.

Voici quelques résultats d'expériences obtenus par ces deux méthodes :

	HO	CO^2	TOTAL	PERTE à la calcination
Ciment portland	2	1,1	3,1	3,7
Ciment de Vassy	4	4,4	8,4	8,8
Ciment de laitier	3,5	2,2	5,7	5,5
Chaux hydraulique	14,4	3,3	17,7	17,1

APPENDICE III.

SÉPARATION A L'IODURE DE MÉTHYLÈNE.

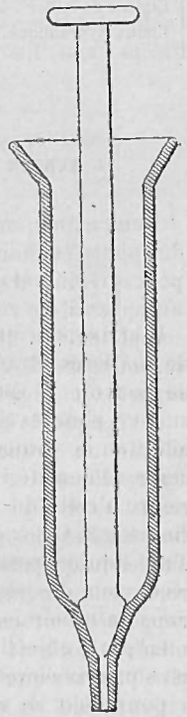
Il arrive souvent que les ciments sont falsifiés par l'addition de matières étrangères, dont il est utile pour le consommateur de pouvoir déceler la présence. Ces falsifications fréquentes, surtout pour les ciments portlands, consistent principalement en addition de laitiers de hauts-fourneaux et quelquefois de craie, corps de densité intermédiaire entre 2,8 et 2,9, c'est-à-dire inférieure à celle du ciment portland, laquelle est toujours supérieure à 3. Ces corps peuvent facilement être séparés au moyen d'un liquide pesant, l'iodure de méthylène CH^2I^2, qui a déjà reçu pour des séparations semblables de nombreuses applications en minéralogie.

La seule objection que l'on puisse faire à l'emploi de ce corps est son prix élevé. Le dispositif expérimental que je vais décrire a pour objet de réduire au minimum la dépense résultant des pertes inévitables de liquide.

La première opération est la préparation d'un liquide de densité convenable pour la séparation, 2,95 par exemple. Dans un semblable liquide, le ciment coulera au fond et le laitier viendra flotter à la surface. Pour préparer ce liquide, on ajoutera à l'iodure de méthylène de densité 3,1 une petite quantité de benzine, en s'arrêtant au moment où un cristal d'aragonite, de densité 2,94, remonte encore à la surface, mais le fait avec une

extrême lenteur et flotte sans dépasser aucunement la surface. Il est bon, pour atteindre facilement ce point précis, de ne pas chercher à mêler directement l'iodure de méthylène et la benzine, mais bien deux mélanges faits au préalable, l'un un peu plus léger, l'autre un peu plus lourd que la densité cherchée. On obtient ainsi une variation bien plus progressive et plus facile à régler.

L'appareil, pour employer ce liquide, consiste en un tube en verre de 10 millimètres de diamètre intérieur, 70 millimètres de hauteur, évasé en entonnoir à la partie supérieure, terminé à la partie inférieure par une pointe effilée avec un orifice de 1 millimètre seulement de diamètre. Cette pointe est fermée intérieurement, un peu au-dessus de son extrémité, par un petit bouchon à l'émeri, porte sur une longue tige en verre qui sort par la partie supérieure du tube. Pour faire une expérience, on mouille avec de l'eau le petit bouchon à l'émeri pour empêcher les fuites (la graisse serait dissoute par le liquide); on introduit 2 grammes de ciment, puis 5 centimètres cubes du liquide de densité 2,95. On agite vivement avec un petit fil de platine recourbé en crochet, de façon à chasser les bulles d'air et bien mettre en suspension le ciment dans le liquide. Enfin, on laisse reposer une heure environ. Au bout de ce temps, il s'est formé deux couches : celle du ciment dans le bas, celle du laitier dans le haut. En soulevant légèrement le bouchon à l'émeri par la tige qu'elle porte, on fait écouler le ciment avec une partie du liquide et on referme le bouchon. On reçoit le tout sur un petit filtre sans plis, qui retient le ciment et laisse couler le liquide dans un flacon où il sera repris pour une nouvelle opération. On reçoit ensuite sur un second filtre semblable le laitier resté dans le tube avec le reste du liquide. Enfin, on lave le tube et les filtres avec de la benzine et on fait sécher. On pèse à part le laitier et le ciment, dont on peut ensuite faire isolément l'analyse chimique si on le juge convenable.



En procédant ainsi, la perte du liquide est à chaque opération d'une fraction de centimètre cube, soit de moins de 3 grammes.

représentant ainsi une dépense maxima de 0^{l},50, qui peut être réduite considérablement avec un peu de soin.

Le liquide recueilli ne peut pas être utilisé pour une nouvelle opération, sans revérifier sa densité, parce que la benzine très volatile s'évapore pendant la filtration et que par cette concentration sa densité réaugmente.

APPENDICE IV.

SUR UN APPAREIL DE RUPTURE PAR ÉCRASEMENT.

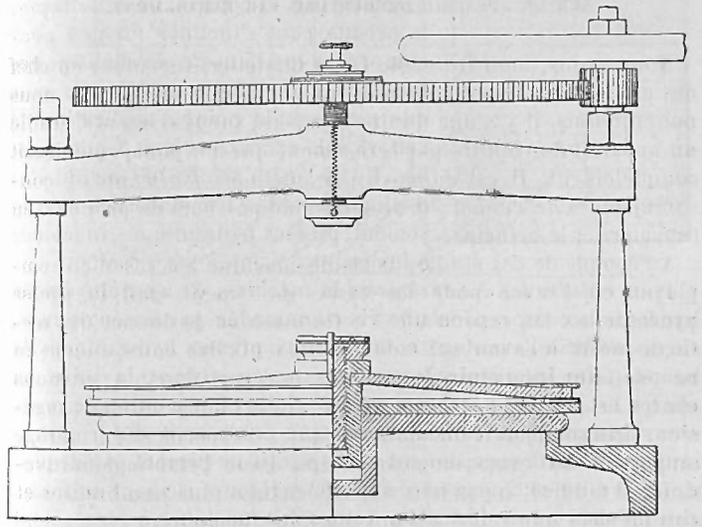
Nous avons, mon frère, M. L. Le Chatelier, ingénieur en chef des ponts et chaussées, et moi, au cours des études que nous poursuivions, il y a une dizaine d'années, sur les ciments, étudié un appareil de rupture par écrasement qui n'a jamais été décrit complètement. Il est employé par quelques fabricants et consommateurs de ciment; il ne sera donc pas hors de propos d'en rappeler ici le principe.

A l'époque de ces études, la seule machine à écrasement employée en France pour les essais de ciment était la presse hydraulique. On reprochait à cette machine de donner des mesures incertaines par suite des frottements des cuirs, même en bon état, sur les pistons et de l'inégale répartition des pressions sur les briquettes pressées. Ces craintes étaient peut-être exagérées; cela semblerait du moins résulter d'expériences de tarage rapportées au cours de ce mémoire. Pour l'établir définitivement, il faudrait cependant des expériences plus nombreuses et plus précises que celles qui ont été faites jusqu'ici.

Quoi qu'il en soit, l'objectif que nous avions en vue était la réalisation d'une machine exempte de frottements intérieurs et qui permît de bien centrer la pression exercée sur l'éprouvette. Accessoirement, nous cherchions à avoir une machine légère qui pût être installée sur une table, dans un bureau d'ingénieur ou dans un laboratoire de chimie; cela a nécessairement limité l'effort que l'on pouvait demander à la machine, il ne dépasse pas 5.000 kilogrammes. Enfin, nous avons cherché à avoir un appareil enregistreur qui permît de ne pas être à la merci de

l'attention ni de la conscience de l'observateur chargé des expériences.

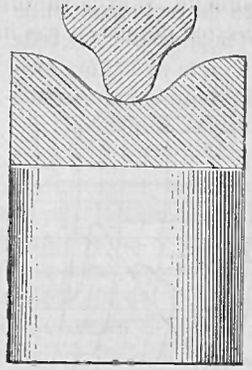
Voici comment on a cherché à satisfaire à ces différents desiderata. Pour *supprimer les frottements* dans l'organe des mesures des pressions, on s'est servi des plateaux à membranes de caoutchouc système Galy-Cazalat, qui ont depuis longtemps fait leurs preuves dans les machines à essayer les métaux. La briquette à écraser était placée sur un plateau semblable de 5 décimètres carrés de surface qui reposait sur une lame tendue de caoutchouc. Un guide intérieur assurait le déplacement du plateau parallèlement à lui-même. L'influence du frottement et de la tension du caoutchouc sont certainement négligeables, de telle sorte que l'on peut obtenir la mesure très exacte de l'effort produit en multipliant la pression observée du liquide emprisonné



par la surface du plateau. Ce système est excellent quand tout est en bon état; mais si la capacité close est insuffisamment remplie d'eau, ce qui peut résulter de fuites d'eau ou de réserves d'air emprisonné, le déplacement trop grand du plateau peut amener un coincement du caoutchouc et alors toutes les indications sont faussées. Cela s'est produit dans une des expériences de tarage rapportées plus haut. J'ai été conduit, pour éviter cet inconvénient, à remplacer la lame de caoutchouc par un tore en maillechort de 0^{mm},5 d'épaisseur (voir la figure ci-dessus).

On, a par surcroît, le grand avantage de supprimer complètement les fuites qui se produisent toujours à la longue avec les caoutchoucs. Le seul inconvénient de ce dispositif est de nécessiter un tarage direct de l'appareil, parce que le diamètre utile du plateau ne peut plus être déterminé *a priori*, pas plus que l'influence de la raideur du tore en maillechort. Un semblable tarage a été donné au cours du mémoire.

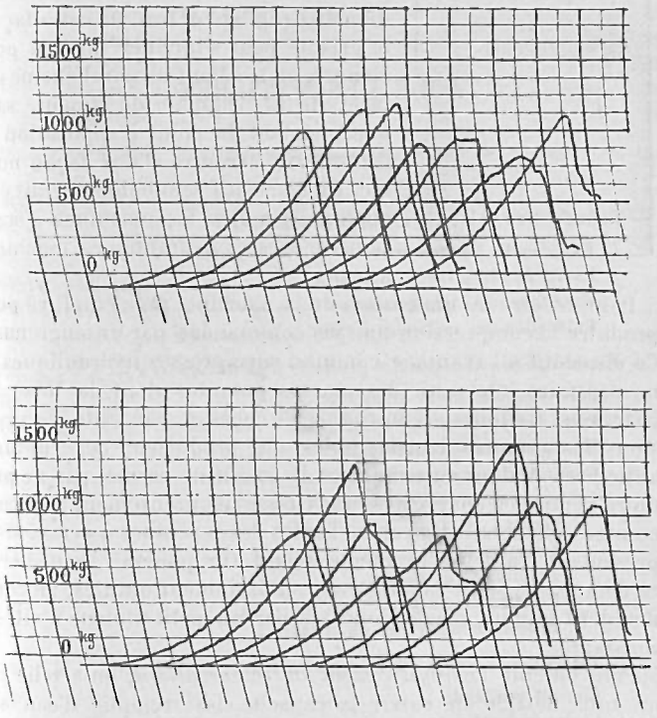
Pour *centrer la pression*, on l'exerce par l'intermédiaire d'un prisme d'acier de dimensions transversales identiques à celles de l'éprouvette, qui est attaquée en son centre par une pointe en un point aussi voisin que possible de la surface supérieure de la briquette, soit, par exemple, à une distance égale au tiers du diamètre (fig. ci-contre). De cette façon, le prisme peut s'incliner un peu pour compenser le défaut de parallélisme des faces de la briquette de ciment, sans que pourtant le point d'application de l'effort soit excentré d'une façon notable. Un dispositif semblable devrait être appliqué à toutes les machines d'écrasement, presses hydrauliques, machines à levier, etc.



Pour *réduire les dimensions* de la machine, on a employé pour produire la compression une vis commandée par un engrenage. Ce dispositif a l'avantage commun aux presses hydrauliques de ne pas faire intervenir des masses pesantes dont la mise en charge est toujours accompagnée de chocs et, par suite, de pressions instantanées considérables qui produisent des ruptures anticipées. Malheureusement ce dispositif ne permet pas de produire la mise en charge avec une vitesse rigoureusement uniforme comme cela serait désirable. Toutes les machines à écrasement présentent d'ailleurs le même défaut. On pourrait remédier à ce défaut, dans les laboratoires suffisamment outillés, en commandant le mouvement de la vis par un petit moteur à vitesse constante.

Pour obtenir l'*enregistrement des observations*, on a relié par un tube flexible en cuivre la capacité close remplie d'eau sur laquelle s'exerce la pression du plateau, à un manomètre enregistreur de Richard frères, gradué de 0 à 10 atmosphères ce qui, avec un plateau de 5 décimètres carrés, permet de mesu-

rer des efforts de 5.000 kilogrammes. On sait que dans les enregistreurs de ce genre, il est indispensable, pour annuler l'influence du frottement de la plume sur le papier, de donner à ce dernier un mouvement de translation perpendiculaire au sens des déplacements de l'aiguille. Ce mouvement est commandé par un fil enroulé dans la gorge d'une petite poulie fixée sur la vis de compression. Celle-ci tourne toujours d'une certaine quantité avant la rupture en raison des flexions du bâtis métallique de l'appareil. Pour une pression de 5.000 kilogrammes, la flexion est de près de 2 millimètres et correspond à un demi-tour de la vis. La compression élastique de la briquette avant la rupture est, à elle seule, tout à fait négligeable et ne donnerait pas un déplacement suffisant de la vis.



Les deux groupes de courbes ci-dessus sont la reproduction des enregistrements obtenus par l'appareil. Elles se rapportent à

deux échantillons de ciment portland moulés en briquettes de 20 millimètres de diamètre et de hauteur égale, âgés de 1 an. On voit immédiatement à l'inspection de ces courbes le faible degré de précision que comportent les essais de rupture.

Cet appareil se prête à des applications variées telles que les essais sur la flexion des métaux ainsi que toutes les expériences sous pression que l'on peut avoir à réaliser dans les laboratoires. Il nous a permis, à M. Mallard et moi, de produire, à la température ordinaire sous une pression de 5.000 atmosphères, la transformation dimorphique de l'iodure d'argent; il m'a servi également dans mes expériences sur la fusion du carbonate de chaux.

TABLE DES MATIÈRES

Pages.

I. — *Introduction*. 252
- Expériences de recherche. 253
- Essais de réception. 255
- Expériences d'identification 257
- Unification des méthodes d'essai. 259

II. — *Constitution chimique des produits hydrauliques*. 263
- Lois générales de la dissolution 263
- Prise des produits hydrauliques 267
- Mécanisme du durcissement 269
- Gonflement par extinction 269
- Composés chimiques des ciments. 270
  - Chaux 271
  - Silicates de chaux. 272
  - Aluminates de chaux. 274
  - Ferrites de chaux 274
  - Silicoaluminoferrites de chaux 275

III. — *Classification des produits hydrauliques* 275
- Ciments portlands. 276
- Chaux hydrauliques 278
- Ciments naturels 281
- Ciments mixtes. 283

Pages.

IV. — *Agents de désagrégation des produits hydrauliques* 284
- Eau douce. 286
- Air 287
- Eau de mer. 289
- Actions mécaniques 290

V. — *Méthodes d'essai*. 290
- Généralités. — Précision des méthodes d'essai. 290
- Fiuesse de mouture. 298
- Analyse chimique. 304
- Poids spécifique. 308
- Densité apparente. 310
- Homogénéité 314
- Rapidité de prise. 315
- Résistance à la rupture. 328
- Déformation. 367
- Porosité et perméabilité 384
- Décomposition à l'eau de mer 385
- Adhérence. 388

VI. — *Conclusions. Projet de rédaction d'un cahier des charges* . . . 389

NOTES ANNEXES.

Appareil pour la mesure des poids spécifiques 406
— pour le dosage de l'eau et de l'acide carbonique 409
— pour l'essai d'homogénéité. 412
— pour l'essai du rupture. 414

NOTE SUR LES RELATIONS

ENTRE LA PRESSION, LE VOLUME ET LA TEMPÉRATURE

DE

L'ACIDE CARBONIQUE

Par M. C. WALCKENAER, Ingénieur des mines.

§ 1. — ÉTATS PHYSIQUES ORDINAIRES DE L'ACIDE CARBONIQUE.

État gazeux. — La densité relative du gaz acide carbonique par rapport à l'air, à 0° et sous la pression de 760 millimètres, a été de la part de Regnault l'objet de cinq expériences (*). Le gaz, préparé en décomposant le marbre blanc par l'acide chlorhydrique, avait traversé un flacon laveur renfermant une dissolution de bicarbonate de soude, puis un long tube rempli de ponce sulfurique. Il était ensuite pesé dans un ballon jaugé. Les résultats ont été :

	Densité par rapport à l'air à 0° et 760mm.
Expérience I	1,52915
— II	00
— III	15
— IV	06
— V	15
Moyenne	1,52901

(*) Regnault, *Relation des expériences*, etc., t. I (*Mémoire sur la détermination de la densité des gaz*), p. 146.

A cette pression et à cette température, l'acide carbonique a pour indice de réfraction 1,000454, d'après M. Mascart (réfraction relative par rapport à l'air, 1,5527). Sa constante diélectrique dans les mêmes conditions, déduites par M. Klemencic (*) de l'étude de la capacité d'un condensateur à diélectrique gazeux, a été trouvée égale au carré de 1,000492; M. Boltzmann a trouvé de son côté le carré de 1,000473; ces valeurs cadrent à peu près avec la relation indiquée par Maxwell (**), que l'expérience paraît confirmer sensiblement pour les gaz (***).

État liquide. — C'est Faraday, en 1823, qui a obtenu pour la première fois l'acide carbonique à l'état liquide, en faisant réagir dans un tube fermé l'acide sulfurique sur le carbonate d'ammoniaque. Thilorier a inventé, pour produire ce liquide en vase clos par la réaction de l'acide sulfurique sur le bicarbonate de soude, un appareil classique, qui s'est d'ailleurs montré dangereux et est aujourd'hui délaissé.

Loir et Drion, en 1861, ont liquéfié l'acide carbonique sous la pression de l'atmosphère, en faisant passer un courant d'acide gazeux dans un tube en U plongeant dans de l'ammoniaque, et vaporisant celle-ci par l'action d'une machine pneumatique.

Actuellement, l'acide carbonique liquide est l'objet d'une fabrication industrielle qui occupe un certain nombre d'usines, dont la plus importante est à Berlin. En France, les producteurs sont : la Compagnie générale des

(*) Klemencic, Recherches expérimentales sur la nature de la constante diélectrique de certains gaz et vapeurs. *Journal de physique*, 2e série, t. V, p. 238.

(**) Maxwell, *Traité d'électricité et de magnétisme*, trad. Séligmann-Lui, t. II, p. 491.

(***) Poincaré, *Électricité et Optique*, I, p. 207.

produits antiseptiques, à Villers-Saint-Sépulcre (Oise), la « Carbonique française » à Paris, et la Société du gaz carbonique liquide, à Bordeaux (*).

États solides. — Thilorier a montré que dans le jet gazeux qui s'échappe lorsqu'on ouvre le robinet d'un récipient de ce liquide, la température s'abaisse au point de solidifier une partie de l'acide.

On a ainsi une neige blanche, qui se conserve à l'air relativement longtemps, et qui mélangée à l'éther sulfurique donne, ainsi que Faraday et Thilorier l'ont fait connaître, un mélange réfrigérant de grande puissance.

MM. Cailletet et Colardeau (**) ont étudié la température de cette neige et de ses mélanges avec divers liquides, au moyen d'une pince thermo-électrique graduée par comparaison directe avec un thermomètre à hydrogène. Ils ont trouvé qu'à la pression ordinaire, la température de la neige est d'environ — 60°. En maintenant, sur une grande masse de cette neige, un vide presque complet au moyen d'une machine pneumatique et de l'action absorbante de la potasse, on abaisse la température à — 76°.

Le mélange en pâte avec l'éther sulfurique aboutit à des températures plus basses : — 77° à la pression ordinaire, et dans le vide — 103° environ. Si l'on ajoute peu à peu de la neige carbonique à de l'éther, elle commence par s'y dissoudre, et la température la plus basse est obtenue à partir du moment de la saturation ; c'est donc au froid produit par la dissolution de l'acide carbonique dans l'éther, que MM. Cailletet et Colardeau

(*) Nous énumérons ces établissements par ordre d'ancienneté.

(**) Cailletet et Colardeau, *Étude des mélanges réfrigérants obtenus avec l'acide carbonique solide. Journal de physique*, 2e série, t. VII, 1888, p. 430.

attribuent les valeurs particulièrement basses de la température du mélange pâteux.

Avec les dissolvants ci-après, on obtient les froids suivants :

Chlorure de méthyle	— 82°
Acide sulfureux	— 82°
Sulfure de carbone	— 74°
Alcool absolu	— 72°
Liqueur des Hollandais	— 60°

En faisant le vide sur un mélange de neige carbonique et de chlorure de méthyle ou d'acide sulfureux, ou encore en mélangeant, à la pression ordinaire, la neige carbonique à du chloroforme, l'abaissement de température amène la congélation du dissolvant, et la masse se prend elle-même.

Cette neige n'est pas la seule forme de l'acide carbonique solide. Dans le tube en U de Loir et Drion, refroidi par une évaporation d'ammoniaque, une compression de 3 ou 4 atmosphères solidifie l'acide carbonique en une masse incolore et transparente, que la pression d'une baguette de verre divise en cristaux d'apparence cubique de 3 ou 4 millimètres de côté.

De même, si l'on plonge un tube à acide carbonique liquide dans le mélange de neige carbonique et d'éther, l'acide carbonique se prend en une masse vitreuse.

§ 2. — RECHERCHES EXPÉRIMENTALES ANTÉRIEURES A LA DÉCOUVERTE DU POINT CRITIQUE.

Tension de vapeur. — L'une des plus anciennes études quantitatives auxquelles ce corps ait donné lieu, a été celle de la tension de vapeur du liquide. Voici quelques-uns des résultats obtenus en 1845 par Faraday (*) :

(*) *Philos. transact.*, 1845. — Jamin, *Cours de physique*, t. II, ch. 11.

Températures.	Tensions de vapeur.
— 73°,3	1^{atm},8
— 56°,7	5 ,3
— 40°,0	11 ,1
— 28°,9	16 ,3
— 12°,2	26 ,8
— 1°,1	37 ,7

Thilorier, Mitchel, Nieman Davy, ont procédé à des évaluations de cette tension maxima à différentes températures; ils ont obtenu à peu près 37 atmosphères à 0°. Thilorier et Mitchel ont proposé 73 atmosphères pour tension à + 30°.

Pouillet et Regnault ont repris cette étude. Regnault a trouvé pour température d'ébullition sous la pression atmosphérique — 78°,2 (*). Il a déterminé les tensions de vapeur pour une série de températures depuis — 26° jusqu'à + 25° et au delà jusqu'à + 42°; mais au-dessus de + 25°, ses expériences ont comporté des anomalies qu'il ne s'est pas expliquées, ayant opéré dans un appareil en fonte qui ne lui a pas fourni l'occasion de découvrir le point critique (**).

Partant des valeurs ci-dessus trouvées pour les températures — 78°,16, 0° et + 30°, Andréeff avait proposé de représenter la tension de vapeur ϖ en fonction de la température t par la formule empirique :

$$(1) \qquad \frac{\varpi}{0,76} = 37,03 + 0,99362\,t + 0,0068114\,t^2,$$

qui ne fait que relier ces résultats et participe de leur caractère incomplet.

Dilatation du liquide. — Cependant une particularité

(*) *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXVI, p. 259.
(**) Regnault, *Relation des expériences*, etc., t. II (*Forces élastiques des vapeurs*), p. 618.

remarquable de l'acide carbonique liquide, sa puissante dilatation, avait été observée par Thilorier, qui avait signalé que ce liquide se dilatait plus par la chaleur que tout corps aériforme (*).

Dès 1823, Faraday avait commencé l'étude de la densité de ce liquide; il employait la méthode des flotteurs de verre ou boules de verre, empruntée par lui à Davis Gilbert; cette méthode n'était qu'approximative, et les résultats en étaient affectés par la dilatation des boules.

En 1859, Andréeff tenta la même étude en enfermant dans un tube divisé, jaugé et pesé, un certain poids d'acide carbonique, partie à l'état de liquide et partie à l'état de gaz. L'emplissage se faisait le tube étant plongé dans un mélange réfrigérant; quand il s'y était condensé une quantité convenable de liquide, le tube était fermé à la lampe. Ce tube était d'un diamètre au plus égal à 7 millimètres, d'une épaisseur au moins égale à 1^{mm},2, et Andréeff s'était assuré que dans ces conditions la dilatation du tube sous l'influence de la pression était minime. A diverses températures connues, il observait dans ce tube les volumes respectifs occupés par le liquide et par le gaz; il calculait alors le poids de la partie gazeuse d'après son volume, et concluait par différence le poids du liquide. Mais cette méthode était vicieuse, parce qu'il n'était pas légitime de calculer le poids G du gaz d'après son volume v. Andréeff faisait ce calcul par la formule

$$(2) \qquad G = \frac{v}{1+at}\,\frac{\varpi}{0,76}\,\frac{s}{773},$$

ϖ étant la tension de vapeur déduite de la formule (1), s le poids spécifique du gaz carbonique, pris égal à 1,5252 et α son coefficient de dilatation pris égal à 0,00369. Or

(*) *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XL.

cette formule supposait réalisées les lois de Mariotte et de Gay-Lussac, ce qui est loin de la vérité.

Compressibilité du gaz. — L'excès de la compressibilité du gaz acide carbonique par rapport à celle de l'air a été mise en évidence par Pouillet, au moyen de deux tubes manométriques jumeaux où les gaz à comparer étaient comprimés parallèlement par le mercure. Cet appareil, où la pression pouvait être élevée jusque vers une centaine d'atmosphères, permettait de comparer les compressibilités des différents gaz; mais il ne donnait directement la mesure d'aucune de ces compressibilités, et n'en fournissait de mesure indirecte que dans les limites des pressions pour lesquelles les expériences de Dulong et Arago, par exemple, faisaient connaître celle de l'air. Le tableau suivant reproduit quelques chiffres de la comparaison établie par Pouillet entre les compressibilités de l'acide carbonique et de l'air sous diverses pressions :

Pression en en atmosphères.	Rapport du volume de l'acide carbonique au volume de l'air.
1	1,000
4	1,000
5	0,989
10	0,965
20	0,919
33,3	0,808
40	0,739

Regnault, dans sa grande étude sur la compressibilité des fluides élastiques (*), a observé la compressibilité de l'acide carbonique aux pressions dont son appareil lui donnait la mesure directe, c'est-à-dire de 1 à 27 atmo-

(*) Regnault, *Relation des expériences*, etc., t. I (*Sur la loi de compressibilité des fluides élastiques*), p. 370, 388, 426.

sphères environ. Il a dressé, entre ces limites de pression et pour la température 0°, des tables donnant les valeurs du rapport $\frac{v_0 p_0}{v_1 p_1}$, lorsque $\frac{v_0}{v_1}$ est sensiblement égal à 2.

« Ce rapport augmente très rapidement avec la pression initiale p_0; représenté par 1,0076 quand la pression initiale est d'une atmosphère, il devient 1,0999 lorsque cette pression initiale est de $12^{mm},66$... Lorsque le volume 1 de gaz carbonique, ayant une force élastique de 6820 millimètres, se trouve réduit au volume $\frac{1}{3,5}$, sa force élastique devient 20284 millimètres, et le rapport $\frac{p_0 v_0}{p_1 v_1}$ prend une valeur de 1,772. »

Il trouve que ses déterminations sont sensiblement repérées par la formule empirique

$$\frac{v_0 p_0}{v_1 p_1} = 1 + A\left(\frac{p_1}{p_0} - 1\right) + B\left(\frac{p_1}{p_0} - 1\right)^2,$$

avec

$$\log A = \bar{3},9062318,$$
$$\log B = \bar{4},4279971.$$

Au cours de son étude sur la chaleur spécifique des fluides élastiques (*), Regnault a renouvelé, au moyen de dispositions expérimentales différentes, l'étude de la même compressibilité, toujours à 0°, entre 1 et 8 atmosphères. Il a trouvé ainsi :

p (en millim. de mercure.)	v	pv
774,03	1.914,90	148.219
1.642,45	895,26	147.042
2.846,85	511,16	145.519
4.175,64	344,54	143.867
5.449,66	260,88	142.171

En faisant un vide partiel dans l'un des ballons qui lui

(*) *Relation des expériences*, t. II, p. 229.

avaient servi à peser le gaz à 760 millimètres, ce ballon demeurant entouré de glace fondante, il a d'ailleurs trouvé que, même sous des pressions plus faibles que l'atmosphère, l'acide carbonique à 0° s'écarte de la loi de Mariotte d'une manière très marquée.

En ce qui touche maintenant l'action de la température, appliquant à l'étude de la dilatation du gaz acide carbonique, considéré sous des pressions peu différentes de la pression atmosphérique, les mêmes méthodes que pour l'air (méthodes II et IV, à volume constant, et méthode V, à pression constante), Regnault a trouvé pour valeurs de 100 α, dilatation de ce gaz entre zéro et 100° (*) :

	$100\,\alpha$
Sous volume constant (la pression étant inférieure à la pression atmosphérique à 0°, et sensiblement égale à celle-ci à 100°)	0,3688
Sous pression constante (sensiblement égale à la pression atmosphérique)	0,3710

Étudiant ensuite la variation de l'un et l'autre modes de dilatation avec la grandeur des pressions, il a obtenu les comparaisons suivantes :

1° *Dilatation sous volume constant.*

PRESSION à 0°	PRESSION à 100°	DENSITÉS RELATIVES du gaz à 0°	100 α
millim.	millim.		
758,47	1.034,54	1,0000	0,36856
901,09	1.230,37	1,1879	0,36943
1.742,73	2.387,72	2,2976	0,37523
3.589,07	4.759,03	4,7318	0,38598

Ces résultats peuvent être reliés par la formule empirique

$$\frac{\alpha}{\alpha_0} = 1 + A(p - 1),$$

(*) *Relation des expériences*, t. I (*Mémoire sur la dilatation des fluides élastiques*), p. 82.

avec

$$\alpha = 0{,}0037, \quad \log A = \overline{2},2222344.$$

2° *Dilatation sous pression constante.*

Sous la pression de	760 millim.	$100\,\alpha = 0{,}37099$
—	2.520	0,38455

Par une autre méthode d'expériences, en chauffant à 100° deux des ballons qui lui avaient servi à peser l'acide carbonique à 0°, et mesurant la perte de poids, il a trouvé pour valeur de la dilatation sous pression constante, à la pression atmosphérique,

$$100\,\alpha = 0{,}3719.$$

Les deux ballons ainsi expérimentés ont donnés l'un et l'autre le même résultat.

Maintenant, quand le gaz est ainsi amené à la température de 100°, s'écarte-t-il encore de la loi de Mariotte? Regnault chercha à s'en rendre compte en comparant les poids, sous la température constante de 100°, d'un ballon plein d'acide carbonique, à la pression de 760 millimètres d'abord et ensuite à celle de 338 millimètres; sa conclusion fut qu'à cette température, ce gaz n'offrait plus d'écart sensible par rapport à la loi de Mariotte. En réalité il n'en est pas tout à fait ainsi; M. Amagat a montré que la compressibilité de l'acide carbonique à 100°, pour les pressions considérées par Regnault, est encore un peu plus forte que la loi de Mariotte ne la donnerait, et M. Blaserna a fourni l'explication de cette différence de conclusions en découvrant cette circonstance surprenante, qu'une faute matérielle s'était glissée dans le calcul de Regnault.

De ces expériences et de l'ensemble des résultats acquis par Regnault sur la compressibilité de divers gaz, il semblait ressortir qu'un gaz s'écartait d'autant plus de la loi de Mariotte, par excès de compressibilité, qu'il

était plus rapproché de son point de liquéfaction; qu'en l'éloignant de ce point on pouvait, inversement, supprimer d'abord cet écart, puis ensuite arriver à un écart qui grandirait en sens inverse.

On voyait une confirmation de cette synthèse dans les propriétés de l'hydrogène, qui, fortement éloigné de son point de liquéfaction, à la température et sous les pressions ordinaires, diverge de la loi de Mariotte par défaut de compressibilité.

Ce système simple fut mis pour la première fois en échec par Natterer, qui comprima divers gaz jusqu'à des pressions considérables (2.790 atmosphères), et trouva que l'air et l'azote, arrivés aux pressions très élevées, non seulement ne prennent pas un excès de compressibilité de plus en plus grand par rapport à la loi de Mariotte, mais s'écartent au contraire de cette loi en sens inverse, et deviennent des fluides relativement peu compressibles.

Cette constatation était un acheminement vers la connaissance d'un lien continu entre l'état gazeux et l'état liquide. Mais la découverte de ce lien, connexe de l'observation du point critique et des propriétés de la matière au-dessus de ce point, était réservée à Andrews.

§ 3. — LE POINT CRITIQUE.

Anciennes observations. — Cagniard de Latour avait observé, dès 1822, qu'en chauffant suffisamment un tube contenant sous pression un liquide surmonté de sa vapeur, la coexistence de ces deux états distincts cessait à une certaine température. De légères variations de chaleur au voisinage de ce point faisaient reparaître ou disparaître la surface de séparation. Ces expériences avaient porté sur l'éther, l'alcool, le sulfure de carbone et l'eau. En 1859, Drion avait effectué sur l'éther chlorhydrique et l'acide sulfureux des observations analogues,

d'où l'on inférait qu'au-dessus d'une certaine température l'état liquide cessait d'exister et faisait place à une vaporisation totale.

Découverte d'Andrews. — Mais l'étude de l'acide carbonique, comprimé à volonté dans un tube manométrique sous des températures variables, fournit à Andrews le moyen de donner à ces notions une portée et un caractère tout nouveaux. En 1863, dans une lettre adressée au docteur Miller, Andrews (*) décrivait ainsi ses premières observations :

« En liquéfiant une partie de l'acide carbonique par la pression seule, et en élevant en même temps la température doucement jusqu'à 88° Fahrenheit, la surface de séparation entre le liquide et le gaz s'effaçait peu à peu, perdait sa courbure et enfin disparaissait. L'intérieur du tube se trouvait alors rempli par un fluide homogène, lequel, lorsque la température était brusquement diminuée ou que la pression s'abaissait un peu, présentait le phénomène de stries mouvantes ou ondoyantes qui traversaient toute la masse. A des températures au-dessus de 88° F., on n'a pu produire aucune liquéfaction apparente de l'acide carbonique, ou sa séparation en deux formes distinctes de la matière, même avec une pression de 200 à 300 atmosphères. »

Andrews étudia ces phénomènes et exécuta des expériences étendues sur la compressibilité de l'acide carbonique, au moyen d'un tube piézométrique en verre composé de trois parties, dont les deux premières avaient $1^{mm},25$ et $2^{mm},5$ de diamètre, et dont la troisième était capillaire. C'est dans cette dernière partie que devait se trouver localisé le gaz après sa compression. Le tube

(*) *Philosoph. transact.*, 1869. — *Ann. chim. et phys.*, 4e série, t. XXI, p. 208.

étant à l'origine ouvert aux deux bouts, on y faisait passer le gaz pur et sec pendant plusieurs heures, afin d'en chasser l'air le plus complètement possible. On fermait alors à la lampe l'extrémité capillaire, et l'on introduisait à l'autre extrémité un index de mercure pour servir d'indicateur. Quelles que fussent les précautions prises, Andrews n'a pu éviter d'avoir dans son tube un résidu d'air égal à 1/500 ou 1/1000 du volume d'acide carbonique.

Après une expérience spéciale destinée à déterminer en volume quel était le contenu du tube ramené à 0° et à 760 millimètres, ce piézomètre était monté côte à côte avec un tube manométrique à air sur un appareil de compression. La pression était obtenue en faisant pénétrer dans de l'eau une vis d'acier. Le piézomètre était entouré d'un manchon pour la circulation d'un bain d'eau réglant la température, de sorte que des observations ont pu être faites à diverses températures, variant de + 13° à + 48°C. Les hauteurs de ménisque mercuriel dans le piézomètre à acide carbonique et dans le manomètre à air étaient observées au cathétomètre à $0^{mm},05$ près. Les deux tubes capillaires avaient été jaugés avec soin; un millimètre de longueur correspondait en moyenne à une capacité de $0^{cc},00003376$ dans le tube à acide carbonique et de $0^{cc},00002477$ dans le tube à air.

Andrews n'a pas cherché à calculer les valeurs numériques des pressions d'après les changements de volume accusés par le manomètre, à cause des écarts de l'air par rapport à la loi de Mariotte et de la dilatation du verre par la pression; faute de données rigoureuses sur ces sujets, il a préféré donner des tableaux comparatifs indiquant, pour chaque observation :

1° La fraction du volume primitif à laquelle l'air est réduit;

2° La fraction analogue pour l'acide carbonique;

3° Les températures des deux fluides;

4° Comme nouvelle forme de l'indication (2°), le nombre de volumes que 17.000 volumes d'acide carbonique, pris à 0° et à 760 millimètres, occuperaient à la température et sous la pression de l'expérience.

Il a eu soin d'avertir que lorsqu'il énonçait des valeurs numériques de pression, calculées d'après ces données, ces valeurs étaient approximatives.

C'est ainsi qu'Andrews a dressé des tables de la compressibilité de l'acide carbonique à + 13°,1, + 21°,5, + 31°,1, + 35°,5, + 48°,1. Si l'on traduit ces tables par des courbes, en prenant pour cordonnées rectangulaires les pressions et les volumes, on obtient des isothermes telles que celles de la *fig.* 1, Pl. V. En réalité, la *fig.* 1 a été dressée, comme nous le verrons plus loin, d'après les déterminations faites ultérieurement par M. Amagat : les courbes d'Andrews étaient analogues. Pour une température inférieure à + 31° environ, pour celle de + 10° par exemple, la portion AB de l'isotherme correspond à la compression du gaz jusqu'à la tension maxima de vapeur correspondant à la température considérée; cette tension maxima est mesurée par la valeur de p correspondant au point B. Le v du même point est le volume occupé à l'état de vapeur saturée par la masse sur laquelle on opère, et permet par suite de calculer la densité de la vapeur saturée si l'on connaît la valeur numérique de cette masse.

A partir du point B, la réduction du volume sous température constante ne fait plus varier la pression, mais amène progressivement la liquéfaction du fluide. Le point figuratif se déplace donc suivant une droite parallèle à l'axe des volumes. En C, la liquéfaction est complète, et la valeur de v correspondante, donnant le volume du liquide sous la pression de vaporisation, permet, si l'on connaît la masse, de calculer la densité correspondante.

Quand le point figuratif est un point intermédiaire, tel

que X, les poids de vapeur et de liquide en présence sont entre eux dans le rapport des longueurs des segments de droite CX et XB; en effet, en appelant x et y ces poids, et écrivant que le volume total MX est égal à la somme des volumes de la vapeur et du liquide, on a :

$$\overline{MX} = \overline{MB}\,\frac{x}{x+y} + \overline{MC}\,\frac{y}{x+y},$$

d'où

$$\frac{x}{y} = \frac{\overline{MX} - \overline{MC}}{\overline{MB} - \overline{MX}} = \frac{\overline{CX}}{\overline{XB}}.$$

A partir de C, la courbe marche vers des pressions de plus en plus croissantes et exprime la compressibilité du liquide.

Le point B, dans les expériences d'Andrews, ne pouvait pratiquement être déterminé par l'observation directe, parce que la moindre quantité visible de liquide représentait une colonne de gaz de 2 ou 3 millimètres au moins de longueur; Andrews calculait ce point, en observant le volume du gaz à 0°,2 ou 0°,3 au-dessus du point de liquéfaction, et calculant la contraction que le gaz avait dû subir en se refroidissant jusqu'à la température considérée.

A mesure que les isothermes se rapportent à des températures plus élevées, la portion rectiligne BC diminue de longueur; la densité de la vapeur saturée et celle du liquide sous la pression de saturation se rapprochent l'une de l'autre, et cela de plus en plus rapidement. Il arrive une température, voisine de 31°, où elles se confondent : le point figuratif Z correspondant a reçu d'Andrews le nom de point critique. Au-dessus de cette température, le fluide passe de l'état gazeux à l'état liquide sans qu'il y ait à aucun moment apparition de ménisque ni séparation de la masse suivant deux états qu'il soit possible de distinguer.

Andrews évaluait à 30°,92 la température du point critique. « Bien que, pour quelques degrés au-dessus de cette température, écrivait-il, on puisse observer une (décroissance rapide du volume) sous l'influence d'un petit accroissement de pression, il ne se produit néanmoins aucune séparation de l'acide carbonique en deux états distincts de la matière; du moins, aucun indice d'une telle séparation ne se fait voir par l'action de la lumière, même quand le gaz se réduit au volume auquel on pouvait s'attendre qu'il se liquéfiât. Si l'on fait varier la pression ou la température, ayant toujours soin que celle-ci reste au-dessus de 30°,92, les grands changements de densité, près de ce point critique, produisent ces mouvements ondulatoires dont j'ai déjà parlé, et qui ressemblent beaucoup, mais sous une forme plus exagérée, à ce que l'on voit pendant le mélange de deux liquides de densités différentes, ou quand des colonnes d'air chauffé montent à travers des couches plus froides. »

Sur l'isotherme de + 48°,1, l'inflexion accusant le voisinage du point critique a déjà presque entièrement disparu, et la courbe se rapproche de l'allure régulière qui se rapporterait à la simple compression d'un gaz, ce gaz étant seulement plus compressible que ne le comporterait la loi de Mariotte.

Continuité entre l'état liquide et l'état gazeux. — Il résulte du dessin même des courbes qu'aux pressions qui excèdent la pression critique, estimée par Andrews de 75 à 77 atmosphères, il y a continuité, selon toute apparence, entre l'état liquide et l'état gazeux. Andrews, dans un passage qu'il est intéressant de citer encore, décrit ainsi cette continuité :

« Il m'est arrivé souvent de soumettre l'acide carbonique à des pressions beaucoup plus fortes... et je l'ai fait passer, sans brèche ni interruption, de ce qui est regardé par tout le monde comme l'état gazeux, à ce qui

est de même universellement considéré comme l'état liquide. Prenons, par exemple, un certain volume de gaz acide carbonique, à 50°C ou à une température plus élevée, et soumettons-le à une pression croissante, jusqu'à 150 atmosphères. Dans cette opération, le volume du gaz diminuera à mesure que la pression augmente, et il n'y aura nulle part diminution abrupte de volume, sans application d'une force à l'extérieur. Une fois la pression tout entière appliquée, faisons descendre la température jusqu'à ce que l'acide carbonique soit arrivé à la température ordinaire de l'atmosphère. Pendant toute cette opération, il n'y a point de brèche de continuité. On commence avez un gaz, et, par une série de changements graduels qui ne présentent nulle part, ni réduction abrupte de volume, ni évolution subite de chaleur, on termine avec un liquide. L'observation la plus exacte ne fait jamais découvrir le moindre indice d'un changement d'état dans l'acide carbonique, ni de la présence simultanée, à aucun période du procédé, de deux états physiques de la matière dans le tube... Pour plus de clarté, j'ai divisé ce procédé en deux phases, savoir : celle de la compression de l'acide carbonique et celle de son refroidissement; mais ces deux opérations auraient pu s'accomplir simultanément, pourvu que l'on prît soin de régler la pression et le refroidissement, de manière que la pression ne soit jamais au-dessous de 76 atmosphères, lorsque la température de l'acide carbonique est tombée jusqu'à 31°...

« Les états gazeux et liquide ordinaires ne sont au fond que des formes largement séparées d'une même condition de la matière, et on peut les faire passer de l'un à l'autre par une série de gradations tellement insensibles que le passage ne présentera nulle part ni lacune ni solution de continuité...

« Sous certaines conditions de température et de pression, l'acide carbonique se trouve, il est vrai, dans ce qu'on peut décrire comme un état d'instabilité; et il passe subitement, avec évolution de chaleur et sans application de pression additionnelle ou changement de température, au volume qu'il n'aurait pu atteindre, au moyen du procédé continu, que par un chemin long et détourné. Dans le changement abrupt qui se produit ici, on observe une différence bien marquée entre les caractères optiques et les autres propriétés physiques de l'acide carbonique qui s'est réduit en liquide et celles de l'acide carbonique non encore changé. Ici on peut distinguer sans difficulté le liquide du gaz; mais, dans d'autres cas, cette distinction ne peut plus se faire; en effet, sous la plupart des conditions que j'ai décrites, on essayerait en vain d'assigner à l'acide carbonique l'état liquide plutôt que l'état gazeux. »

Études récentes sur l'état de la matière au voisinage du point critique. — Malgré la large simplicité de ces vues, on s'est parfois demandé si c'est bien à une identité des deux états qu'on doit l'effacement du ménisque et la disparition de toute apparence d'hétérogénéité dans le tube à pression porté successivement à des températures croissantes, ou bien s'il n'intervient pas quelque effet soit de mélange, soit de dissolution, entre deux états physiques qui seraient cependant encore distincts.

Expériences de MM. Cailletet, Hautefeuille et Colardeau. — MM. Cailletet et Hautefeuille ont pensé pouvoir utiliser, pour étudier cette question, la propriété que possède l'iode de se dissoudre dans l'acide carbonique liquide en le colorant; perfectionnée par MM. Cailletet et Colardeau (*), l'expérience est la suivante. On dépose

(*) Cailletet et Colardeau, *Sur l'état de la matière au voisinage du point critique.* (*Ann. chim. et phys.*, 6e série, 1888, t. XV, p. 269.)

un peu d'iode par vaporisation à la partie supérieure du tube piézométrique; celui-ci reçoit ensuite de l'acide carbonique, et, pour éviter que, dans la suite de l'expérience, l'iode attaque le mercure, le piston mercuriel est recouvert d'une légère couche d'acide sulfurique. On presse, et, dès que la couche liquéfiée d'acide carbonique atteint l'iode, elle se colore.

Or, si l'on chauffe alors le tube au-dessus de 31°, le ménisque disparaît, mais la coloration persiste dans la région occupée primitivement par le liquide; cette coloration s'estompe sur quelques millimètres dans la région où se trouvait la surface de séparation, mais la région supérieure de la chambre reste incolore; l'iode solide déposé dans cette région ne se dissout pas, et, d'autre part, la région colorée accuse au spectroscope le spectre d'absorption de l'iode dissous dans un liquide et non celui de la vapeur d'iode.

MM. Cailletet et Colardeau en infèrent que l'état liquide persisterait encore « au-dessus du point critique ».

M. Cailletet avait observé, en 1880, que si, à la température ordinaire, on comprime, dans le tube à pression, un mélange de cinq parties d'acide carbonique et d'une partie d'air, on obtient d'abord une liquéfaction sous une pression moyenne; puis si l'on comprime davantage, la surface terminale du liquide passe par toutes les apparences que l'on observe au voisinage du point critique, et, entre 130 et 150 atmosphères, toute apparence de séparation a disparu.

Jamin avait proposé d'expliquer ce phénomène en disant qu'à partir du moment où la liquéfaction de l'acide carbonique est commencée, la pression individuelle de ce fluide n'augmente plus, mais celles de l'azote et de l'oxygène continuent d'augmenter, et avec elles la densité totale; qu'à un certain moment, cette densité est égale à celle du liquide qui flotterait alors dans la masse

gazeuse. De même, dans le cas d'un tube contenant de l'acide carbonique liquide et sa vapeur, à mesure que la température s'élève, la densité du liquide diminue, celle de la vapeur augmente et il arriverait un moment où le mélange serait simplement la conséquence de l'égalité des poids spécifiques.

L'explication, sous cette forme, est tout au moins incomplète, car, ainsi que l'ont rappelé MM. Duhem et Lippmann, il ne suffit pas que les densités de deux fluides soient les mêmes pour que la surface de séparation disparaisse : « En effet, enseigne M. Lippmann, deux fluides peuvent avoir même densité sans se mélanger et sans former un tout homogène. Par exemple, Plateau a composé des mélanges d'eau et d'alcool qui ont exactement la même densité que l'huile; une goutte d'huile reste en équilibre au milieu de ces mélanges sans s'y dissoudre. Si on agite, on obtiendra une émulsion et non un mélange transparent. Pour qu'on obtienne un mélange transparent, il faut que la constante capillaire de la surface de contact soit nulle, c'est-à-dire que cette surface n'ait plus de propriété capillaire. » C'est ce que M. Duhem exprime en disant qu'il faut que les attractions moléculaires des deux fluides soient les mêmes.

Comme Jamin l'avait remarqué lui-même, si c'est simplement un mélange qui produit la diffusion d'un fluide dans l'autre, on devrait, en continuant de presser et amenant ainsi un écart des densités en sens inverse, voir à nouveau le liquide se rassembler au sommet du tube.

Or, M. Cailletet a constaté que la vérification ne se fait point; le contenu du tube, une fois devenu d'aspect homogène, demeure tel sous tout accroissement de pression.

MM. Cailletet et Colardeau ont dès lors proposé de substituer à cette théorie du simple mélange celui d'une

dissolution. Ils ont rappelé que, d'après M. Duclaux, l'alcool amylique et l'alcool ordinaire convenablement dilués ne se mélangent pas à la température ordinaire; mais si l'on chauffe, on obtient les mêmes apparences que lors de l'effacement du ménisque dans un tube d'acide carbonique; les deux liquides ont acquis, par la chaleur, la propriété de se dissoudre l'un dans l'autre.

Ils proposent de considérer de même la température critique comme une température à partir de laquelle une vapeur et son liquide sont susceptibles de se dissoudre l'un dans l'autre en toutes proportions. Ils indiquent, comme observation à l'appui, que si, prenant le tube à dépôt d'iode déjà décrit, on le chauffe d'abord à + 40°, et si l'on y comprime ensuite l'acide carbonique à 80 ou 100 atmosphères, on obtient la coloration caractéristique et, au spectroscope, le spectre de l'iode dissous dans un liquide.

Dans cette théorie de la dissolution, il ne serait pas nécessaire que les densités fussent égales : l'agitation, ou une diffusion progressive, suffirait pour donner naissance au phénomène. En fait, MM. Cailletet et Colardeau signalent que la densité n'est pas la même pour l'alcool amylique et l'alcool ordinaire lorsqu'ils se dissolvent l'un dans l'autre ; et, pour le cas de l'acide carbonique liquide et de sa vapeur, ils ont proposé de conclure, de l'expérience suivante, qu'une différence de densité subsistait au point critique : dans un tube en O contenant à sa base une certaine quantité d'acide sulfurique, on comprime de l'acide carbonique de manière à avoir dans les deux branches des quantités inégales du liquide ; il en résulte que, par compensation, l'acide sulfurique s'élève à des niveaux différents dans les deux branches. Chauffe-t-on graduellement cet appareil, la dénivellation diminue, mais elle ne disparaît pas quand on arrive au point critique ; à plusieurs degrés au-dessus de ce point elle est encore

de 4 millimètres, et si l'on refroidit l'appareil, on fait reparaître plus de liquide carbonique dans celle des deux branches qui en contenait le plus primitivement.

Définition du point critique. — Pour mettre de la netteté dans la discussion de ces questions, il faut s'entendre sur la définition des expressions *état liquide*, *point critique*, et sur la pureté de l'acide carbonique soumis aux observations.

Ce qui est hors de doute, c'est d'abord qu'aux températures notablement inférieures à 31°, une masse d'acide carbonique soumise sous température constante à une pression croissante passe par une période où il y a coexistence et séparation nette de la matière en deux parties, qui présentent des densités inégales, qui demeurent séparées à la faveur de cette différence de densités, et que l'œil distingue, parce qu'à cette même différence correspond, suivant la loi de Lorentz, une différence dans les indices de réfraction. On est convenu d'appeler liquide la plus dense et la plus réfringente de ces deux parties, vapeur la partie la moins dense et la moins réfringente. Au cours de ce période, les densités de ces deux parties et leur pression commune demeurent constantes, n'étant des fonctions que de la température seule.

Pour modifier la proportion relative de ces deux parties, il faut appliquer ou retirer à chaque unité de masse transformée une quantité de chaleur L qui est liée à la différence des volumes spécifiques u et u' du liquide et de la vapeur par la formule de Clapeyron (*)

$$L = \frac{T}{E}(u' - u)\frac{dp}{dT}.$$

(*) Bertrand, *Thermodynamique*, § 80, p. 113. — Lippmann, *Cours de thermodynamique professé à la Sorbonne*, 1889, p. 154.

Or, les recherches expérimentales qui ont pour traduction les courbes d'Andrews, montrent que si l'on considère des isothermes de plus en plus élevées, u et u' diffèrent de moins en moins, et leur différence est de plus en plus décroissante. Nous verrons plus bas que les expériences relatives à la détermination directe de u et de u' confirment ce résultat, et montrent qu'en représentant graphiquement les valeurs de u et u' en fonction de T, on obtient deux courbes qui se rapprochent l'une de l'autre de plus en plus rapidement, de manière qu'elles tendent, à l'évidence, à se raccorder en une seule, sur l'ordonnée correspondant à une certaine abscisse T_1. En outre, d'autres expériences dont nous parlerons également, ayant pour objet la détermination directe de L, démontrent que si l'on représente graphiquement L en fonction de T, on obtient une courbe qui s'approche de l'axe des T de plus en plus rapidement, et tend à l'évidence à tomber perpendiculairement sur cet axe, pour une valeur de T qui, à cause de l'équation de Clapeyron, est nécessairement T_1.

Cela posé, c'est l'une des conditions équivalentes $u = u'$, $L = 0$, $T = T_1$, qu'il convient de prendre pour la définition même du point critique. C'est, en particulier, la condition $u = u'$ qui définissait ce point pour Andrews, et qui le définit en thermodynamique (*).

Seulement, si l'on entreprend d'observer le fluide au point critique dans le tube à pression ou dans un tube de Natterer (**), il est naturel qu'il intervienne aux environs de ce point des phénomènes tels, par exemple, que des effets de diffusion ou de dissolution entre fluides de densités légèrement inégales, ou des persistances de défauts d'homogénéité dans la masse, des retards à l'égalisation complète des densités ou au mélange des parties. Remarquons en effet d'abord, qu'il s'agit d'un état fugitif de la matière, pour lequel les variations de chaleurs spécifiques sont infiniment grandes par rapport aux variations soit de la température, soit de la pression. M. Lippmann enseigne que, lorsqu'on s'approche du point critique, la constante capillaire de la surface séparative du liquide et de la vapeur tend vers zéro plus rapidement que $u' - u$. M. Gouy, le plus récent observateur des phénomènes présentés par les tubes de Natterer, déclare qu'une variation de température de quelques millièmes de degré par heure « empêche absolument les observations ». En outre, il est pratiquement à peu près impossible de purger de toute trace d'air l'acide carbonique expérimenté : or, la présence d'air doit jouer un rôle important dans les anomalies apparentes qui ont été signalées, si l'on en juge par les propriétés des mélanges d'acide carbonique et d'un autre gaz.

(*) Lippmann, *Cours de thermodynamique professé à la Sorbonne*, p. 177.

(**) Tube scellé contenant de l'acide carbonique, partie en liquide et partie en vapeur.

Étude d'Andrews sur les mélanges de fluides. — Ces propriétés des mélanges de fluides différents, au sujet desquels nous avons déjà cité certaines observations de M. Cailletet, ont été l'objet d'un travail d'Andrews, publié en 1888 (*).

En comprimant, par exemple, un mélange de $6^{vol},2$ d'acide et 1 volume d'azote, à la température de $3°,5$, Andrews a vu apparaître du liquide sous $48^{atm},3$; par de nouvelles compressions le volume du liquide devenait plus important, avec cette particularité qu'après chaque accroissement de pression le liquide continuait pendant quelque temps à augmenter lentement. La pression ayant

(*) Andrews, *Sur les propriétés de la matière à l'état gazeux et à l'état liquide sous diverses conditions de température et de pression* (*Ann. chim. et phys.*, 6e sér., 1888, t. XIII, p. 411).

été poussée à 102 atmosphères, le volume de gaz qui était d'abord 1,7 a diminué graduellement jusqu'à un globule qui a fini par se résorber : « ce sont là les phénomènes ordinaires de la dissolution d'un gaz dans un liquide ».

Si maintenant on renouvelle l'essai à une température supérieure, les phénomènes sont tout différents : le liquide présente d'abord un ménisque concave ; ce ménisque monte, puis il se modifie ; la surface de séparation s'aplanit, puis disparaît ; la position que cette surface occupe dans le tube avant de disparaître dépend de la température de l'observation. Si, une fois la surface disparue, on diminue la pression, il apparaît une sorte de nuage occupant plusieurs millimètres dans le tube ; puis ce nuage s'affaisse, et l'on voit reparaître la surface de séparation au tiers environ (à partir du bas) de l'espace occupé précédemment par le nuage.

L'addition du gaz permanent à l'acide carbonique abaisse la température critique : pour un mélange de $3^{vol},43$ d'acide carbonique et 1 volume d'azote, les éléments du point critique sont 98 atmosphères et 14°. Andrews a observé, pour diverses températures, la pression à laquelle, en comprimant ce mélange, on voyait apparaître du liquide ; il augmentait ensuite la compression jusqu'à faire disparaître toute surface séparative, puis revenait en arrière jusqu'au moment où le ménisque reparaissait ; en résumé il déterminait les pressions minima et maxima entre lesquelles il y avait coexistence de liquide et de vapeur. On obtient ainsi deux séries de pressions qui vont se rapprochant l'une de l'autre et convergent au point critique, ainsi que le montre le tableau ci-après :

TEMPÉRATURE	LE LIQUIDE APPARAIT en comprimant à	IL DISPARAIT quand on augmente suffisamment la pression, et en décomprimant ensuite il reparait à
degrés	atmosphères	atmosphères
6,3	68,7	113,2
9,9	77,6	107,8
13,2	91,6	103,2
(14,0)	(98,0)	

Si l'on opère dans un tube en forme d'U renversé à deux branches inégales, en comprimant à une température inférieure au point critique, l'acide carbonique liquide s'accumule dans la branche basse, celui qui a commencé à se former dans l'autre disparaissant peu à peu. Si, ensuite, on décomprime de manière à ramener toute la masse à l'état gazeux, il se produit dans la branche basse une atmosphère riche en acide carbonique et ayant par conséquent une température critique plus élevée que le mélange homogène. On pourra donc, à ce moment, obtenir du liquide dans cette branche par une compression nouvelle à la température de 26° par exemple ; tandis que, si l'on attend, les gaz se diffusent, l'homogénéité se rétablit peu à peu, et au bout de quelques heures le point critique est revenu à 14°.

Ce phénomène de diffusion lente, qui jette une vive lumière sur certains des faits signalés, a encore un autre effet : il influe sur le volume de la masse. Lorsqu'on prend le mélange sous pression rendu par la diffusion complètement homogène, qu'on y liquéfie l'acide carbonique par un surcroît de compression à basse température, puis qu'on ramène tout à l'état gazeux en revenant aux conditions premières de température et de pression, on constate une contraction : la masse gazeuse, hétérogène à

ce moment, occupe un moindre volume que le volume primitif, comme le montre le tableau suivant :

CONDITIONS PRIMITIVES			VOLUME FINAL à la même température et à la même pression
Température	Pression	Volume	
degrés	atmosphères		
8,5	46,4	162,2	159,5
16,0	47,9	164,6	161,9
20,0	46,4	175,8	173,5

Mais si on laisse le temps agir, la diffusion s'opère et au bout d'une heure et demie le volume primitif est à peu près repris.

Ces curieuses études montrent tout ce que la présence d'un gaz étranger peut apporter de perturbation. Sans doute, dans les études relatives au point critique de l'acide carbonique, l'air n'existe qu'à l'état de traces. Cependant on a vu qu'Andrews n'avait pu éviter d'en avoir 1/500 ou 1/1000. M. Amagat, après avoir apporté les plus grands soins pour obtenir de l'acide carbonique aussi purgé d'air que possible, est arrivé à un résidu insoluble dans la potasse inférieur à un demi-millième (*); dans ses dernières recherches seulement (1892), il a pu abaisser le résidu au-dessous de 1/4000.

Observations de M. Amagat. — Il est intéressant de citer la description suivante, que donne M. Amagat des apparences fugitives qu'il a obtenues dans le tube à pression au voisinage du point critique (**) :

« Il peut arriver qu'en comprimant lentement, le ménisque disparaisse à une température notablement inférieure à celle du point critique, à 30°,5 par exemple ; tant que le ménisque existe, les génératrices intérieures

(*) *Comptes rendus*, t. CXIII, 12 octobre 1891.
(**) *Comptes rendus*, t. CXIV, 16 mai 1892.

du tube paraissent brisées à son niveau (le ménisque est, ici, plan) à cause de la différence des indices, de manière à produire l'apparence d'une diminution brusque de diamètre intérieur ; au moment où le ménisque s'efface, la brisure disparaît et est remplacée par deux courbes raccordant très régulièrement les deux parties de chaque génératrice ; la densité paraît alors passer par toutes les valeurs, depuis D (densité du liquide) jusqu'à D' (densité de la vapeur).

« Cette apparence est très fugitive ; une bande horizontale opaque ressemblant à une épaisse émulsion surgit tout à coup vers le milieu de la courbure, puis disparaît ; le ménisque reparaît alors, ainsi que la brisure des génératrices ; à ce moment, il arrive parfois qu'une pluie de fines gouttelettes sphériques extrêmement nettes se produise au sein de la vapeur et vienne frapper le ménisque qu'elle agite violemment. Dans certains cas, l'effet produit par ces gouttelettes rappelle tout à fait, sauf le sens, celui des bulles de vapeur au sein du liquide quand l'ébullition n'est point tumultueuse ; j'ai vu plusieurs fois les deux phénomènes se produire simultanément : l'effet de ces deux pluies allant à la rencontre l'une de l'autre est assez curieux. »

Nous devons à l'extrême obligeance de M. Amagat la communication de clichés qu'il a obtenus, en photographiant dans un jet de lumière électrique quelques-unes de ces apparences. Les figures de la Pl. II ont été obtenues par la phototypie au moyen de ces clichés. La photographie de la double pluie n'a pu être faite ; mais on voit les autres phénomènes décrits.

Les *fig.* 1, 2 et 3 donnent divers aspects de la zone de transition graduelle entre le liquide et la vapeur. *Fig.* 1, cette zone se montre nettement sous forme d'une bande estompée ; *fig.* 2, la bande est en partie effacée, mais on voit au niveau qui lui correspond une inflexion

apparente des génératrices du tube, résultant de la modification que subit l'indice de réfraction de la masse fluide. La *fig.* 3 pourrait sembler au premier abord la photographie d'un fluide homogène : l'examine-t-on, l'on voit à un certain niveau les génératrices du tube s'infléchir, plus doucement encore que dans la figure précédente, et accuser à elles seules le passage très progressif d'un liquide à une vapeur à peine différents l'un de l'autre.

La *fig.* 4 se distingue franchement de la série qui précède : elle donne la photographie d'une ébullition, pendant une détente de la masse. Les *fig.* 5 et 6 correspondent à des états plus tranquilles, mais différents l'un de l'autre : dans le premier, il y a presque identité entre le liquide et la vapeur, c'est l'analogue de la *fig.* 2 ou même de la *fig.* 3 ; dans l'autre, au contraire, la différence des densités est accentuée et s'accuse carrément, avec apparence de brisure des génératrices du tube. Ce dernier aspect est répété, plus nettement encore, par la *fig.* 7.

Quant aux *fig.* 8 à 12, elles fournissent des variantes des aspects précédents. Les *fig.* 8 à 10 correspondent à différents degrés d'ébullition par détente ; dans les *fig.* 11 et 12, on retrouve la zone de passage graduel, analogue à celle de la *fig.* 1.

Observations de M. Gouy. — M. Gouy a montré récemment (*) que, pour étudier chacun de ces phénomènes, il faut apporter des soins tout particuliers à obtenir une constance rigoureuse de la température. Les observations ne commencent à être satisfaisantes, dit-il, que lorsque les variations de température ne dépassent pas 1/10000 de degré par heure. Il a observé, en conséquence, des tubes de Natterer plongés dans un bain d'eau dont le

(*) *Comptes rendus*, t. CXVI, p. 1289 ; 5 juin 1893.

refroidissement, d'abord réduit au taux de 1/1000 de degré par minute au moyen d'une enveloppe calorifuge en duvet, était compensé périodiquement, à quelques secondes d'intervalle, par un courant électrique.

M. Gouy a reconnu que, pour un même tube de Natterer, les phénomènes, en général, ne dépendent pas seulement de la température actuelle, mais encore des conditions antérieures. Cependant si, dans un bain à température constante (inférieure au point critique), après avoir retourné un tube bout pour bout un grand nombre de fois, on le laisse en repos, l'épaisse émulsion qui s'était formée se sépare en liquide et vapeur, et il s'établit un niveau séparatif qui persiste ensuite et qui est indépendant des conditions antérieures. C'est ce que M. Gouy appelle l'*état final*.

Une fois cet état final réalisé, si l'on abaisse la température du bain sans agiter le tube, on voit se produire l'ébullition et la pluie simultanées, et le tube arrive à l'état final correspondant à la nouvelle température.

Mais si, au contraire, au lieu d'abaisser la température, on l'élève légèrement, il ne se produit tout d'abord rien d'appréciable, et ce n'est que petit à petit, par une transformation lente, que le contenu du tube marche vers l'état final correspondant à sa température nouvelle.

Si un tube ayant atteint l'état final à 20° est plongé dans un bain à une température voisine de 31°, le niveau qui existe au bout d'une heure ou deux diffère d'ordinaire de plusieurs centimètres de ce qu'il sera dans l'état final, et ce dernier n'est pas atteint au bout d'une semaine.

M. Gouy indique qu'il y a lieu d'examiner si ces différences entre l'état final et les états variables ne sont pas dus à la présence d'un peu d'air mélangé à l'acide carbonique.

Le même observateur a fait des remarques intéressantes sur les modifications que subit l'état final, lorsqu'on con-

sidère une série de températures croissantes. La surface séparative du liquide et de la vapeur est d'abord nettement réfléchissante. A une certaine température, la réflexion disparaît ; la surface devient de plus en plus diffuse, il se produit des effets de mirage qui accusent l'existence de la zone de transition graduelle entre les densités. Quand cette zone atteint 2 ou 3 millimètres de hauteur, elle devient peu accusée ; enfin, à partir d'une certaine température, le tube semble rempli d'un fluide homogène. Toute cette transformation de l'état final s'effectue dans un intervalle d'environ un millième de degré.

« Ce qui précède, dit M. Gouy, montre que, à la température où la surface cesse d'exister et un peu au-dessus, les deux portions du fluide ont des densités sensiblement différentes, ce qu'on doit, je pense, attribuer à l'action de la pesanteur ». Il ne faut pas oublier que les observations sont faites dans un tube immobile.

Mais ce n'est pas tout. Il est naturel, d'après ce qui a été dit sur les états variables, que si, au lieu de laisser pour chaque température l'état final se réaliser, on augmente d'une manière continue et relativement rapide la température d'un tube de Natterer, jusqu'à ce que la surface séparative du liquide et de la vapeur s'efface, la zone de transition graduelle entre densités, qui succède à la surface réfléchissante primitive, corresponde à des densités extrêmes plus écartées l'une de l'autre que lorsqu'on est dans un état final. C'est en effet ce que M. Gouy a inféré des apparences observées dans ce cas.

Il est inutile d'insister sur l'importance de ces constatations, au point de vue des perturbations qui affectent l'observation de la matière au voisinage du point critique.

§ 4. — NOUVELLES DÉTERMINATIONS EXPÉRIMENTALES DU RÉSEAU D'ISOTHERMES.

Insuffisance des anciennes déterminations. — Les courbes isothermes d'Andrews peuvent être considérées comme la représentation topographique d'une surface dont elles sont des courbes de niveau, et qui traduit la relation

$$f(p, v, T) = 0,$$

existant entre la pression, le volume et la température absolue de l'acide carbonique, aussi bien à l'état liquide qu'à l'état gazeux. La détermination expérimentale de cette surface était restée inachevée entre les mains d'Andrews, d'une part parce que ses expériences ne portaient que sur un champ limité, tant comme pressions que comme températures, d'autre part parce qu'il avait pu, comme autrefois Pouillet, établir une comparaison entre la compressibilité de l'acide carbonique et celle de l'air, mais non point préciser avec certitude, pour toute l'échelle de ses constatations, la valeur absolue de cette compressibilité.

Expériences de M. Amagat. — Des expériences nouvelles ont eu lieu depuis lors. M. F. Roth a publié par exemple, en 1880, un travail important sur la compressibilité de l'acide carbonique, étudiée jusqu'à 180° et 168 atmosphères au moyen d'un appareil qui est une modification de celui de Pouillet. Mais c'est principalement M. Amagat qui, par une longue et laborieuse série de recherches, a comblé les lacunes et donné à ce problème expérimental une solution remarquablement étendue.

Avant d'exposer la méthode la plus générale, au moyen de laquelle M. Amagat a pu pousser l'étude jusqu'à des

pressions de 1.000 atmosphères, disons quelques mots des procédés spéciaux par lesquels il a étudié la compressibilité de l'acide carbonique à basse pression, entre 1 et 8 atmosphères, et à des pressions inférieures à la pression atmosphérique.

Pressions de 1 à 8 atmosphères. — Pour les pressions peu supérieures à celle de l'atmosphère, la méthode générale ne s'appliquerait pas aux températures élevées parce que cette méthode place le fluide étudié au contact d'une colonne de mercure; or, dès que la température dépasse une faible valeur, la tension de la vapeur mercurielle prendrait dans la masse trop d'importance relative. On ne pourrait tenir compte de cette tension par le calcul, car ni la constance de la densité de vapeur du mercure du haut en bas de la chambre piézométrique, ni la loi du mélange des gaz et des vapeurs saturées, n'offriraient à cet effet une suffisante certitude. A 300°, la tension de vapeur du mercure est, d'après Regnault, 242 millimètres.

Il faut donc que le contact du mercure et du gaz ait lieu exclusivement dans une partie non échauffée de l'appareil.

On se propose, dans ces expériences, d'étudier, comme l'avait fait Regnault, le rapport

$$\frac{pv}{p'v'},$$

lorsque $\frac{v}{v'}$ est sensiblement égal à 2. La méthode consiste à introduire dans un cylindre en verre épais de volume V_0, le gaz sous une pression P_0 que l'on mesure; on met alors ce liquide en communication avec un second cylindre placé à côté du premier, dont le volume V_1 est sensiblement égal à V_0, et où l'on a fait le vide au moyen de la machine pneumatique et au besoin de la pompe

de Sprengel : soit ϖ la pression qui subsiste néanmoins dans le second cylindre au début de l'expérience; on mesure enfin la pression finale P_1 aux deux cylindres. Le rapport cherché est

$$\frac{(V_0+V_1)\left(P_1-\varpi\frac{V_1}{V_0+V_1}\right)}{P_0V_0}.$$

Les deux cylindres sont plongés dans un même bain à température constante; l'appareil a été minutieusement étudié en vue d'éliminer les causes d'erreur.

M. Amagat a trouvé ainsi :

TEMPÉRATURE	PRESSION INITIALE	$\frac{pv}{p'v'}$
degrés	0,74	1,0037
50	1,47	1,0075
	2,91	1,0143
	0,72	1,0027
100	1,43	1,0051
	2,82	1,0085
	0,71	1,0009
201	1,41	1,0025
	2,80	1,0041
	0,72	1,0003
300	1,43	1,0015
	2,87	1,0017

Pressions inférieures à 760 millimètres. — La compressibilité de l'acide carbonique aux pressions inférieures à la pression atmosphérique avait été étudiée, vers 1874-1876, par MM. Mendeleeff, Kirpitchoff et Emilian, et par M. Siljerström. M. Amagat fit à ce sujet une première étude en 1876, puis il a repris la question en 1883. Sa méthode est en principe la même que pour la recherche qui précède; mais l'appareil diffère, en raison de la nature différente des erreurs à éliminer. Les observations ont été faites à la température ambiante, entre 15 et 20°. Les capacités V_0 et V_1 sont constituées par deux boules de verre superposées, plongées dans un même bain à tem-

pérature constante; le gaz raréfié, d'abord contenu dans les deux boules, est ensuite réduit par l'ascension d'un piston mercuriel au volume de la boule supérieure seule. La grande difficulté réside dans la mesure exacte des pressions, à cause de leur faible valeur; M. Amagat a employé un baromètre différentiel de forme perfectionnée, et pris des précautions extrêmement minutieuses pour rendre l'appréciation des différences de hauteur du mercure aussi précises que possible.

Il a trouvé ainsi, le rapport $\frac{v'}{v}$ étant égal à 2,076 :

PRESSION INITIALE (en millimètres)	$\frac{pv}{p'v'}$
4,557	0,9972
5,725	1,0009
2,288	1,0046

Après discussion relative à l'approximation sur laquelle on peut compter, M. Amagat conclut que les écarts, positifs ou négatifs, de ces nombres par rapport à 1, sont de l'ordre de grandeur des erreurs dont il est impossible de répondre, et que, nonobstant les inductions proposées à ce sujet par M. Mendeleeff et M. Siljerström, il ne croit pas que l'on soit à même de dire si l'acide carbonique présente un écart quelconque par rapport à la loi de Mariotte sous ces très faibles pressions.

Pressions élevées; mesure des pressions. — Si maintenant, abordant la partie principale du problème, on se propose d'étudier la compressibilité de l'acide carbonique sous des pressions importantes, on rencontre dès l'abord la difficulté de la mesure exacte de ces pressions.

Cette difficulté ne peut être rigoureusement résolue, d'une manière directe, que par la construction d'un manomètre à air libre de hauteur appropriée.

Dulong et Arago, puis Regnault avaient ainsi envisagé la question, et c'est pourquoi ils avaient installé leurs manomètres à air libre, célèbres dans l'histoire de la physique. Des colonnes mercurielles beaucoup plus élevées ont été établies depuis lors, par M. Cailletet d'une part, et d'autre part par M. Amagat.

Les installations de M. Cailletet ont été placées au puits artésien de la Butte-aux-Cailles, où la pression atteinte a été de 240 atmosphères, et postérieurement à la tour Eiffel.

M. Amagat, après une première tentative au puits de la Béraudière, près Saint-Étienne, a installé, en 1878, deux grands manomètres à air libre, en tube d'acier, l'un à Lyon, entre le parc d'artillerie du quai Fulchiron et le fort Saint-Just (pression maximum, 108 atmosphères), l'autre au puits Verpilleux, près Saint-Étienne (pressions comprises entre 80 et 430 atmosphères). Il a établi aussi, pour les pressions comprises entre 26 et 80 atmosphères, un manomètre de même nature à la colonne des eaux de Lyon.

Le tube manométrique contenant la colonne de mercure se compose, dans les installations de M. Amagat, d'une suite de tronçons de tube d'acier, de 2 millimètres de diamètre intérieur et 5 millimètres de diamètre extérieur; la longueur de chaque tronçon est de 25 mètres au maximum. Chaque tronçon est raccordé au suivant par un joint fortement serré TT′ à rondelle de cuir (Pl. III, *fig.* 5 et 6); pour que la rondelle *c* soit comprimée entre des surfaces convenables et ne puisse en s'écrasant boucher le tube, les extrémités des deux tronçons successifs portent, vissées et brasées sur eux, des pièces terminales en fer qui s'emboîtent l'une dans l'autre, comme le fait voir le croquis *fig.* 6, et sont serrées l'une contre l'autre par un double écrou de bronze.

A la base de l'appareil (Pl. III, *fig.* 5), une pompe de

pression est disposée pour refouler le mercure à la fois dans le manomètre à air libre et dans une cavité d'où part un tube en cristal formant manomètre à air comprimé; la partie supérieure de ce tube contient le fluide en expérience, dont il s'agit de mesurer le volume à diverses pressions et à diverses températures.

Pour réaliser une pression donnée, on commence par défaire, dans le tube métallique du manomètre à air libre, le raccord situé immédiatement au-dessous de la cote à laquelle il s'agit d'amener le ménisque mercuriel, et à ce point l'on coiffe le tube d'un tube de cristal porté par un raccord métallique. Cela fait, il n'y a qu'à faire jouer la pompe de pression jusqu'à élever le ménisque à la hauteur correspondante; les dispositions sont d'ailleurs prises pour qu'on puisse ajouter ou retirer directement du mercure à ce tube de cristal, de manière à amener exactement le ménisque à la cote voulue. Celle-ci était donnée, au puits Verpilleux, par une marque faite sur un fil d'acier pendant dans le puits et tenu tendu par un poids constant.

Tel est le système qui a permis à M. Amagat de graduer expérimentalement le manomètre à azote jusqu'à 430 atmosphères.

Cela fait, le manomètre à azote lui a servi à étudier l'acide carbonique jusqu'à 400 atmosphères, depuis la température ambiante jusqu'à 100°. Il suffit de revenir au principe de l'appareil comparatif de Pouillet, c'est-à-dire d'installer côte à côte sur la pompe à mercure le manomètre à azote, et un tube analogue contenant l'acide carbonique. Ce second tube est entouré d'un manchon d'eau pour la production et la mesure des diverses températures.

Pour mesurer, maintenant, les pressions supérieures à 400 atmosphères, ce procédé ne suffit plus. M. Amagat a eu alors recours à une méthode indirecte de mesure,

consistant dans l'emploi d'un appareil d'équilibre hydrostatique à pistons différentiels, réduisant dans un rapport connu la pression à évaluer. C'est le principe du manomètre différentiel dit de Desgoffe; mais M. Amagat s'est préoccupé de perfectionner cet appareil en vue de la plus grande précision possible (Pl. III, *fig.* 4). Déjà M. Marcel Deprez avait amélioré le manomètre Desgoffe par l'emploi de pistons libres; M. Amagat a rendu ces pistons aussi libres et en même temps aussi étanches que possible, en faisant reposer le piston à grande face S sur une couche de liquide visqueux (huile de ricin), dont la hauteur peut être maintenue constante au moyen d'une pompe régulatrice, et en noyant la tête du petit piston *s*, préalablement huilé, dans une masse de matière d'une suffisante viscosité (mélasse). Le piston différentiel ainsi constitué peut recevoir des mouvements angulaires, en vue de vaincre les légers frottements du déplacement vertical, au moyen d'une tige mm' sur laquelle agit un levier à fourche que l'on voit sur le dessin d'ensemble de l'appareil figuré en H, Pl. IV, *fig.* 3.

En comparant des instruments de cette espèce entre eux et avec un manomètre à gaz, M. Amagat s'est assuré que la régularité de fonctionnement de ces réducteurs de pression ne laissait rien à désirer.

Une fois cette constatation faite, il lui était loisible de pousser les pressions jusqu'à des valeurs considérables, puisqu'il pouvait ramener la mesure des hautes pressions à celles de pressions accessibles aux méthodes de mesure précédentes. En fait, l'emploi du manomètre différentiel lui a permis de revenir à la lecture directe d'un manomètre à air libre M (Pl. IV, *fig.* 3); si donc la méthode a nécessairement l'inconvénient de réduire la pression que l'on se propose d'évaluer, la mesure de la pression réduite a lieu du moins dans d'aussi bonnes conditions que possible.

Disposition des appareils. — Maintenant, sous des pressions de plus de 400 atmosphères, les piézomètres contenant le fluide en expérience éclateraient s'ils n'étaient, comme dans les appareils du genre de celui de Pouillet, pressés que par l'intérieur; il est nécessaire de les plonger tout entiers dans le bain de mercure sous pression, et de renfermer ce bain dans une enveloppe d'une résistance considérable. Alors surgit une double difficulté : comment, à travers cette enveloppe, observer les volumes dans le piézomètre, et régler la température quand celle-ci doit être élevée?

M. Amagat, dans ses recherches sur l'acide carbonique, a profité pour résoudre ces difficultés de ce que le piézomètre se compose de deux parties : une partie d'un diamètre relativement important, nécessaire pour emmagasiner la masse gazeuse initiale, mais qui une fois la pression produite, est tout entière pleine de liquide et n'intéresse pas l'opération, et une tige mince, graduée et jaugée (*), le long de laquelle doivent se faire les observations et les mesures. Il a dès lors composé l'enveloppe résistante, destinée à contenir le bain mercuriel et le piézomètre, de deux parties inégales aussi comme diamètre (Pl. III, *fig.* 1); la partie inférieure AA, assez grosse pour contenir la partie large M du piézomètre, est un véritable canon fretté; la partie du haut, n'ayant besoin de présenter qu'un petit diamètre intérieur, est un cylindre à paroi relativement mince, qui peut dès lors être utilement entouré d'un manchon à circulation DD, producteur et régulateur des températures.

D'autre part, pour l'observation des volumes occupés

(*) Cette tige se composait en réalité d'une suite de petites ampoules séparées par des étranglements capillaires, et les divisions de la graduation étaient au droit de ces étranglements; de cette manière la longueur totale de la tige était diminuée sans nuire à la précision des lectures.

par le fluide dans la partie jaugée du piézomètre, ce cylindre porte, montée en croix sur lui, une sorte de lunette transversale LL, pourvue de regards de quartz RR de 2 centimètres d'épaisseur à ses extrémités (détail *fig.* 3). La lunette traverse le manchon à bain, et les observations se font à travers les regards, que des circulations d'eau en E, F empêchent de s'échauffer. Naturellement la lunette est fixe et ne peut se déplacer dans le sens vertical; mais alors c'est le piézomètre que l'on peut faire voyager à l'intérieur de l'appareil : à cet effet, il est attaché par le haut, en a, à une tige que l'on peut faire monter et descendre, à travers une boîte à cuirs g, en agissant sur une manivelle extérieure G placée à la partie supérieure de l'appareil (détail *fig.* 2).

Quant à la production même des pressions élevées, on la réalisait en refoulant du mercure à l'intérieur de cet appareil par deux moyens qui intervenaient successivement : d'abord, une pompe foulante B (Pl. IV, *fig.* 3) amenait la pression jusqu'à une valeur de quelques centaines d'atmosphères; puis, pour poursuivre, on faisait agir une presse à mercure très robuste A, ayant un corps de pompe de 16 millimètres de diamètre dans lequel un piston, poussant devant lui un cuir embouti, s'avançait sans tourner (de manière à ne pas déchirer son cuir), sous la poussée d'une vis de 2 millimètres de pas manœuvrée au moyen d'un manège à bras a.

La *fig.* 3, Pl. IV, exécutée d'après une photographie que M. Amagat a bien voulu nous communiquer, donne la représentation complète du montage des expériences.

Jusqu'à 100°, les températures ont été obtenues au moyen de bains d'eau; vers 140°, M. Amagat a employé le xylène et l'acétate d'éthyle, mais l'emploi de ces substances lui a donné des difficultés et un peu d'incertitude. Pour 200° environ, il a employé la vapeur de benzoate de méthyle; pour 260° environ, celle de benzoate d'amyle.

Les températures ont été mesurées avec des thermomètres soigneusement vérifiés.

Enfin la question de la dilatation des piézomètres, pressés soit par l'intérieur, soit de toutes parts, n'a pas été sans recevoir les soins de M. Amagat; il a procédé à une étude spéciale de ces dilatations, ainsi que de la compressibilité du mercure (*).

Telle est, dans ses traits essentiels, la méthode de M. Amagat, qui paraît avoir apporté les plus grands soins aux diverses précautions et corrections, sur lesquelles nous n'insisterons pas.

Résultats. — M. Amagat a donné, en 1891 (**), des tableaux numériques résumant le résultat de ses recherches depuis la pression de 30 jusqu'à celle de 1.000 atmosphères; les températures ont été élevées progressivement de 0° à 100°, puis des déterminations ont eu lieu à 137°, 198°, 258°.

Ces tableaux donnent, pour chaque pression et chaque température, la valeur du produit pv. Les pressions sont comptées en atmosphères; les volumes sont évalués en prenant pour unité le volume occupé à 0° et à une atmosphère par la masse d'acide carbonique expérimentée.

C'est au moyen de ces tableaux que nous avons dressé les diagrammes de la Pl. V, *fig.* 1 et 2; seulement ces diagrammes sont faits en prenant, à l'instar d'Andrews, p et v pour coordonnées de chaque isotherme. Pour avoir v, il a suffi de diviser chacune des valeurs de pv inscrites aux tableaux par la valeur de p correspondante.

Les deux diagrammes ne diffèrent d'ailleurs l'un de l'autre que par l'échelle des p, qui est dix fois plus grande

(*) E.-H. Amagat, *Recherches sur l'élasticité des solides et la compressibilité du mercure.* (*Ann. chim. et phys.*, 6e sér., t. XXII, janvier 1891.) Voir aussi 5e sér., t. XIX, 1880.

(**) *Comptes rendus*, t. CXIII, 12 octobre 1891. Les mêmes résultats ont été récemment publiés aux *Ann. de chim. et de phys.*

dans l'un que dans l'autre; la *fig.* 2 résume ainsi l'ensemble de la compressibilité jusqu'à 1.000 atmosphères, tandis que la *fig.* 1 donne avec plus de détails cette même compressibilité jusqu'à 100 atmosphères seulement. Elle permet notamment de mieux voir les parties rectilignes correspondant, au-dessous du point critique, aux périodes de liquéfaction.

La valeur constante de p pour chacune de ces parties rectilignes est la tension maxima de vapeur à la température correspondante. Les valeurs de v aux extrémités de cette partie rectiligne figurent les volumes qu'occuperait la masse considérée, sous cette tension, à l'état de liquide et à l'état de vapeur saturée : ce sont, à une constante près, les volumes spécifiques u et u'.

Détermination des densités de la vapeur saturée et de son liquide. — Mais ces volumes spécifiques, ou ce qui revient au même les densités de la vapeur saturée et de son liquide, demandent à être déterminés par des expériences spéciales; leurs valeurs ne résulteraient pas avec assez de précision du tracé général des courbes, qui comportent pour ces points une discontinuité.

L'étude de ces densités, tentée imparfaitement par Andréeff pour les raisons que l'on a vues, a été reprise par MM. Cailletet et Mathias (*). Ceux-ci mesurent d'abord isolément la densité de la vapeur saturée; cette densité connue, la densité du liquide s'en déduit au moyen d'une nouvelle expérience.

Pour déterminer, en premier lieu, la densité de la vapeur saturée, ils emploient un tube de verre épais gradué et jaugé, soudé à un réservoir cylindrique de 60 centimètres cubes, le tout pouvant résister à une pression de plusieurs centaines d'atmosphères. On fait plusieurs

(*) Cailletet et Mathias, *Recherches sur les densités des gaz liquéfiés et de leurs vapeurs saturées.* (*Journal de physique*, 2e s., t. V, 1886, p. 549.)

fois le vide dans l'appareil au moyen d'une pompe à mercure, en laissant chaque fois rentrer le gaz pur et sec à étudier. On mesure enfin la pression et la température du gaz, d'où l'on déduit la masse. On visse le réservoir sur l'éprouvette de la pompe à piston mercuriel de M. Cailletet ; le tube gradué est entouré d'un manchon en verre avec bain, en vue de régler et de mesurer la température. On presse graduellement jusqu'à obtenir dans le tube une petite quantité de gaz liquéfié. Après s'être assuré que la température est fixe, on diminue très lentement la pression jusqu'à disparition de la dernière goutte de liquide ; on note alors le volume et la température de la vapeur saturée, dont la masse est connue.

C'est ainsi que MM. Cailletet et Mathias ont fait, sur la vapeur saturée d'acide carbonique, neuf séries d'expériences au moyen de gaz préparé à diverses reprises. Ces séries s'étendent de la température — 30° à + 30°,2, et donnent un tableau de densités d'où nous extrayons les chiffres suivants, que l'on voudra bien rapprocher de ceux obtenus ultérieurement par M. Amagat et consignés un peu plus loin :

Températures.	Densités.	Températures.	Densités.
— 29°,8	0,0352	+ 11°,8	0,1451
— 27 ,9	0,0382	+ 13 ,6	0,1585
— 26 ,0	0,0414	+ 15 ,7	0,1712
— 24 ,5	0,0463	+ 17 ,3	0,1835
— 23 ,8	0,0475	+ 19 ,7	0,2014
— 21 ,8	0,0526	+ 21 ,3	0,2155
— 16 ,0	0,0596	+ 22 ,4	0,2288
— 12 ,0	0,0692	+ 23 ,7	0,2369
— 5 ,0	0,0850	+ 25 ,0	0,2543
— 1 ,4	0,0953	+ 26 ,1	0,2685
+ 0 ,5	0,0983	+ 27 ,0	0,2864
+ 2 ,2	0,1040	+ 28 ,1	0,3044
+ 6 ,7	0,1223	+ 28 ,9	0,3118
+ 8 ,2	0,1304	+ 30 ,2	0,3507
+ 10 ,1	0,1414		

Cette variation rentre à peu près dans la formule empirique

$$D = 0{,}5668 - 0{,}00426.\, t - 0{,}084\,\sqrt{31 - t}.$$

Cela fait, il est légitime de procéder à l'étude des densités du liquide en présence de sa vapeur. La méthode employée à cet effet par MM. Cailletet et Mathias, repose sur le principe des vases communiquants, qui a été appliqué à la mesure des densités des liquides ordinaires par M. L. Amat(*). Un tube de verre en forme d'O allongé (Pl. IV, *fig.* 2), présentant deux branches verticales de $0^{m},50$ de longueur et $1^{mm},5$ de diamètre intérieur, communique à sa partie supérieure, par l'intermédiaire d'un tube deux fois recourbé, avec un réservoir en verre de 600 centimètres cubes, que l'on adapte dans une grande éprouvette à mercure en acier et où l'on peut, au moyen d'une pompe à mercure, comprimer le gaz. Dans le bas du tube en O se trouve un peu de mercure s'élevant dans les deux branches verticales. Lorsqu'on comprime le gaz du réservoir au moyen de la pompe et qu'en même temps on refroidit une des branches du tube en O, il y distille du liquide qui comprime le mercure ; on condense aussi un peu de liquide dans la seconde branche, pour éliminer l'influence de la capillarité des ménisques existant de part et d'autre.

Alors si D′ est la densité cherchée du liquide, D la densité de vapeur saturée à $t°$, précédemment déterminée, Δ la densité du mercure, on a pour l'équilibre

$$(l + l')\,D' = lD + l'\Delta,$$

d'où D′.

On opère toujours sur la même masse de gaz, qu'on liquéfie autant de fois qu'on le veut.

Les expériences ainsi faites entre — 34° et + 22° par

(*) Amat, *Bulletin de la Soc. chim.*, nouv. sér., t. XLV, p. 482.

MM. Cailletet et Mathias, se résument dans le tableau suivant (à rapprocher du tableau de M. Amagat) :

— 34°,0	1,057	+ 1°,3	0,907
— 30 ,0	1,013	+ 3 ,4	0,870
— 25 ,0	1,016	+ 6 ,8	0,868
— 23 ,0	0,998	+ 11 ,0	0,840
— 14 ,5	0,985	+ 15 ,9	0,796
— 11 ,5	0,966	+ 16 ,5	0,788
— 8 ,2	0,955	+ 19 ,7	0,770
— 3 ,3	0,936	+ 20 ,9	0,755
— 1 ,6	0,940	+ 22 ,2	0,726

Ces résultats peuvent être approximativement reliés par la formule empirique

$$D' = 0{,}350 + 0{,}0035.\, t + 0{,}101\sqrt{31 - t}.$$

Si l'on trace un diagramme en prenant pour abscisses les températures et portant sur chaque ordonnée les deux valeurs de D et de D′, on obtient deux branches de courbes qui vont à la rencontre l'une de l'autre et paraissent tendre à se raccorder au point critique en une courbe parabolique unique avec tangente verticale. Ce résultat, annoncé par MM. Cailletet et Mathias, a été plus tard mis en question par les observations de MM. Cailletet et Colardeau, relatives à une inégalité de densités semblant subsister au point critique; mais, reprenant la détermination des densités D et D′ par une méthode nouvelle, M. Amagat a de nouveau confirmé l'induction première (*).

Dans cette nouvelle méthode, M. Amagat évite d'avoir à amener le fluide à l'état de vapeur saturée sans liquide, parce qu'il a remarqué qu'on observait difficilement l'instant exact de la disparition de la dernière trace de liquide ou de l'apparition de la première. D'ailleurs, il se peut que cet instant ne soit pas rigoureusement celui où la

(*) *Comptes rendus*, t. CXIV, 16 mai 1892.

vapeur a la densité correspondant à la tension maxima; car M. A. Perot (*) a fait remarquer que si l'on trace les isothermes de l'alcool, du chloroforme ou du sulfure de carbone d'après les expériences d'Herwig (**), la partie pseudo-hyperbolique correspondant à l'état de vapeur désaturée et la partie rectiligne correspondant à la période de liquéfaction ne se rencontrent pas à angle vif, mais se raccordent par un arrondi.

M. Amagat se place donc constamment en présence d'un excès de liquide. Il liquéfie d'abord une partie du gaz de manière que le volume du liquide soit, par exemple, le dixième de celui de la vapeur, et quand l'équilibre est établi, il lit les deux volumes; puis on pousse la liquéfaction de manière à tripler ou quadrupler la quantité du liquide, et l'on mesure de même les nouveaux volumes.

Si P est le poids de gaz sur lequel on opère, D et D′ les deux poids spécifiques, V et $V + \Delta V$, V′ et $V' - \Delta V'$ les volumes dans les deux états d'équilibre, on a :

$$P = VD + V'D', \quad \frac{\Delta V}{\Delta V'} = \frac{D'}{D},$$

d'où l'on déduit

D et D′.

M. Amagat a pu, dans ces expériences, poursuivre les mesures jusqu'à quelques dixièmes de degrés de la température critique; il devient alors incontestable que les deux lignes figuratives des densités du liquide et de la vapeur tendent à se raccorder exactement en une même courbe d'allure parabolique, comme l'avaient annoncé MM. Cailletet et Mathias (Pl. IV, *fig.* 1).

L'abscisse maxima α, déterminée par la tangente ver-

(*) A. Perot, *Sur la mesure du volume spécifique des vapeurs saturées et la détermination de l'équivalent mécanique de la chaleur.* (*Ann. chim. et phys.*, 6e série, t. XIII, 1888, p. 145.)

(**) Herwig, *Poggend. Ann.*, t. CXXXVII, 1869, p. 19.

ticale à la courbe de raccordement, donne la température critique. Si l'on a eu soin de mesurer en même temps la pression correspondant à chaque expérience, et de tracer sur le même diagramme la courbe de ces tensions maxima, l'intersection de la tangente ci-dessus avec cette courbe donne la pression critique.

C'est ainsi que M. Amagat a dressé un tableau des densités dans l'état de saturation et des tensions maxima, d'où nous extrayons les principales données suivantes :

TEMPÉRATURE	DENSITÉ du liquide	DENSITÉ de la vapeur	TENSIONS maxima
degrés			atmosph.
0	0,914	0,096	34,3
5	0,888	0,114	39,0
10	0,856	0,133	44,2
15	0,814	0,158	50,0
20	0,766	0,190	56,3
25	0,703	0,240	63,3
30	0,598	0,334	70,7
30,5	0,574	0,356	71,5
31,0	0,536	0,392	72,3
31,25	0,497	0,422	72,8
31,35	0,464	0,464	72,9

et qu'il a trouvé pour éléments du point critique :

$$t = 31°,35, \quad p = 72^{atm},9, \quad D = 0,464.$$

L'acide carbonique ainsi expérimenté n'a donné au traitement par la potasse qu'un résidu inférieur à 1/4000.

Écarts de la compressibilité par rapport à la loi de Mariotte. — Nous avons dit qu'au lieu de p et v, M. Amagat avait coutume de prendre p et pv pour coordonnées de ses isothermes. Cette forme est propre à bien faire juger des écarts de la compressibilité par rapport à la loi de Mariotte. Si cette loi s'appliquait, les isothermes ainsi construites seraient toutes des droites horizontales. Au lieu de cela, elles offrent l'allure que représentent (à deux échelles différentes pour la commodité des lectures) les diagrammes *fig.* 2 et 3, Pl. VI. On voit qu'à chaque

température, il existe une pression pour laquelle pv est minimum, ainsi que l'avait découvert Natterer, et pour laquelle le gaz suit accidentellement la loi de Mariotte. Ce minimum se présente, entre 0° et 190° environ, pour des pressions d'autant plus fortes que la température s'élève davantage; après quoi son lieu géométrique, figuré sur les diagrammes par une courbe ponctuée, rétrograde vers la gauche.

Pour les pressions plus considérables, c'est-à-dire à droite de ces ordonnées minimum, les isothermes (p, pv) prennent à peu près l'allure d'un faisceau de droites parallèles. S'il en était rigoureusement ainsi, le coefficient angulaire de ces droites donnerait le volume du fluide sous une pression infinie. Mais, dans les limites du champ des expériences, M. Amagat a reconnu que ces lignes ont en réalité une légère concavité vers le bas. Voici en effet un tableau relatif aux valeurs de $\frac{p'v' - pv}{p' - p}$, pour les isothermes de 0° et de 100° :

	A 0°.	A 100°.
De 200 à 400 atmosphères. . . .	1715	»
De 400 à 600 —	1607	1635
De 600 à 800 —	1542	1617
De 800 à 1.000 —	1490	1550

Applications du réseau. — On peut, au moyen du réseau ainsi dressé, résoudre tous les problèmes relatifs au volume et à la pression dont une masse d'acide carbonique est susceptible dans des circonstances données. Dans la dernière publication aux *Annales de Chimie et de Physique*, M. Amagat tire de ses diagrammes les valeurs des coefficients de dilatation sous pression constante $\left(\frac{1}{v}\frac{dv}{dt}\right)$, des coefficients de dilatation sous volume constant $\left(\frac{1}{p}\frac{dp}{dt}\right)$, des coefficients de pression $\left(\frac{dp}{dt}\right)$.

Renvoyant à ce mémoire pour ces intéressantes discussions, nous nous bornerons à donner, à titre d'application pratique, le diagramme représenté Pl. VI, *fig.* 1. Ce diagramme, que M. Amagat a bien voulu dresser en 1892 pour les besoins de la commission centrale des machines à vapeur, résout la question suivante :

On introduit dans un récipient de volume connu des poids donnés d'acide carbonique, quelle sera la pression aux diverses températures?

On a porté en abscisses les charges du récipient en poids par litre; les pressions, produites par ces charges aux différentes températures, sont portées en ordonnées. Au-dessous de 31°,35, les parties horizontales rectilignes des isothermes correspondent pour chaque température aux cas pour lesquels, le récipient n'étant pas rempli de liquide, la pression est constante et égale à la tension maxima de vapeur.

La courbe ABC est la courbe de liquéfaction; les abscisses D (0), D (10), D (20) ... de ses intersections avec les isothermes représentent, pour chaque température, le poids par litre qui remplirait le récipient de liquide sous la tension maxima; c'est le poids spécifique du liquide sous cette tension.

On voit que les pressions qui peuvent être atteintes dépendent essentiellement de la charge par litre.

§ 5. — CHALEUR DE VAPORISATION ; CHALEURS SPÉCIFIQUES DE LA VAPEUR SATURÉE ET DU LIQUIDE.

Chaleur de vaporisation. — Au-dessous de la température critique, le passage abrupt de l'état stable qui est la vapeur, à l'état stable qui est le liquide, s'accompagne, selon l'expression d'Andrews, d'une évolution brusque de chaleur.

L'analyse complète du phénomène comporte donc la

considération de la *chaleur de vaporisation* du liquide aux différentes températures.

Toutefois, en principe, ce n'est pas là une donnée physique nouvelle et indépendante de celles qui précèdent. La connaissance du réseau d'isothermes entraîne théoriquement celle de la chaleur de vaporisation, puisque l'on a (équation de Clapeyron)

$$L = \frac{T}{E}(u' - u)\frac{dp}{dt}. \qquad (1)$$

Au point de vue expérimental, la détermination directe de la chaleur de vaporisation de l'acide carbonique a été, en 1869, l'objet de recherches de Regnault (*), au moyen du calorimètre à eau. Sa méthode, comme l'ont indiqué depuis lors M. J. Chappuis et M. Mathias, avait l'inconvénient de donner, en même temps que le calorique dépensé pour la vaporisation du liquide, la chaleur absorbée par la détente du gaz, chaleur imparfaitement connue; elle comportait encore d'autres critiques, relatives notamment aux équilibres de température aux différents instants de l'expérience. Enfin, pour le calcul des résultats, Regnault ne connaissait qu'imparfaitement, d'après Thilorier, la densité de l'acide liquide, et ne connaissait pas la densité de la vapeur saturée.

Cette méthode a donné néanmoins, entre les mains de Regnault, des résultats assez bons ; car en comparant les nombres publiés par Regnault avec les résultats du calcul de la formule théorique, MM. Cailletet et Mathias ont établi la comparaison suivante. Le calcul de la formule théorique a été opéré en y faisant $E = 425$, prenant pour u et u' les valeurs résultant des courbes dressées par ces expérimentateurs eux-mêmes, et pour p la varia-

(*) *Annales de chimie et de physique*, 4e sér., t. XXIV, 1871, p. 375.

tion indiquée par les tables de tension maxima de Regnault.

Dans ces conditions, la formule (1) peut être remplacée sensiblement par la suivante :

$$(2) \qquad L^2 = 118{,}485(31 - t) - 0{,}4707(31 - t)^2,$$

et voici alors de quelle manière la comparaison s'établit soit avec les nombres mêmes publiés par Regnault, soit avec des nombres *corrigés*, établis par M. Mathias en substituant dans les calculs de Regnault les données actuelles relatives aux densités :

TEMPÉRATURES	VALEURS DE L D'APRÈS		
	LES EXPÉRIENCES DE REGNAULT		LA FORMULE (2)
	Nombres de Regnault	Nombres corrigés par M. Mathias	
degrés	calories	calories	calories
15,627	39,30	40,36	41,35
17,575	38,82	39,90	38,80
16,751	39,42	41,03	39,90

Expériences de M. Chappuis. — Reprenant l'expérimentation directe, M. J. Chappuis (*) a cherché, au moyen du calorimètre à glace de Bunsen, la valeur de la chaleur de vaporisation à 0° et sous la tension maxima correspondant à cette température, c'est-à-dire — 78^{atm},2. Six expériences lui ont donné des nombres variant de 56,02 à 56,55, avec la moyenne = 56,25.

La formule (2) donnerait 56,75.

Expériences de M. Mathias. — Enfin, M. Mathias a publié, en 1890 (**), une importante étude expérimentale sur la chaleur de vaporisation des gaz liquéfiés. Afin que la température à laquelle s'opère la vaporisation puisse

(*) *Annales de chimie et de physique*, 6e sér., t. XV, p. 498.
(**) *Annales de chimie et de physique*, 6e sér., t. XXI, p. 69.

être l'objet d'une définition précise, sa méthode, inspirée de celle de M. d'Arsonval, consiste « à compenser, à chaque instant, le refroidissement du calorimètre à eau provenant de la vaporisation du gaz liquéfié au moyen d'une source de chaleur connue ; il utilise la chaleur développée par la dilution dans l'eau du calorimètre d'un poids connu d'acide sulfurique concentré ».

Il commence donc par mesurer, au moyen d'expériences préparatoires, la chaleur de dilution de l'acide sulfurique employé. Ensuite, l'acide carbonique liquide étant renfermé dans un récipient de cuivre communiquant avec un serpentin de petit diamètre, cet ensemble (qui est doré extérieurement pour éviter l'attaque par l'acide) est plongé dans un calorimètre de Berthelot, et l'on fait écouler progressivement la vapeur, sous une dépression constante et très petite afin de réduire la détente au minimum, tandis qu'on entretient constante la température du calorimètre au moyen de l'acide sulfurique.

M. Mathias a obtenu par cette méthode :

Températures.	Chaleur latente de vaporisation.
Degrés.	Calories.
+ 6,65	50,76
6,95	51,36
7,25	50,26
8,35	49,33 (moyenne de 3 expériences)
12,35	44,97
13,69	42,02
16,85	39,92 (moyenne de 3 expériences)
22,04	31,80
26,23	27,50
28,13	19,35
29,85	14,40
30,59	7,26
30,82	3,72

Ces valeurs, constamment et de plus en plus décroissantes à mesure que la température s'élève, sont très sensible-

ment représentées par la formule

$$(3) \qquad L^2 = 117{,}303(31 - t) - 0{,}466(31 - t)^2,$$

qui diffère légèrement de la formule (2).

Si on les relie par une courbe, indépendamment de toute formule, on reconnaît que l'ordonnée de cette courbe tend à tomber sur l'axe des abscisses (températures), pour la température correspondant au point critique, avec une tangente verticale : on a donc pour le point critique

$$L = 0, \quad \frac{dL}{dT} = -\infty.$$

On déduit de là, d'après (1), $u = u'$, ce qui confirme l'identité des densités au point critique, déjà constatée au moyen de l'expérience directe par M. Amagat.

Il est vrai, comme l'a remarqué M. Mathias lui-même, que, dans les calculs des expériences qui conduisent à ces résultats, on a calculé le poids du liquide vaporisé en fonction du poids perdu par le calorimètre par la formule

$$\varpi = \varpi' \frac{D}{D - D'},$$

et par conséquent L par la formule

$$L = \frac{Q}{D} \frac{D - D'}{D}.$$

(Q, quantité de chaleur correspondant à la transformation), et que l'on a pris les valeurs de D et D′ dans des tables où D = D′ au point critique : mais, pour écarter cette objection, M. Mathias fait remarquer que les valeurs expérimentales de L tendent beaucoup plus rapidement vers zéro que D — D′.

La chaleur de vaporisation L est la somme de deux parties, l'une correspondant au travail extérieur de la dilatation, l'autre appelée chaleur de vaporisation interne. M. Gerrit Baker (*) a calculé la première, et en a déduit

(*) *Theorie der Vloeistoffen en Dampen*, 1888.

la seconde au moyen des valeurs de u, u', L, déterminées par les expériences précédentes. Il a formé alors, pour les différentes températures, le rapport de la chaleur de vaporisation interne ρ à la différence D — D′ des densités : ce rapport s'est montré à peu près constant, ainsi que l'indique le tableau qui suit :

t	$\frac{\rho}{D - D'} 10^{-1}$
— 25	0,064
— 20	61
— 15	60
— 10	61
— 5	62
0	61
+ 5	60
+ 10	59
+ 15	56
+ 20	55
+ 25	53

Chaleurs spécifiques de la vapeur saturée et du liquide. — La chaleur spécifique de l'acide carbonique liquide n'est pas connue avec précision. D'après Regnault (*), sa valeur ne doit pas être très éloignée de 0,3.

Ainsi que l'a fait remarquer M. Mathias (**), la même incertitude se reporte sur la chaleur spécifique de la vapeur saturée. Si, en effet, l'on appelle m et m' les chaleurs spécifiques du liquide et de la vapeur dans l'état de saturation, on a

$$m' = m + \frac{dL}{dt} - \frac{L}{T}.$$

Partant des valeurs de L données par la formule (3),

(*) *Annales de chimie et de physique*, 4e sér., t. XXIV, p. 401.

(**) *Annales de chimie et de physique*, 6e sér., t. XXI, 1890, p. 134.

M. Mathias a dressé, d'après cette égalité, un tableau des valeurs de $m' - m$. On trouve ainsi :

Températures.	$m' - m$.
Degrés.	Calories.
— 50	— 0,620
— 30	— 0,713
— 25	— 0,743
— 20	— 0,778
— 15	— 0,818
— 10	— 0,864
— 5	— 0,920
0	— 0,988
+ 5	— 1,078
+ 10	— 1,196
+ 15	— 1,366
+ 20	— 1,644
+ 25	— 2,219
+ 30	— 5,418
+ 31	$-\infty$

La chaleur spécifique m', fait observer M. Mathias, n'a pas de réalité physique ; sa variation importe donc peu au point de vue expérimental ; mais le signe de m' est intéressant, car il correspond à un phénomène de condensation ou de surchauffe de la vapeur saturée comprimée adiabatiquement.

D'après le tableau ci-dessus, m' serait constamment négatif et décroissant entre — 50 et + 31°.

§ 6. — L'ÉQUATION CARACTÉRISTIQUE.

Continuité idéale des isothermes. — James Thomson a fait remarquer, en 1871, que la discontinuité présentée au-dessous du point critique par les isothermes d'Andrews disparaîtrait si l'on remplaçait (Pl. V, *fig.* 1, isotherme de 20°) la droite bdc correspondant à la liquéfaction par une courbe telle que $b\beta d\gamma c$. Cette courbe représente

un mode de passage, de l'état b à l'état c, qui est irréalisable parce qu'il correspond à des états d'équilibre instable, mais qui est concevable théoriquement comme une série d'états intermédiaires entre l'état gazeux et l'état liquide.

Par rapport à la courbe ainsi rendue continue, quelle est la position de la droite bc correspondant à la transformation réelle ? Clausius considère le chemin courbe $b\beta\gamma c$ et le chemin rectiligne bc comme deux trajets correspondant l'un et l'autre à des transformations réversibles ; le cycle composé par l'ensemble de cette courbe et de cette droite étant dès lors réversible, on a le long de ce cycle

$$\int \frac{dQ}{T} = 0$$

qui se réduit ici à

$$\int dQ = 0.$$

Donc l'aire engendrée est nulle, et la droite bc est celle pour laquelle les deux aires $b\beta d$, $d\gamma c$ sont égales.

En substituant pour les périodes de liquéfaction les courbes théoriques $\beta\gamma$ aux horizontales réelles, on voit que le réseau des isothermes ne présente plus de discontinuité et figure, dans la méthode des plans cotés, une surface à courbures finies. On peut dès lors se proposer de trouver une *équation caractéristique*

$$f(p, v, T) = 0$$

qui remplace pour le fluide considéré l'équation théorique du gaz parfait

$$pv = RT.$$

Équation de Rankine. — Rankine avait proposé, à cet effet, une équation de la forme

$$pv = RT - \frac{c}{Tv}.$$

Équation de Hirn. — Des considérations relatives à la constitution des fluides ont conduit Hirn à chercher la solution dans l'équation

$$(p+\omega)(v-\alpha)=\mathrm{RT}.$$

α est, dans ce système, une constante représentant le volume du fluide sous une pression infinie : on pense que ce volume limite, appelé *covolume*, dépend de celui des atomes du corps; ω est une pression qu'on a appelée *pression interne*, et qu'on suppose correspondre à la somme des attractions mutuelles des molécules.

Équation de van der Waals. — Van der Waals, guidé par des considérations théoriques, a présumé que la quantité ω était de la forme $\frac{\mathrm{K}}{v^2}$, et il a proposé en conséquence

$$p=\frac{\mathrm{RT}}{v-\alpha}-\frac{\mathrm{K}}{v^2}.$$

En identifiant cette formule avec les résultats des expériences d'Andrews, van der Waals a trouvé

$$\begin{aligned}\mathrm{R}&=0{,}003686,\\ \alpha&=0{,}0023,\\ \mathrm{K}&=0{,}00874.\end{aligned}$$

La formule donne ainsi une approximation intéressante, toutefois elle laisse à désirer surtout pour les très petites valeurs de v; il semble que le terme ω doive, au lieu d'être indépendant de T, croître à mesure que T décroît.

Équations de Clausius et de M. Sarrau. — Clausius, en 1880 (*), a, en conséquence, proposé la forme

$$p=\frac{\mathrm{RT}}{v-\alpha}-\frac{c}{\mathrm{T}(v+\beta)^2}.$$

(*) Clausius, *Sur la compressibilité et la dilatation de l'acide carbonique.* (*Annalen der Physik und Chemie*, nouvelle série, t. IX, p. 337, 1880) Violle, *Journal de Physique*, 1re série, t. IX, p. 36.

L'identification avec les expériences d'Andrews lui donne

$$\begin{aligned}\mathrm{R}&=0{,}003688,\\ \alpha&=0{,}000843,\\ c&=2{,}0935,\\ \beta&=0{,}000977.\end{aligned}$$

A son tour, M. Sarrau, en 1882 (*), a identifié la formule de Clausius avec les expériences de M. Amagat, en l'appliquant à la compressibilité de différents gaz. Il a trouvé alors qu'on avait

$$\mathrm{R}=0{,}003663$$

pour tous les gaz; que α était à peu près constant aussi; que c'était surtout le paramètre c qui variait d'un gaz à l'autre, et caractérisait le plus puissamment les écarts de ce gaz par rapport à la loi de Mariotte.

Pour l'acide carbonique, cette identification donne

$$\begin{aligned}\alpha&=0{,}000866,\\ c&=2{,}092,\\ \beta&=0{,}000949.\end{aligned}$$

On voit que ces paramètres diffèrent un peu de ceux résultant de l'identification de la formule avec le réseau d'Andrews (**). L'accord de la formule avec l'expérience n'est encore qu'approximatif.

Ultérieurement, M. Sarrau (***) s'est proposé d'arriver à une approximation plus grande, en généralisant la forme de l'équation de Clausius. A cet effet, il pose

$$p=\frac{\mathrm{RT}}{v-\alpha}-\frac{0}{(v+\beta)^2},$$

(*) *Comptes rendus*, t. XCIV, p. 639, 818 et 845.

(**) Voyez Amagat, *Sur la relation* $\varphi(p,v,t)=0$, *relative au gaz.* (*Comptes rendus*, t. XCIV, p. 847, 1882.)

(***) *Comptes rendus*, t. CI, 1885, p. 941, 994 et 1145.

θ étant une fonction de la température qui décroît quand T croît.

A une température déterminée, T et θ sont des constantes, et en identifiant la formule avec une isotherme de M. Amagat, on détermine les valeurs numériques des paramètres et de la fonction θ. On fait ce travail pour un certain nombre d'isothermes, et l'on peut ainsi étudier la variation de θ en fonction de T. M. Sarrau a trouvé ainsi qu'entre 31°,5 et 100°, le premier réseau de l'acide carbonique publié en 1880 par M. Amagat est représenté avec une grande approximation par la formule

$$p = \frac{RT}{v-\alpha} - \frac{K\varepsilon^{-T}}{(v+\beta)^2},$$

dans laquelle

R = 0,003663 (valeur commune à tous les gaz),

et, pour l'acide carbonique,

$$\alpha = 0{,}000846,$$
$$k = 0{,}016253,$$
$$\varepsilon = 1{,}00276,$$
$$\beta = 0{,}001004.$$

Il résulte de l'allure des courbes et de la manière dont la droite de liquéfaction coupe l'isotherme théorique, que le point critique est défini par les équations

$$\frac{\partial p}{\partial v} = 0, \qquad \frac{\partial^2 p}{\partial v^2} = 0,$$

qui, jointes à l'équation caractéristique d'où elles dérivent, déterminent les valeurs de p_c, v_c, T_c. En appliquant ce procédé de calcul à la dernière équation ci-dessus, M. Sarrau a trouvé

$$t_c = 32°,7, \quad p = 75^{atm},64.$$

Ces valeurs sont un plus élevées que celles qui ont été, en dernier lieu, comme nous l'avons vu, déduites expérimentalement par M. Amagat de l'étude des densités (31°,35 et $72^{atm},9$); mais, outre que M. Sarrau n'était pas

fixé sur l'unité de volume adoptée dans les expériences de M. Amagat, ce dernier indique que l'acide carbonique ayant servi à ses plus récentes recherches a été beaucoup plus pur que celui sur lequel il avait opéré dans la détermination de son premier réseau d'isothermes.

Propriétés de l'équation de van der Waals; équation réduite. — Sous la forme préconisée par van der Waals, l'équation caractéristique contient seulement, avec les trois variables p, v, T, trois paramètres R, α, K : elle est de la forme

$$f(p, v, T, R, \alpha, K) = 0, \tag{1}$$

f étant une fonction purement numérique.

Si pareille fonction représentait réellement la relation entre la pression, le volume et la température des corps (les trois paramètres R, α, K étant seuls à changer pour passer d'un corps à un autre), il en résulterait entre les propriétés physiques de ces corps une relation remarquable qu'on a appelée le théorème des états correspondants.

Cette relation consisterait en ce que l'équation caractéristique deviendrait identiquement la même pour tous ces corps, pourvu que l'on prît, relativement à chacun d'eux, pour unités de pression, de volume et de température, la pression, le volume et la température absolue du point critique.

En effet, ce point est défini par les deux équations

$$\frac{\partial p}{\partial v} = 0, \qquad \frac{\partial^2 p}{\partial v^2} = 0,$$

qui, jointes à (1), permettent d'exprimer p_c, v_c et T_c en fonction de R, α et K. Réciproquement, l'on peut exprimer R, α et K en fonction de p_c, v_c et T_c ; si l'on porte ces valeurs dans l'équation (1), celle-ci prend la forme

$$\varphi(p, v, T, p_c, v_c, T_c) = 0, \tag{2}$$

φ étant une fonction purement numérique.

Or, comme l'a remarqué M. G. Meslin (*), la pression, le volume et la température ont pour mesures respectives trois grandeurs d'espèces indépendantes, et irréductibles entre elles. Si donc une équation telle que (2) est l'expression vraie d'une loi physique, il doit arriver que la fonction φ soit de degré zéro par rapport à chacune de ces trois grandeurs. Donc elle doit nécessairement être de la forme

$$\varphi\left(\frac{p}{p_c}, \frac{v}{v_c}, \frac{T}{T_c}\right) = 0, \tag{3}$$

équation *réduite* qui sera la même quelle que soit la nature du corps.

Au lieu de choisir l'état critique

$$\frac{\partial p}{\partial v} = 0, \qquad \frac{\partial^2 p}{\partial v^2} = 0$$

pour définir les *unités spécifiques* de pression, de volume et de température, on peut prendre tout autre état qui soit défini par une propriété géométrique de la surface caractéristique, s'exprimant au moyen de deux équations qui n'introduisent pas dans la question de paramètre physique nouveau.

L'équation de van der Waals admet comme *réduite*, par rapport aux grandeurs critiques :

$$\frac{p}{p_c} = \frac{8\,\frac{T}{T_c}}{3\,\frac{v}{v_c} - 1} - \frac{3}{\left(\frac{v}{v_c}\right)^2}. \tag{4}$$

Les valeurs de R, α et K en fonction de p_c, v_c, T_c sont :

$$R = \frac{8}{3}\frac{p_c v_c}{T_c}, \qquad \alpha = \frac{v_c}{3}, \qquad K = 3\,p_c\,v_c^2. \tag{5}$$

(*) G. Meslin, *Sur l'équation de van der Waals et la démonstration du théorème des états correspondants.* (*Comptes rendus*, t. CXVI, p. 135, 23 janvier 1893.)

Relation entre le coefficient critique et le pouvoir réfringent moléculaire des gaz. — Le rapport $\frac{T_c}{p_c}$ a reçu de M. Ph.-A. Guye (*) le nom de *coefficient critique*. Comme R a été trouvé à peu près constant et égal à $\frac{1}{273}$ pour tous les gaz, on a approximativement d'après (5)

$$\frac{T_c}{p_c} = \frac{8 \times 273}{3}\,v_c = 8 \times 273 \times \alpha. \tag{6}$$

α est le covolume. D'après M. O.-E. Meyer, on a

$$\alpha = 4\sqrt{2}\cdot\mu,$$

μ étant la fraction de l'unité de volume occupée, à la pression 1 et à la température 0°, par les molécules supposées sphériques (**). Mais, d'après Clausius

$$\chi = \frac{1+2\mu}{1-\mu}, \qquad \text{d'où} \qquad \mu = \frac{\chi - 1}{\chi + 2},$$

χ étant la constante diélectrique qui, ainsi que nous l'avons vu, est égale à n^2, n étant l'indice de réfraction rapporté à une radiation de longueur d'onde infinie. Donc

$$\alpha = 4\sqrt{2}\,\frac{n^2-1}{n^2+2}.$$

Or, on a par définition pour expression de la réfraction moléculaire MR

$$MR = M\,\frac{n^2-1}{n^2+2}\,\frac{1}{D},$$

M étant le poids moléculaire et $\frac{n^2-1}{n^2+2}\frac{1}{D}$ représentant

(*) Ph.-A. Guye. *Ann. chim. et phys.*, 6e série, t. XVIII, 1890; t. XXI, p. 212, et t. XXVI, p. 97, 1892.

(**) Van der Waals posait $\alpha = 4\mu$; mais M. Heilborn, pour diverses raisons théoriques, préfère le rapport $4\sqrt{2}$.

Voy. au sujet de ces questions, Heilborn, *Ann. chim. et phys.*, 6e série, t. XXVII, p. 352, 1892.

la réfraction spécifique (ou constante de réfraction de Lorentz, que les expériences de M. Bleekrode ont trouvée égale à 0,147 pour l'acide carbonique gazeux et à 0,145 pour le liquide).

Il vient donc

$$MR = \frac{M}{D}\frac{\alpha}{4\sqrt{2}}.$$

Mais on a sensiblement, pour tous les gaz

$$\frac{M}{D} = 28{,}87 \times 773.$$

On tire de là

$$MR = \frac{28{,}87 \times 773}{4\sqrt{2}}\,\alpha$$

et par suite, d'après (6)

$$MR = 1{,}8\,\frac{T_c}{p_c}. \qquad (7)$$

Ainsi le covolume α et le coefficient critique $\frac{T_c}{p_c}$ seraient l'un et l'autre sensiblement proportionnels à la réfraction moléculaire MR.

La formule (7) concorde d'une façon complète, pour l'acide carbonique, avec les dernières déterminations de M. Amagat relatives aux coordonnées du point critique. En effet, ces déterminations donnent

$$T_c = 273 + 31{,}35, \quad p_c = 72{,}9,$$

d'où

$$1{,}8\,\frac{T_c}{p_c} = 6{,}77.$$

Or, ainsi que l'a indiqué M. Guye, le pouvoir réfringent moléculaire MR, rapporté à la raie D, est égal, d'après les calculs de M. Brühl, à 6,74.

TABLE DES MATIÈRES

Pages

§ 1. — *États physiques ordinaires de l'acide carbonique.*

État gazeux. — État liquide. — États solides 420

§ 2. — *Recherches expérimentales antérieures à la découverte du point critique.*

Tension de vapeur. — Dilatation du liquide. — Compressibilité du gaz 423

§ 3. — *Le point critique.*

Anciennes observations. — Découverte d'Andrews. — Continuité entre l'état liquide et l'état gazeux. — Études récentes sur la matière au voisinage du point critique. — Expériences de MM. Cailletet, Hautefeuille et Colardeau. — Définition du point critique. — Étude d'Andrews sur les mélanges de fluides. — Observations de M. Amagat. — Observations de M. Gouy. 430

§ 4. — *Nouvelles déterminations expérimentales du réseau d'isothermes.*

Insuffisance des anciennes déterminations. — Expériences de M. Amagat. — Pressions de 1 à 8 atmosphères. — Pressions inférieures à 760 millimètres. — Pressions élevées ; mesure des pressions. — Disposition des appareils. — Résultats. — Détermination des densités de la vapeur saturée et de son liquide. — Écarts de la compressibilité par rapport à la loi de Mariotte. — Applications du réseau 451

§ 5. — *Chaleur de vaporisation; chaleurs spécifiques de la vapeur saturée et du liquide.*

Chaleur de vaporisation. — Expériences de M. Chappuis. — Expériences de M. Mathias. — Chaleurs spécifiques de la vapeur saturée et du liquide 468

§ 6. — *L'équation caractéristique.*

Continuité idéale des isothermes. — Équations de Rankine, de Hirn, de van der Waals. — Équations de Clausius et de M. Sarrau. — Propriétés de l'équation de van der Waals; équation réduite. — Relation entre le coefficient critique et le pouvoir réfringent moléculaire des gaz. 474

BULLETIN

PRODUCTION DE L'OR ET DE L'ARGENT DANS LES PRINCIPAUX PAYS DU GLOBE.

Dans la note consacrée précédemment (*) à l'important volume de statistique, *The mineral industry*, publié par l'*Engineering and Mining Journal*, il a été fait une allusion spéciale au chapitre consacré à l'or et à l'argent. Nous lui empruntons aujourd'hui les intéressants tableaux qui suivent :

États-Unis.

Production de l'or et de l'argent.

ANNÉES	OR		ARGENT	
	Poids	Valeur	Poids	Valeur
	kilogr.	francs	kilogr.	francs
1792-1834	21.064	72.520.000	?	?
1835-1844	11.285	38.850.000	60.137	1.295.000
1845	1.517	5.223.200	1.203	259.000
1846	1.714	5.901.900	1.203	259.000
1847	1.338	4.605.500	1.203	259.000
1848	15.046	51.800.000	1.203	259.000
1849	60.184	207.200.000	1.203	259.000
1850	75.230	259.000.000	1.203	259.000
1851	82.753	284.900.000	1.203	259.000
1852	90.276	310.800.000	1.203	259.000
1853	97.799	336.700.000	1.203	259.000
1854	90.276	300.800.000	1.203	259.000
1855	82.753	284.900.000	1.203	259.000
1856	82.753	284.900.000	1 203	259.000
1857	82.753	284.900.000	1.203	259.000
1858	75.230	259.000.000	1.203	259.000
1859	75.230	259.000.000	2.408	518.000
1860	69.211	238.300.000	3.608	777.000
1861	64.697	222.740.000	48.109	10.360.000
1862	58.980	203.056.000	108.245	23.310.000
1863	60.284	207.200.000	204.478	44.030.000
1864	69.214	238.798.000	264.601	56.980.000
1865	80.079	275.705.500	270.613	58.275.000
1866	80.496	277.130.000	240.546	51.800.000
1867	77.825	267.935.500	324.735	69.930.000
1868	72 221	248.640.000	288.635	62.160.000

(*) Voir *suprà*, p. 362.

ÉTATS-UNIS. — *Production de l'or et de l'argent* (suite).

ANNÉES	OR		ARGENT	
	Poids	Valeur	Poids	Valeur
	kilogr.	francs	kilogr.	francs
1869	74.477	256.210.000	288.655	62.160.000
1870	75.230	259.000.000	384.874	82.880.000
1871	63.462	225.330.000	553.252	119.140.000
1872	54.165	186.480.000	692.099	149.125.000
1873	54.165	186.480 000	860.404	185.185.000
1874	50.404	173.530.000	898.714	193.214.000
1875	50.253	173.012.000	763.007	164 206.000
1876	60.033	206.682.000	933.313	200.984.000
1877	70.566	242.912.000	957.367	206.164.000
1878	77.048	265.216.000	1.089.343	234.136.000
1879	58.531	201.502.000	981.826	211.344.000
1880	54.168	186.480.000	942.987	203.056.000
1881	52.212	179.746.000	1.034.649	222.740.000
1882	48.902	168.350.000	1.126.083	242.424.000
1883	45.140	155.400.000	1.111.457	239.316.000
1884	46.343	159.544.000	1.175.580	252.784.000
1885	47.848	164.724.000	1.241.578	267.288.000
1886	52.663	181.300.000	1.227.141	264.180.000
1887	49.654	170.940.000	1.283.855	276.253.000
1888	49.917	171.846.500	1.424.326	306.630.000
1889	49.476	170.353.000	1.597.135	343.936.400
1890	49.421	170.137.100	1.695.500	365.116.000
1891	49.917	171.846.500	1.814 642	390.657.500
1892	49.657	170.940.000	2.018.616	434.650.000

Canada.

Production de l'or.

ANNÉES	POIDS	VALEUR	ANNÉES	POIDS	VALEUR
	kilogr.	francs		kilogr.	francs
1858	1.253	3.651.900	1875	4.748	13.942.501
1859	2.870	8.366.073	1876	3.548	10.464.807
1860	3.960	11.543.853	1877	3.404	10.098.120
1861	5.075	13.810.491	1878	2.690	7.968.881
1862	4.948	14.497.449	1879	2.779	8.243.234
1863	7.700	21.683.536	1880	2.272	6.758.988
1864	7.341	21 375.741	1881	2.295	6.802.133
1865	6.996	20.650.341	1882	2.165	6.445.668
1866	5.515	16.335.632	1883	1.923	5.766.614
1867	5.196	15 609.673	1884	1.824	5.482.714
1868	4.856	14.365.824	1885	1.963	5.550.934
1869	3.710	10.999.238	1886	2.336	7.061.356
1870	2.392	8.932.123	1887	1.942	5.744.330
1871	3.796	11.263 454	1888	1.875	5.689.883
1872	3.270	9.667.543	1889	2.829	7.208.924
1873	2.689	7.960.992	1890	1.983	5.955.840
1874	3.562	10.378.425	1891	1.587	4.994.017

Mexique.

Production de l'or et de l'argent.

ANNÉES	NOMBRE d'années	OR		ARGENT	
		Poids	Valeur	Poids	Valeur
		kilogr.	francs	kilogr.	francs
1521 - 1544	24	5.040	17.350.845	82.000	17.653.026
1545 - 1560	16	2.560	8.813.128	240 000	51.667.392
1561 - 1580	20	6.800	23.409.870	1.004.000	216.141.923
1581 - 1600	20	9,600	33.049.229	1.486.000	319.907.269
1601 - 1620	20	8.440	29 055.780	1.624.060	349.616.019
1621 - 1640	20	8.020	27.609.877	1.764.000	379.755.331
1641 - 1660	20	7.420	25.452 500	1.904.000	409.894.643
1661 - 1680	20	7.263	25.010.692	2.042.000	439.603.394
1681 - 1700	20	7.380	25.406.591	2.204.000	474.478.883
1701 - 1720	20	10.470	36.044.315	3.276 000	705.259.901
1721 - 1740	20	13.600	46 819.841	4.615.000	993.520.692
1741 - 1760	20	16.380	56.390.256	6.020.000	1.295.990.416
1761 - 1780	20	26.170	90.093.575	7.328.000	1.547 577.702
1781 - 1800	20	24.580	84.709.306	11.249.000	2.425.858.439
1801 - 1810	10	17.630	60.693.531	5.538.000	1.192.225.070
1811 - 1820	10	10.710	36.870.546	3.120.000	671 676.096
1821 - 1830	10	9.760	33.600.049	2.648,400	570.149.671
1831 - 1840	10	8.640	29.744.306	3.309.900	712.557.920
1841 - 1850	10	19.940	68.646.002	4.203,100	904.846.730
1851 - 1855	5	10.050	34.598 411	2.330.500	501.731.904
1856 - 1860	5	6.800	23.409.870	2 239.000	482.013.711
1861 - 1865	5	8.740	30.047.129	2.365.000	509.139.092
1866 - 1870	5	8.950	30.298.234	2 604.500	560.698.844
1871 - 1875	5	10.095	34.753.329	3.009.000	647.779.987
1875 - 1876	1	1 636	5.630 660	522.820	112 551.040
1876 - 1877	1	1.466	4.945.320	570.000	122.709.020
1877 - 1878	1	1.124	3.869.460	597.620	128,655.660
1878 - 1879	1	1.326	4.563.580	604.550	130.147.500
1879 - 1880	1	1.417	4.879.560	644.860	138.824.000
1880 - 1881	1	1.521	5 246.340	703.420	151.432.120
1881 - 1882	1	1.410	4.853 660	703.540	151.458.020
1882 - 1883	1	1.436	4.952.080	711.480	153.167.420
1883 - 1884	1	1.588	5.464.900	762.640	164.180.100
1884 - 1885	1	1 375	4.734.520	799.480	172.110.680
1885 - 1886	1	1.544	5.314.680	820.790	176.700.160
1886 - 1887	1	1.577	5.423.460	832.540	179.228.000
1887 - 1888	1	1.551	5.240.580	840.040	180.844.160
1888 - 1889	1	1.565	5.387.200	979.460	210.857.080
1889 - 1890	1	1.655	5.698.000	997.560	214.970.000
1890 - 1891	1	1.730	5.957.000	1.034.699	222.740.000
1891 - 1892	1	1.919	6.604.500	1.100.818	236.985.000

Colombie.

Production de l'or.

ANNÉES	NOMBRE d'années	POIDS	VALEUR	ANNÉES	NOMBRE d'années	POIDS	VALEUR
		kilogr.	francs			kilogr.	francs
1537 - 1544	8	16.000	55.082.048	1841 - 1850	10	34.000	117.049.352
1545 - 1560	15	32.000	110.064.096	1851 - 1855	5	17.500	60.245 990
1561 - 1580	20	40.000	137.705.120	1856 - 1860	5	17.500	60.245.990
1581 - 1600	20	40.000	137.705.120	1861 - 1865	5	17.500	60.245.990
1601 - 1620	20	60.000	206.557.680	1866 - 1870	5	17.500	60.245.990
1621 - 1640	20	60.000	206.557.680	1871 - 1875	5	17.500	60.245.990
1641 - 1660	20	70.000	240.983.960	1876 - 1880	5	20.000	68.852.560
1661 - 1680	20	80.000	275.410.240	1881	1	4.814	16.576.000
1681 - 1700	20	80.000	275.410.240	1882	1	5.802	19 974.080
1701 - 1720	20	100.000	344.262.800	1883	1	5.802	19.974.080
1721 - 1740	20	100.000	344.262.800	1884	1	5.802	19.974.080
1741 - 1760	20	100.000	344.262.800	1885	1	3.762	12.950.000
1761 - 1780	20	80.000	275.410.240	1886	1	3.762	12.950.000
1781 - 1800	20	90.000	309.816.520	1887	1	4.514	15.540.000
1801 - 1810	10	50.000	172.131.400	1888	1	4.514	15.540.000
1811 - 1820	10	30.000	103.258.840	1889	1	5.161	17.762.220
1821 - 1830	10	32.000	110.064.096	1890	1	5 416	18.645.270
1831 - 1840	10	33.000	113.648.164	1891	1	5.224	17.984.960

Brésil.

Production de l'or.

ANNÉES	NOMBRE d'années	POIDS	VALEUR	ANNÉES	NOMBRE d'années	POIDS	VALEUR
		kilogr.	francs			kilogr.	francs
1691 - 1700	10	15.000	51.639.420	1871 - 1875	5	8.600	29.606.601
1701 - 1720	20	55.000	189.244 540	1876 - 1878	3	4.845	16.679.533
1721 - 1740	20	177 000	609.345.156	1879	1	1.510	5.198.337
1741 - 1760	20	292.000	1.005,247.376	1880	1	1.345	4.630.335
1761 - 1780	20	207.000	712.623.996	1881	1	1.116	3.841.975
1781 - 1800	20	109.000	375.246.452	1882	1	1.116	3.841.975
1801 - 1810	10	37.500	129 098.032	1883	1	952	3.270.940
1811 - 1820	10	17.600	60 590.253	1884	1	952	3.270.940
1821 - 1830	10	22.000	75.737.816	1885	1	1.204	4.144.000
1831 - 1840	10	30.060	103.278.840	1886	1	1.502	5.169.640
1841 - 1850	10	24.000	82.615.820	1887	1	984	3 387.720
1851 - 1855	5	11.000	37.868.908	1888	1	670	2.306.654
1856 - 1860	5	10.000	36.491.857	1889	1	670	2.306.654
1861 - 1865	5	12.000	41.311.536	1890	1	670	2 306.654
1866 - 1870	5	8.750	30.122.995	1891	1	670	2.306.654

Bolivie.

Production de l'or et de l'argent.

ANNÉES	NOMBRE d'années	OR		ARGENT	
		Poids	Valeur	Poids	Valeur
		kilogr.	francs	kilogr.	francs
1545-1560	16	16.000	55.082.048	2.930.500	629.652.185
1561-1580	20	16.000	55.082.048	3.035.600	652.091.200
1581-1600	20	24.000	82.623.072	5.086.700	1.092.697.426
1601-1620	20	24.000	82.623.072	4.118.400	884.692.249
1621-1640	20	20.000	68.852.560	3.443.000	739.606.668
1641-1660	20	20.000	68.852.560	2.784.000	598.043.846
1661-1680	20	20.000	68.852.560	2.010.000	431.777.346
1681-1700	20	20.000	68.852.560	1.858.800	399.497.373
1701-1720	20	12.000	41.311.536	981.200	210.827.886
1721-1740	20	12.000	41.311.536	865.600	185.943.518
1741-1760	20	12.000	41.311.536	1.163.600	239.598.267
1761-1780	20	16.000	55.082.048	1.675.000	359.814.455
1781-1800	20	20.000	68.852.560	1.960.700	421.186.986
1801-1810	10	10.000	34.426.280	965.000	207.296.089
1811-1820	10	6.000	20.655.768	493.000	105.903 598
1821-1830	10	4.000	13.770.512	423.000	90.866.576
1831-1840	10	6.000	20.655.768	610.000	131.036.906
1841-1850	10	6.000	20.655.768	660.000	141.777.636
1851-1855	5	5.000	17.213.140	366.000	78.622.144
1856-1860	5	5.000	17.213.140	366.000	78.622.144
1861-1865	5	5.000	17.213.140	359.000	77.118.959
1866-1870	5	5.000	17.213.140	450.000	96.606.570
1871-1875	5	10.000	34.426.280	1.112.500	238.981.242
1876-1878	3	3.162	11.196.389	730.770	157.980.061
1879	1	109	374.748	264.677	56.980.000
1880	1	109	374.748	264.677	56.980.000
1881	1	109	374.748	264.677	56.980.000
1882	1	109	374.748	384.985	82.880.000
1883	1	109	374.748	384.985	82.880.000
1884	1	109	374.748	240.616	51.800.000
1885	1	109	374.748	240.616	51.800.000
1886	1	109	374.748	240.616	51.800.000
1887	1	143	492.100	137.468	29.574.221
1888	1	90	309.764	230.460	49.614.040
1889	1	90	309.764	263.506	56.727.731
1890	1	101	347.060	301.112	64.823.556
1891	1	101	347.060	372.666	80.227.840

Chili.

Production de l'or et de l'argent.

ANNÉES	NOMBRE d'années	OR		ARGENT	
		Poids	Valeur	Poids	Valeur
		kilogr.	francs	kilogr.	francs
1545-1560	16	32.000	110.164.080		
1561-1600	40	16.000	55.082.040		
1601-1700	100	35.000	120.492.000		
1701-1720	20	8.000	27.541.000		
1721-1740	20	8.000	27.541.000	20.000	4.306.440
1741-1760	20	10.000	34 426.280	30.000	6.459.560
1761-1780	20	20.000	68.852 560	50.000	10.766.000
1781-1800	20	40.000	136.705 120	100 000	21.532.000
1801-1810	10	31.100	107.065.793	70.000	15.072.440
1811-1820	10	20.000	68.852,560	50.000	10.766.000
1821-1830	10	12.000	41.311.540	60.000	12 919.230
1831-1840	10	12.000	41.311.540	200.000	43.064.000
1841-1850	10	10.000	34.426.280	450.000	96.894.000
1851-1855	5	2.000	6.885.256	342.000	73.739.630
1856-1860	5	1.500	5.163.940	256.000	55.072.000
1861-1865	5	2.000	6.885.256	221 000	47.585.835
1866-1870	5	2.000	6 885 256	349.000	75.146.880
1871-1875	5	2.000	6.885.256	411.600	88.496.750
1876-1878	3	891	3 067.477	306 696	65.882.838
1879	1	194	672.721	122.275	26.323.449
1880	1	194	672.721	122.275	26.323.449
1881	1	194	672.721	122.275	26.323.449
1882	1	245	844 340	128.106	27.583 500
1883	1	500	1.719.860	160.000	34.447 000
1884	1	500	1.719.860	160.000	34.447.000
1885	1	500	1.719.860	210.000	45.108.968
1886	1	500	1.719.860	210.000	45.108.968
1887	1	2.379	8.191.652	199.516	42.952.146
1888	1	2.953	10.165.387	185.851	40.010.097
1889	1	2.162	7.441.588	123.696	26.629.344
1890	1	2.162	7.441.588	123.696	26.629.344
1891	1	2.162	7.441.588	72.185	15.540.000

Pérou.

Production de l'or et de l'argent.

ANNÉES	NOMBRE d'années	OR		ARGENT	
		Poids	Valeur	Poids	Valeur
		kilogr.	francs	kilogr.	francs
1533-1544	12	8.400	28.918.075	327.000	70.244.374
1545-1560	16	4 800	16.058.414	768.000	165.029.413
1561-1580	20	5 000	17.213.140	920.000	197.629.432
1581-1600	20	5.000	17.213.140	920.000	197.629.432
1601-1620	20	10.000	34.426.280	2 068.000	444.236.593
1621-1640	20	10.000	34.426.280	2.068.000	444.236.593
1641-1860	20	10.000	34.426.280	2.068.000	444.236.593
1661-1680	20	10.000	34.426.280	2.068.000	444.236.593
1681-1700	20	10.000	34.426.280	2.068.000	444.236.593
1701-1720	20	10 000	34.426.280	2.068.000	444.236.593
1721-1740	20	10.000	34.426.280	2.068.000	444.236.593
1741-1760	20	10.000	34.426.280	2.068.000	444.236.593
1761-1780	20	12.000	41.311.536	2.432.000	522.429.107
1781-1800	20	13.000	44.754 164	2.568.000	551.643.893
1801-1810	10	7.800	26.852.498	1.513.000	325.044.490
1811-1820	10	4.500	15.491.826	880.000	189.036.848
1821-1830	10	3.200	11.016.410	580.000	124.592.468
1831-1840	10	4.500	15.491.826	900.000	193.333.140
1841-1850	10	6.000	20.655.768	1.080.000	231.998.768
1851-1855	5	2.000	6.885.256	385.000	82.703.621
1856-1860	5	1.750	6.024.598	330.000	70.888.818
1861-1865	5	2.000	6.885.256	375.000	80.555.475
1866-1870	5	1.800	6.196.730	350.000	75.185.110
1871-1875	5	1.800	6.196.730	350.000	75.185.110
1876-1880	5	1.350	4.647.548	289.770	62.246.797
1881	1	180	621.000	45.909	9.883.440
1882	1	180	621.000	45.909	9.883.440
1883	1	180	621.000	45.909	9.883.440
1884	1	180	621.000	45.909	9.883.440
1885	1	226	777.000	47.840	10.297.840
1886	1	170	584.340	96.246	20.720.000
1887	1	158	546.900	75.263	16.202.840
1888	1	158	546.900	75.263	16.202.840
1889	1	140	481.749	68.575	14.763.000
1890	1	104	357.420	65.791	14.164.740
1891	1	113	388.500	74.879	16.120.160

République Sud-Africaine.

Production de l'or.

ANNÉES	POIDS	VALEUR
	kilogr.	francs
1884	1.250	4.300.000
1885	2.083	7.169.000
1886	2.163	7.449.000
1887	1.342	3.911.998
1888	6 744	19.772.671
1889	13.839	24.362.802
1890	16.890	48.255.072
1891	26.073	74.669.664
1892	39.993	114.623.304

Indes Britanniques.

(Mysore et Madras.)

Production de l'or.

ANNÉES	POIDS	VALEUR
	kilogr.	francs
1884	35	111.553
1885	191	603.921
1886	499	1.568.618
1887	518	1.634.269
1888	1.016	3.501.038
1889	2.519	7.397.035
1890	3.383	9.859.736
1891	4.106	12.836.128
1892	4.916	15.472.743

Australasie, ... duction de l'or.

ANNÉES	VICTORIA		NOUVELLE GALLES DU SUD		QUEENSLAND		SOUTH AUST...		...ERN AUSTRALIA		TASMANIE		NOUVELLE ZÉLANDE		TOTAUX	
	Poids	Valeur	Poids	Valeur	Poids	Valeur	Poids	Va...	...ids	Valeur	Poids	Valeur	Poids	Valeur	Poids	Valeur
	kilogr.	francs	kilogr.	francs	kilogr.	francs	kilogr.	...	...logr.	francs	kilogr.	francs	kilogr.	francs	kilogr.	francs
1851	6 630	21.477.251	4.489	14.811.434											11.119	33.288.685
1852	71.231	230.665.651	25.509	67.109.058											96.738	297.774.709
1853	85.486	276.824.606	17 073	44.921.158											102 559	321.745.764
1854	69.110	223.790.477	7.411	19.500.331											76.521	243.290.808
1855	87.827	284.409.773	5.339	16.508.861											93.166	300.918.634
1856	95.137	308.061.695	5.752	17.380.968											100.889	325.442.663
1857	88 169	285.512 887	5 481	17.010.310									325	1.019.443	93,975	303.542.640
1858	80.882	261.907.783	8.932	27.847.303									421	1.323.142	90.235	291.078.228
1859	73.169	236.937.159	10 260	31.755.183									228	716.920	83.657	269.409.271
1860	69.285	224.364.081	11.965	36.956.707									141	443.494	81.391	261.764.282
1861	63.402	205.308.252	14.507	45.551.658									6.044	18.962.237	83.953	269.822.147
1862	53.916	174.542.677	19.934	62.237.412									12.806	40.134.831	86.656	276.914.920
1863	52.799	170.973.341	14.520	45.299.407									19.577	61.328.054	86.896	277.600.802
1864	50.539	163.672.453	10.602	32.910.234									14.961	46.829.429	76.102	243.412.116
1865	50.205	162.573.568	9.978	31.051.948									17.899	56.351.674	78.082	250.177.190
1866	48.191	156.056.114	9.035	28.044.068							11	35.106	22.909	71.738.719	80.146	255.874.007
1867	46.775	151.465.872	8.470	26.571.237							42	135.986	21.398	68.065.300	76.685	246.238.395
1868	52.490	167.974.528	7.963	25.085.461							22	69.809	19.859	63 159.102	80.334	256.288.900
1869	48.124	155.834.985	7.835	24.568.038							4	13.821	19.136	59 594.734	75.099	240.011.578
1870	40.633	131.178.188	7 503	23.480.223							30	97.248	16.974	54.414.294	65.140	209.169.953
1871	42.647	138.098.869	10.081	31.637.232							187	605.784	22.742	70.301.354	75.657	240.643.139
1872	41.477	134.309.312	13.213	41.451.138							217	703.033	13.874	43 552.402	68.889	220.236.030
1873	36.462	118.069.649	11 270	35.186.313			78				145	470.202	15.742	50.122.858	63.622	203.857.672
1874	34.195	110.730.226	8.436	26 237.097			3				145	469.092	11.725	37.964.448	54.761	176.108.018
1875	33.285	107.781.907	7.191	22.135.443			260				94	303.649	17.069	55.503.959	52.067	166.937.964
1876	30.025	97.224 609	5.214	15.464.652			307				346	1.120.474	10.031	32.390.752	45.923	147.070.577
1877	25.223	81.677.795	3.866	11.889.162	(*) 82.459	233.643.275	368				180	582.784	11.578	37.731.138	123.674	366.566.724
1878	23.615	76.471.075	3.728	10.845.432	9.665	27.385.490	335				786	2.557.229	9.672	31.274.802	47.801	149.482.502
1879	23.646	76.562.573	3.415	10.272.063	8.988	25.470.838	444				1.874	6.068 436	8.954	28.955.284	47.321	148.587.041
1880	25.827	83.641.726	3.694	11.135.714	8.323	23.580.085	412				1.639	5.304.784	9.511	30.951.295	49.406	155.782.753
1881	25.963	84.071.173	4.660	14.287.458	8.440	23.916.328	530				1.766	5.719 190	8.428	27.257.524	49.787	156.750.069
1882	26.937	87 224.857	4.376	13.278 885	7.005	19.851.292	488				1.530	4.955.427	7.825	25.168.508	48.161	151 859.073
1883	24 313	78 711.923	3.856	11.563.597	6.630	18.782.368	496				1.451	4.698 688	7.737	25.052.337	44 483	140.215.760
1884	24.257	78.546.964	3.339	9.969.264	9.589	27.169.858	668				1.320	4.278.724	7.162	23.247.720	46.335	145.118.427
1885	22.906	74.168.792	3.231	9.549.936	9.685	27.446.749	571				1.163	3.765.539	7.394	23.924.070	44.950	140.472.823
1886	20.724	67.104.972	3.159	9.237.935	10.622	30.099.893	658				967	3.238.692	7.073	22.788.010	43.203	134.333.336
1887	19.244	62.318.721	3.436	9 951.282	13.269	37.596.236	989		152	491.588	993	3.214.138	6.350	20.455.942	44.433	136.831.051
1888	19.462	63.052.623	2.725	7.997.262	14.997	42 514.615	522		102	330.332	1.234	3 995.857	6,267	20 202.885	45.316	139.573.257
1889	19.153	62.024.857	3.731	10.947.245	29.026	65.230·634	623		483	1.484.727	1.029	3.334.084	6.330	20.391.606	54.375	165.178.553
1890	18.336	59.373.933	3.979	11.608.388	19.023	53.896.502	812		693	2.185.666	730	2.365.737	6.018	19.496.106	49.591	151.228.943
1891	17.955	58.147.131	4.776	14.080.477	17.956	50.882.283	893		945	2 904.890	1.519	4.919.817	7.850	25.407.839	51.894	158.875.793

(*) Queensland. — Production totale de l'or avant 1878.

Russie. — Production de l'or et de l'argent.

ANNÉES	OR		ARGENT	
	Poids	Valeur	Poids	Valeur
	kilogr.	francs	kilogr.	francs
Avant 1814	39.918	?		
1814	263	?		
1815	233	?		
1816	258	?		
1817	298	?		
1818	273	?		
1819	242	?		
1820	325	?		
1821	457	?		
1822	881	3.033.942	?	4.069.009
1823	1.731	5.955.094	?	3.953.837
1824	3.371	11.605.671	?	4.005.203
1825	3.887	13.387 684	?	3.721.851
1826	3.772	13.040.401	?	4.018.323
1827	4.289	15.891.536	?	3.989.107
1828	4.780	16.404.708	?	3.914.539
1829	4.729	16.337.036	?	3.943.254
1830	6.268	21.675.943	21.101	4.521.695
1831	6 587	22.670.529	21.591	4.648.667
1832	6.925	23.837.298	21.483	4.623.979
1833	6.712	23.115.470	20.579	4.429.988
1834	6.635	22.833.708	20.655	4.451.153
1835	6.436	22.156.992	19.861	4.274.800
1836	6.652	22.901.179	19.672	4.232.474
1837	7.249	24.953.878	19.711	4.243.057
1838	7.259	27.807.364	20.959	4.327.704
1839	8.122	27.959.625	20.959	4.285.383
1840	7.502	25.827.972	20.959	4.150.112
1841	10.589	36.452.401	20.959	4.243.057
1842	14.891	51.266.823	20 959	4.257.162
1843	20.336	70.006.208	20.959	4.176.043
1844	20.966	72.177.338	19.548	4.207.787
1845	21.413	73.716.865	21.317	4.200.731
1846	26.400	90.882.877	19.363	4.211.314
1847	28.784	99.093.695	18.739	4.031.434
1848	27.597	95.005.199	18.610	4 005.740
1849	26.031	89.501.252	18.315	4.049.066
1850	23.814	81.984.072	17.500	3.766.901
1851	24.142	83.111.929	17.239	3.661.879

Russie (suite). — *Production de l'or et de l'argent* (suite).

ANNÉES	OR		ARGENT	
	Poids	Valeur	Poids	Valeur
	kilogr.	francs	kilogr.	francs
1852	22.349	77.072.246	17.415	3.749 621
1853	23.976	82.536.721	16.769	3.609.595
1854	26.155	90.012.624	17.277	3.719.991
1855	27.018	92.998.894	17.410	3.678.727
1856	27.118	93.358.529	16.980	3.656.153
1857	28.397	97.762.819	17.333	3.731.983
1858	28.021	96.465.783	16.826	3.623.177
1859	25.208	86.777.483	17.759	3.823.690
1860	24.428	84.104.448	17.531	3.879.416
1861	23.852	82 108.698	15.908	3.425.130
1862	23.927	82.378.363	16.929	3.638.569
1863	23.906	82.305 512	17.668	3.804.290
1864	22.899	78.831.706	17.889	3.851.553
1865	25.819	88.876.414	17.763	3.824.389
1866	27.184	93.584.102	18.222	3.923.503
1867	27.022	93.025.812	18.119	3.901.281
1868	28.034	96 510 895	18.310	3.942.550
1869	33.233	114.410.018	12.590	2.716.081
1870	35.426	121.961.033	14.210	3.059.728
1871	39.329	135.393 835	13.576	2.923.229
1872	36.180	130.171.846	12.322	2.653.056
1873	33.170	114.190.085	9.935	2.139.164
1874	33.223	114.370.541	11.800	2.540.894
1875	32.698	112 546.233	9.847	2.120.118
1876	33.631	115.836.760	11.195	2.410.394
1877	41.201	141.103.620	11.162	2.403.339
1878	42.133	145.043.232	11.453	2.466.825
1879	43.110	148.438.046	11.422	2.459.423
1880	43.273	148.976.075	10.102	2.175.139
1881	36.763	126.552.828	9.435	2.031.586
1882	36.152	123.635.903	8.022	1.675.352
1883	35 735	101.282.416	7.377	1.558.662
1884	35.677	113 307.988	9.663	2.013.590
1885	33.020	105.351.969	11.260	2.312.476
1886	33.439	106.283 240	13.273	2.735.558
1887	34.865	104.076.560	15.379	2.911.160
1888	35.166	110.344 360	15.156	3.128.720
1889	37.258	123.831.008	13.858	3.097.640
1890	39.371	132.007.120	14.563	2.942.240
1891	36.348	125.001.170	13.432	2.981.090

Allemagne.

Production de l'or et de l'argent.

ANNÉES	OR (*)		ARGENT (*)	
	Poids	Valeur	Poids	Valeur
	kilogr.	francs	kilogr.	francs
1493-1520	»	»	11.000	2.368.521
1521-1544	»	»	15.000	3.229.808
1545-1560	»	»	19.400	4.177.219
1561-1580	»	»	15.000	3.229.808
1581-1600	»	»	14.300	3.079.085
1601-1620	»	»	10.400	2.239.335
1621-1640	»	»	6.000	1.292.773
1641-1660	»	»	6.500	1.399.584
1661-1680	»	»	7.000	1.507.245
1681-1700	»	»	11.400	2 454.657
1701-1720	»	»	15.300	3.324.402
1721-1740	»	»	25.200	5.426.076
1741-1760	»	»	21.100	4.543.264
1761-1780	»	»	18.100	3.897.302
1781-1800	»	»	23.900	5.146.159
1801-1810	»	»	20.900	4.500.198
1811-1820	»	»	23.700	5.103.098
1821-1830	»	»	28.200	6.072.037
1831-1840	»	»	29.800	6.416.554
1841-1850	»	»	36.000	7.751.419
1851-1855	»	»	48.960	10.542.093
1856-1860	»	»	61.510	13.341.369
1861-1865	32	128.984	68.320	14.710.703
1866-1870	100	340.264	89.125	19.294.044
1871-1875	284	958.270	143.080	30.808,066
1876	281	968.400	139.800	27.517.800
1877	308	1.060.000	147.600	28.948.700
1878	378	1.368 000	167.700	32.860.100
1879	467	1.686.600	177.500	34.341.000
1880	463	1.672.800	186.000	37.046.800
1881	381	1.376.000	187.000	36.925.700
1882	376	1.361.200	215.000	42.428.200
1883	457	1.655.400	235.100	45.438.800
1884	556	2.008.400	248.100	47.987.300
1885	1.379	4.992.100	309.400	57.158.400
1886	1.065	3.851.800	319.600	55.306.000
1887	2.251	8.134.500	367.600	62 364.600
1888	1.793	6.479.900	406.600	66.661.700
1889	1.958	7.077.800	403.100	65 802.500
1890	1.855	6.684.400	402.900	72.715.400
1891	3.077	11.085.600	444.900	76.401.800

(*) Jusqu'à 1876, les chiffres indiquent la moyenne par an.

Autriche-Hongrie.

Production de l'or et de l'argent.

ANNÉES	OR (*)		ARGENT (*)	
	Poids	Valeur	Poids	Valeur
	kilogr.	francs	kilogr.	francs
1493 - 1520	2.000	6.885.256	24 000	5.167.692
1521 - 1544	1.500	5.163.912	32.000	6.890.270
1545 - 1560	1.000	3.442.628	30.000	6.459.615
1561 - 1580	1.000	3.442 628	23 500	5.060.031
1581 - 1600	1.000	3 442.628	17.000	3.660.452
1601 - 1620	1.000	3.442.628	11.000	2.368.524
1621 - 1640	1.000	3.442.628	8.000	1.722.562
1641 - 1660	1.000	3.442.628	8 000	1.722.562
1661 - 1680	1.000	3.442.628	10.000	2.153.207
1681 - 1700	1.000	3.442.628	10.000	2.153.207
1701 - 1720	1.000	3.442.628	10.000	2.153.207
1721 - 1740	1.000	3.442.628	12.500	2.691.507
1741 - 1760	1.000	3 442.628	24.000	5.167.692
1761 - 1780	1.000	3.442.628	24.000	5.167.692
1781 - 1800	1.280	4,406.560	26.000	5.598.337
1801 - 1810	960	3.304.918	29.500	6.331.954
1811 - 1820	1.000	3.442.628	25.000	5.383.015
1821 - 1830	1.135	3.907.378	21.000	4,521.731
1831 - 1840	1.625	5 594.265	20.040	4.315.023
1841 - 1850	1.950	6.713.119	30.600	6.588.810
1851 - 1855	1.775	6.110.660	35.000	7.536.221
1856 - 1860	1.560	5.370.495	31.700	6.825.660
1861 - 1865	1.690	5.818 036	36.500	7.859.200
1866 - 1870	1.650	5.680 336	39.970	8.606.363
1871 - 1875	1.395	4.802.461	38.350	8.300.608
1876	1.904	6.553.379	47 947	10.322.067
1877	1.713	5.898.601	47.675	10 267.138
1878	1.824	6.269.093	48.662	10.475.996
1879	1.611	5.544.698	48.195	10 375 457
1880	1.646	5.664.501	47.701	10.269,112
1881	1.597	5 498.907	48.942	10.536.244
1882	1.741	5.992.928	47.663	10.260 953
1883	1.638	5.935.840	48.700	10.484.320
1884	1.658	5.708 360	49.300	10.613.820
1885	1.774	6.107.220	52.748	11 355.596
1886	1.806	6.226.023	51.739	11.138.497
1887	1.877	6.461.791	53.391	11.493.902
1888	1.820	6.265.383	52.128	11 222.175
1889	2.198	7.567 980	52.651	11.338.840
1890	2 101	7 244.250	50.613	10.896.030
1891	1.101	7,244.230	50.613	10.896.030

(*) Jusqu'à 1876, les chiffres indiquent la moyenne par an.

Production de l'or et de l'argent dans le monde.

ANNÉES	OR (*) Poids	ARGENT (*) Poids	RAPPORT de l'argent à l'or
	kilogr.	kilogr.	
1493 - 1520	5.800	47.000	8,1
1521 - 1544	7.160	90.200	12,6
1545 - 1560	8.510	311.600	36,6
1561 - 1580	6.840	295.500	43,8
1581 - 1600	7.380	418 900	56,8
1601 - 1620	8.520	422.900	49,6
1621 - 1640	8.300	393 600	47,4
1641 - 1660	8.770	366 300	41,8
1661 - 1680	9.260	337 000	36,4
1681 - 1700	10.765	341.900	31,8
1701 - 1720	12.280	336.600	27,7
1721 - 1740	19.080	431.200	22,6
1741 - 1760	24.610	533.145	21,7
1761 - 1780	20.705	652.740	31,5
1781 - 1800	17 790	879.060	49,4
1801 - 1810	17.778	894.150	50,3
1811 - 1820	11.445	540.770	47,2
1821 - 1830	14.216	460.560	32,4
1831 - 1840	20 289	596.450	29,4
1841 - 1850	54 759	780.415	14,3
1851 - 1855	199.388	886.115	4,4
1856 - 1860	201.450	904.990	4,5
1861 - 1865	185.057	1.101.150	5,9
1866 - 1870	195 026	1.339.085	6,9
1871 - 1875	173.904	1.969.425	11,3
1876	165.956	2.323.779	14,0
1877	179.445	2.388.612	13,3
1878	185.847	2.551.364	13,7
1879	167.307	2.507.507	15,0
1880	163.515	2.479.998	15,2
1881	158.864	2.592.639	16,3
1882	148 475	2.769.065	18,6
1883	144.727	2.746.123	19,0
1884	153.193	2.788.727	18,2
1885	159.289	2 993.805	18,8
1886	159.741	2.902.471	18,2
1887	159.155	2.990.398	18,8
1888	159.809	3.385.806	21,2
1889	185.809	3.901.809	21,0
1890	181.256	4.180.532	23,1
1891	189.824	4.479.649	23,6
1892	196.234	5.935 315	30,2

(*) Jusqu'à 1876, les chiffres indiquent la moyenne par an.

(*Extrait du volume* The mineral Industry, its statistics, technology and trade, *statistical supplement of the* Engineering and Mining Journal.)

NOTICE NÉCROLOGIQUE

SUR

ADOLPHE HENRY

INGÉNIEUR EN CHEF DES MINES,

INGÉNIEUR EN CHEF DU MATÉRIEL ET DE LA TRACTION DES CHEMINS DE FER P.-L.-M.

Par M. R. ZEILLER, ingénieur en chef des mines.

BIBLIOTHEQUE

Sorti de la plus modeste condition, Adolphe Henry est un exemple de ce que peut une ferme volonté unie à une intelligence supérieure. A cette intelligence et à cette volonté s'alliaient en outre, chez notre regretté camarade, un sens pratique, une sûreté de jugement, une loyauté de caractère dont il était impossible de n'être pas frappé dès qu'on pénétrait dans son intimité, et qui, presque dès le début de sa carrière, le faisaient juger digne d'occuper dans l'industrie les postes les plus élevés. De ces qualités si précieuses il avait sans doute puisé le germe dans son origine même, dans le contact qu'il avait eu dès son enfance avec les choses de la nature et avec les difficultés de la vie, dans la rude et saine éducation qu'il avait reçue.

Fils de paysan, Henry avait été en effet destiné tout d'abord à suivre simplement le sillon dans lequel son père avait marché, à aider celui-ci, puis à le remplacer plus tard, dans la culture du champ qui faisait vivre la famille. Sans s'enorgueillir du chemin qu'il avait su parcourir, il se reportait volontiers, dans ses moments d'expansion, au temps qu'il avait passé au village, à ses

premières années d'études, rappelant avec un profond sentiment de reconnaissance le souvenir de ceux qui l'avaient encouragé, qui l'avaient aidé à mettre en œuvre les facultés que Dieu lui avait départies. Lié avec lui depuis notre temps d'École polytechnique d'une de ces solides amitiés nées de luttes réciproques, cimentées par des années d'études communes, par des voyages accomplis ensemble à l'étranger, je n'ai, pour parler de la première période de sa vie, qu'à me remettre en mémoire ce qu'il m'en avait dit lui-même au cours de nos excursions géologiques sur les bords du Rhin ou dans l'Eifel.

Adolphe Henry était né le 27 février 1846 à Barizey-au-Plain, dans la région du département de la Meurthe qui confine à celui de la Meuse; il était le deuxième, mais seul fils, d'une famille de trois enfants. Sa robuste apparence, sa charpente solide le désignaient comme devant donner à son père l'aide la plus efficace pour les travaux des champs ; aussi ne fut-ce pas sans quelque hésitation que celui-ci, qui avait apprécié l'utilité du concours que pouvait lui prêter ce vigoureux garçon, déjà âgé de quatorze ans, se décida en 1860 à faire les sacrifices nécessaires pour le faire entrer comme pensionnaire au collège de Toul. Il cédait aux instances de l'instituteur du village, qui avait su discerner chez l'enfant des aptitudes exceptionnelles, qui s'était donné tout entier à son instruction, et qui, après lui avoir appris tout ce qu'il savait lui-même, jugeait trop regrettable de rester en si beau chemin et de ne pas mettre une aussi riche intelligence à même d'acquérir un développement plus complet. L'élève joignait d'ailleurs ses instances à celles de son maître : il était ambitieux, il rêvait de devenir un jour agent voyer! Une fois au collège de Toul, et sous l'aiguillon des succès obtenus, l'ambition alla grandissant : le jeune homme entendit parler de l'École polytechnique par un

de ses condisciples qui s'y destinait et qui devait l'y précéder de peu. Le programme des connaissances exigées pour entrer à l'École, la nature des carrières auxquelles elle donne accès, éveillèrent en lui des désirs dont il finit par s'ouvrir au principal du collège, qui s'intéressait à lui et le suivait dans son travail ; celui-ci lui représenta les obstacles qu'il allait rencontrer, l'impossibilité pour les siens de subvenir aux frais de semblables études, mais ses arguments se brisèrent devant cette volonté réfléchie qui avait vu le but à atteindre et qui ne devait pas s'en laisser détourner. Le résultat de l'entretien fut la décision, prise par Henry, de se présenter, pour la rentrée d'octobre 1862, au lycée de Nancy, de s'y faire agréer comme maître d'études avec la recommandation du principal de Toul, et d'y suivre dans ces conditions les cours de sciences nécessaires. Il eût triomphé sans doute des difficultés d'une telle entreprise, mais il eut le bonheur de se les voir épargnées.

A la distribution de prix qui marquait la fin de sa deuxième année au collège de Toul, assistait un homme de bien, au nom duquel il n'est que juste de rendre hommage, M. Prugneaux, qui, frappé des nombreuses couronnes remportées par le jeune Henry, s'informa près du principal de sa situation et de ses projets d'avenir. Intéressé par l'éloge qu'il en entendit faire, sollicité du désir de lui aplanir la voie, il songea qu'il avait jadis rendu quelques services au chef d'une institution parisienne bien connue, et que celui-ci serait heureux de trouver l'occasion de s'acquitter; il lui écrivit aussitôt pour lui recommander chaudement le brillant lauréat, convaincu d'ailleurs, par tout ce qu'il avait appris sur son compte, qu'il ne pourrait que faire honneur à ceux qui se chargeraient de compléter son instruction. L'institution, cependant, avait passé en d'autres mains, et l'obligé de M. Prugneaux n'était plus de ce monde, mais

son gendre, qui lui avait succédé, connaissait la dette de reconnaissance contractée par son beau-père et s'empressa d'accueillir la demande qui lui était adressée.

Grâce à cet heureux concours de circonstances, Henry entrait, à l'automne de 1862, à l'institution Jauffret, et commençait à suivre la classe de seconde (sciences) du lycée Charlemagne; à la fin de l'année, il remportait un premier prix, deux seconds prix et un accessit au Concours général; passé de là directement en mathématiques élémentaires, il couronnait cette seconde année par le premier prix de physique et le deuxième accessit de mathématiques au Concours, en même temps qu'il se faisait recevoir au baccalauréat ès sciences. Enfin, en 1865, au bout d'un an seulement de mathématiques spéciales, et après avoir obtenu encore deux nominations au Concours général, en mathématiques et en chimie, il était admis le dixième à l'École polytechnique. En quelques mois, et nonobstant une interruption de travail de trois semaines causée par une violente atteinte d'érysipèle, il y conquérait le premier rang, avec lequel il passait en première division, et qu'il devait garder presque jusqu'à la sortie.

Entré le second à l'École des Mines, il en suivit les cours avec un intérêt et une assiduité que ne diminuaient point les répétitions qu'il était obligé de donner pour compléter son modeste traitement d'élève-ingénieur et se suffire à lui-même sans imposer de nouvelles charges à sa famille. Après avoir, à la fin de sa première année, visité les mines et les usines de Lorraine et fait une pointe dans le bassin de Saarbrück, il dirigeait ses pas, l'année suivante, vers la Belgique et la Prusse Rhénane; c'est dans ce voyage, fait avec lui, que j'ai pu apprécier ses rares qualités de cœur et de caractère, et je ne puis me rappeler sans une reconnaissance émue la délicate et fraternelle sollicitude avec laquelle il veillait sur la santé de son compagnon, à peine remis à ce moment des suites d'une

pleurésie, et savait trouver toujours les plus ingénieux prétextes pour se réserver, durant nos courses, la charge du paquet de manteaux ou du sac d'échantillons géologiques.

Les deux mémoires qu'il rédigea à son retour sur les sujets qu'il avait plus spécialement étudiés pendant cette mission, furent jugés dignes tous deux, l'un par extrait, l'autre *in extenso*, de l'insertion aux *Annales des mines*, et lui valurent en outre un prix de la part du Conseil de l'École. Le premier d'entre eux était consacré à l'étude des procédés de désargentation des plombs d'œuvre, particulièrement variés à ce moment où la méthode du zingage était encore à ses débuts, et où chaque usine traitait à sa manière les crasses riches obtenues par l'emploi du zinc : il donna lieu à la publication d'une note sur le procédé appliqué à l'usine de MM. Herbst, à Call (*), près de Mechernich, note qu'il ne voulut pas laisser paraître sous son nom seul, et dont il tint à partager l'honneur avec son compagnon. Le second mémoire, qui fut publié en entier (**), consistait en une étude magistrale de la préparation mécanique des minerais de plomb et de zinc, telle qu'elle était alors pratiquée en Belgique et dans la Prusse Rhénane; la justesse d'appréciation de l'auteur s'y révèle par les remarques judicieuses qu'il fait sur les divers appareils qu'il a vus en œuvre, sur leurs avantages relatifs, sur les meilleures conditions de leur emploi; il ne craint pas, même, le cas échéant, de formuler ses critiques personnelles sur telle disposition qui lui a paru offrir certains inconvénients, et vingt ans plus tard M. Maurice Bellom, dans sa visite aux exploitations de Mechernich (***), constate qu'à la formule critiquée par l'élève-ingénieur de 1869 a été substituée précisément celle qu'il avait dès ce moment indiquée comme préférable.

(*) *Annales des mines*, 6e série, XVII (1870), p. 447-455.
(**) *Ibid.*, XIX (1871), p. 294-420, pl. VII-XII.
(***) *Ibid.*, 8e série, XX (1891), p. 123-124.

Au cours de ce même voyage, l'attention d'Henry s'était portée sur les nouveaux explosifs, dynamite et autres substances analogues, qu'il avait pu voir à l'essai, particulièrement dans les mines métalliques de Belgique, et qui étaient encore à peu près ignorés en France; frappé des services qu'ils paraissaient devoir rendre à l'art des mines, des applications qu'ils pouvaient recevoir au point de vue militaire, il avait, concurremment avec ses mémoires de mission, rédigé à leur sujet une note qui avait été immédiatement accueillie par la Commission des *Annales des mines*, et qui devait paraître dans le second semestre de 1870; les événements n'en permirent la publication qu'en 1871 (*), mais ce n'en fut pas moins le premier travail consacré dans notre pays à l'emploi dans les mines de ces précieuses substances explosives, dont, en raison de la compétence qu'il avait montrée dans leur appréciation, notre camarade devait être appelé, peu d'années après, à s'occuper de nouveau.

Cependant les cours de l'École des Mines avaient pris fin, et les trois élèves-ingénieurs de la promotion sortante allaient partir pour leur dernier voyage d'instruction, qu'ils avaient décidé de faire ensemble et dont ils avaient longuement caressé le projet : ils se proposaient d'étudier d'abord les mines et les usines de Styrie et de Carinthie, de gagner de là l'Italie pour visiter la Toscane et l'île d'Elbe, et de descendre ensuite jusqu'en Sicile, où les gîtes de soufre d'une part, et l'Etna de l'autre, leur promettaient une riche moisson d'observations intéressantes. Pour ne pas aborder trop tôt une région aussi méridionale, le départ avait été fixé à la fin de juillet, et la guerre venait d'être déclarée lorsqu'ils se mirent en route. Ils emportaient à travers le Tyrol l'espoir d'une campagne rapide et de victoires prochaines ; à peine

(*) *Ann. des mines*, 6e série, XIX (1871), p. 21-60, pl. I, *fig.* 4-6.

arrivés à Leoben, ils apprenaient coup sur coup les désastres de Wissembourg et de Reichshoffen et avaient la poignante douleur d'entendre acclamer autour d'eux les succès des armes allemandes. Ils reprenaient aussitôt la route de Paris; mais, comme ils venaient d'atteindre la frontière française, Henry, souffrant depuis quelques jours, fut obligé, par une indisposition assez sérieuse, de s'arrêter à Chambéry. Quand il put, au commencement du mois de septembre, rejoindre ses deux compagnons, l'organisation du corps des Mineurs auxiliaires du Génie, dans lequel ceux-ci avaient trouvé place, était terminée, et les cadres en étaient au complet. Il ne fit, du reste, pas grands efforts pour s'y faire admettre ; croyant trouver ailleurs un rôle plus actif, il s'engagea dans l'infanterie, et y resta comme caporal pendant près de trois mois, au cours desquels il eut souvent à faire de nuit le rude service de grand'garde ; ce n'était pas là toutefois un aliment suffisant à son désir de se rendre utile, et lorsqu'au commencement du mois de décembre on lui demanda de prendre part à son tour aux travaux de défense de Paris, en remplacement de son camarade Heurteau, atteint d'une fièvre typhoïde, il s'empressa de répondre à l'appel qui lui était adressé. Il eut alors à s'occuper, jusqu'à la fin du siège, sous les ordres de l'excellent et regretté Descos, de la reconnaissance et de l'établissement d'une voie souterraine de communication entre le fort de Vanves et Paris, ainsi que de l'aménagement de la galerie qui reliait le fort de Montrouge à la place. Tour à tour exposé à la surface au feu des batteries ennemies qui bombardaient nos lignes avancées, et enfoui sous terre pour explorer de vieux cavages noyés, dans lesquels l'eau, s'élevant parfois jusqu'à l'ouverture des bottes d'égoutier qu'il fallait chausser pour les parcourir, inondait les vêtements, qui se gelaient ensuite sur le corps pendant le retour en plein air, c'était à qui, de lui ou du

chef, se chargerait des besognes les plus pénibles et les plus fatigantes, à qui passerait les nuits pour surveiller l'exécution des travaux urgents.

Lorsque l'armistice eut mis fin aux opérations de défense et ouvert les portes de la ville assiégée, Henry, qui, dès avant l'investissement, et par suite de l'occupation de la Lorraine, avait cessé de recevoir aucune nouvelle de sa famille, s'empressa de partir pour Barizey, impatient qu'il était de savoir ce qu'étaient devenus les siens; il eut le bonheur de les y retrouver tous, et il y resta jusqu'à ce qu'il fût redevenu possible, aux premiers jours de juin, de pénétrer dans Paris. Il avait été nommé ingénieur de 3e classe le 1er décembre 1870, et, au commencement de juillet 1871, une décision ministérielle le chargeait du service du sous-arrondissement minéralogique de Vesoul; mais, en même temps, M. Moissenet, qui avait apprécié, durant son séjour à l'École, ses aptitudes pour la chimie analytique, obtenait qu'il lui fût adjoint temporairement afin de suppléer, dans la conduite des travaux chimiques des élèves, dans la surveillance des laboratoires et du bureau d'essai, le professeur de chimie générale, M. Ad. Carnot, à qui ses fonctions de maître des requêtes près la Commission remplaçant le Conseil d'État, ne laissaient plus le temps de s'occuper que de son cours. Cette suppléance devait, un an plus tard, s'étendre également au cours de chimie générale, qu'Henry fut appelé, sur la proposition du Conseil de l'École, à professer durant toute la période scolaire 1872-1873, à la place de M. Carnot, chargé lui-même de remplacer M. Moissenet, que sa santé tenait à ce moment éloigné de sa chaire de docimasie.

Aussitôt attaché à l'École des Mines, et tout en se dévouant avec ardeur à la partie active de son service, Henry avait entrepris, sur la demande de M. Moissenet, de continuer les *Extraits de chimie* publiés par celui-ci

dans les *Annales des mines*, et de les remettre au courant: il put ainsi donner, dès le début de 1872 (*), une analyse substantielle de tous les travaux de chimie quelque peu importants parus durant les années 1865 à 1871 et ayant trait soit à la chimie pure, soit à la chimie analytique, à la chimie industrielle minérale, ou à la reproduction artificielle des minéraux. L'été venu, les vacances de l'École lui permirent d'obtenir, en vue de remplacer le voyage d'études si douloureusement interrompu deux années auparavant, une mission d'instruction en Autriche-Hongrie. Si la promotion n'était plus au complet comme pour le voyage de troisième année, notre ami Heurteau étant à ce moment en route pour l'exploration de la Nouvelle-Calédonie, du moins les deux compagnons de 1869 avaient pu se réunir, et, pour compléter les observations qu'ils avaient recueillies alors en Belgique et en Prusse Rhénane, ils débutaient par un séjour à Przibram, où Henry tenait à étudier de près les remarquables ateliers de préparation mécanique créés par M. de Rittinger. Il en publia, dès son retour, la description dans un mémoire spécial (**), qui forme la suite et le complément de celui qui avait été inséré en 1871 dans les *Annales des mines*.

Le reste du voyage fut consacré à un séjour à Schemnitz, où l'accueil sympathique fait aux deux ingénieurs français leur permit une exploration approfondie de toutes les mines du district, et une étude détaillée des intéressants gisements sur lesquels elles portent. Dans le travail qu'ils rédigèrent sur cette partie de leur mission et qui fut également accueilli par la Commission des *Annales* (***), il convient de mentionner comme exclusivement dus à

(*) *Ann. des mines*, 7e série, I (1872), p. 105-248.
(**) *Ibid.*, 7e série, II (1872), p. 272-304, pl. VIII-XI.
(***) *Ibid.*, 7e série, III (1873), p. 207-401, pl. VI-VIII.

Henry les intéressants résultats des recherches entreprises par lui sur la constitution chimique des roches de la région : l'analyse d'une longue série d'échantillons de grünsteins lui permit, notamment, d'établir la véritable nature des roches blanches qui forment les épontes des principaux filons de Schemnitz, et de montrer que, contrairement à l'opinion professée alors par certains auteurs des plus compétents, il ne fallait voir en elles que des grünsteins altérés, modifiés dans leur aspect par les émanations métallifères, et non point des rhyolites injectées dans la masse de grünstein.

Quelques mois plus tard, au printemps de 1873, Henry, qui venait de terminer ses leçons de chimie générale, mettait à profit les loisirs que lui laissait la période des examens de fin d'année de l'École des Mines pour se rendre en Algérie, où il allait étudier, pour le compte de l'industrie privée, divers gîtes de fer de la province d'Alger et de la province d'Oran. Il y trouvait l'occasion d'appliquer les belles observations de M. Moissenet sur la distribution des parties riches des filons, que leur auteur n'avait pas encore publiées, mais au courant desquelles il s'était plu, avec une flatteuse confiance, à mettre par anticipation son jeune collaborateur. Ce fut un véritable plaisir pour Henry de trouver, dans les filons massifs de Soumah, une éclatante vérification des lois qui lui avaient été révélées et de pouvoir, à la profonde stupéfaction du maître-mineur qui lui faisait visiter les travaux, reconnaître d'après la seule inspection des roches encaissantes, d'après les changements de pendage et de direction du filon, les points où celui-ci avait été trouvé bon, ceux où il avait été trouvé mauvais; il fut heureux, à son retour, autant que d'un succès personnel, de pouvoir rapporter au maître qui lui avait confié ses idées, l'hommage de la surprise admirative qu'il avait provoquée.

A peine était-il rentré à Paris qu'il dut le quitter de

nouveau, mais cette fois pour plusieurs années : une décision ministérielle du 14 juin 1873 venait de mettre fin à la situation provisoire qui durait depuis deux ans, et il lui fallait se rendre au poste, non pas de Vesoul, qui lui avait été assigné tout d'abord, mais de Rive-de-Gier. Il allait y trouver, comme compensation au regret qu'il éprouvait à laisser de côté ses travaux de chimie, un puissant aliment à son activité physique et intellectuelle, avec les nombreuses mines qu'il avait à visiter, et les importantes usines métallurgiques de la région, qui lui offraient les plus intéressants sujets d'étude. Il fut, d'ailleurs, au bout de peu de mois, attaché en outre au contrôle de la Compagnie de Paris-Lyon-Méditerranée, et ses visites aux ateliers d'Oullins, qui se trouvaient dans sa circonscription, devaient être pour lui l'occasion de s'initier à la construction du matériel des chemins de fer et de se familiariser avec cette branche de l'art de l'ingénieur.

Au moment où il arrivait à Rive-de-Gier, la question de la dynamite était à l'ordre du jour : un décret du 31 mai 1873 venait de fixer les prix de vente des différentes sortes de dynamites, et l'Assemblée nationale se préparait à discuter le projet de loi récemment présenté par le Gouvernement sur la fabrication de cet explosif, projet qui tendait à en concentrer définitivement le monopole entre les mains de l'État; les exploitants de mines se préoccupaient des conséquences d'un tel régime, en même temps qu'ils se plaignaient des prix trop élevés auxquels les dynamites leur étaient livrées. La Société de l'industrie minérale devait forcément s'intéresser à une aussi importante question, et elle ne tardait pas à en confier l'étude, sous la présidence de M. Tournaire, à une Commission spéciale, dont Henry était nommé rapporteur, à raison du travail qu'il avait publié sur ce sujet en 1871. Le remarquable rapport qu'il rédigea, et qui fut approuvé à l'unanimité par la Société dans sa séance

du 2 mai 1874 (*), établit, par une discussion approfondie, les conditions nécessaires pour que les exploitations françaises ne se trouvent pas placées dans une situation d'infériorité par rapport à leurs concurrentes de l'étranger, et il conclut à ce que la fabrication et la vente des dynamites soient déclarées libres, à ce que l'impôt soit notablement abaissé, ou même supprimé dès que le permettrait l'état des finances, et qu'enfin les dynamites fabriquées par l'industrie soient admises au transport par les chemins de fer. Il fut donné satisfaction à ces vœux d'abord par la loi du 8 mars 1875, puis, un peu plus tard, par l'arrêté ministériel du 10 janvier 1879, et c'est encore à l'un d'eux que s'est trouvé répondre, plus récemment, le décret du 12 juin 1890.

Quelques mois après la rédaction de ce rapport, Henry, désireux de répandre le plus possible la connaissance de ces nouveaux explosifs, qu'il était en France un des premiers à avoir pu apprécier, publiait dans le *Bulletin de la Société de l'industrie minérale* (**) une analyse détaillée de l'important travail que M. le capitaine Fritsch leur avait consacré en 1872; il la complétait, le cas échéant, par ses observations personnelles, et insistait spécialement sur les précautions à prendre dans la conservation et dans l'emploi des dynamites, tant pour éviter tout accident que pour obtenir le meilleur effet utile, précautions dont la plupart sont depuis lors devenues réglementaires.

L'accueil que sa valeur et son caractère avaient valu à Henry de la part des industriels de Rive-de-Gier n'avait pas tardé à lui permettre de suivre de près les questions métallurgiques alors à l'étude, et dont l'une des plus intéressantes était celle du puddlage mécanique par l'emploi des fours rotatifs; il fut ainsi mis à même d'assister,

(*) *Bull. Soc. ind. min.*, 2e série, III (1874), p. 193-212.
(**) *Ibid.*, IV (1875), p. 47-145, pl. II, *fig.* 1-11.

dans l'usine de Saint-Chamond, à toute la série des essais du four Pernot; et lorsqu'on fut arrivé à des résultats définitifs, il put donner aux *Annales des mines* (*) une description détaillée du nouveau four ainsi que de la marche des opérations suivant la nature du métal à obtenir, accompagnée, relativement au four Danks et au four Siemens-Martin, d'une série de chiffres comparatifs d'un haut intérêt.

Il rendit compte de même, l'année suivante (**), d'un travail d'une tout autre nature, mais non moins digne d'être noté, et au sujet duquel il n'omit qu'une chose, à savoir l'indication de la part qu'il y avait prise. La grande cheminée de 105 mètres de l'usine des Étaings, appartenant à MM. Marrel, s'était infléchie à tel point qu'on songeait, pour en conjurer la ruine, à en démolir toute la moitié supérieure; Henry pensa qu'on pourrait peut-être la redresser au moyen de traits de scie convenablement disposés : après en avoir relevé le profil par une méthode aussi simple qu'ingénieuse, il put déterminer la position et l'étendue à donner à ces traits de scie, et l'opération entreprise d'après ses conseils fut couronnée d'un plein succès.

A la fin de l'année 1875, la compétence reconnue d'Henry le faisait désigner, sur la demande du directeur de l'École des mineurs de Saint-Étienne, pour occuper par intérim la chaire de chimie et de métallurgie laissée vacante par le départ de M. Vicaire; il apporta dans ces leçons, qu'il fit pendant deux années, les qualités de méthode et de netteté, si précieuses pour un professeur, dont il avait déjà fait preuve dans sa suppléance de 1872-1873 à l'École des Mines de Paris; mais la réunion d'un tel cours et du service ordinaire de Rive-de-Gier, très étendu et très chargé, constituait un fardeau fort lourd,

(*) *Ann. des mines*, 7e série, VI (1874), p. 65-113, pl. III-IV.
(**) *Bull. Soc. ind. min.*, 2e série, IV (1875), p. 37-45, pl. I, *fig.* 4 et 5.

et si, grâce à sa vigueur et à sa puissance de travail, il put le supporter aussi longtemps, ce ne fut pas sans en ressentir le poids et sans en souffrir quelque peu dans sa santé. C'est en effet aux fatigues du professorat combinées avec les suites d'un refroidissement contracté dans une des mines de Rive-de-Gier, que doit être imputée une laryngite chronique qui, dès le commencement de l'année 1878, l'obligeait à aller faire une saison à Amélie-les-Bains, et dont il ne devait jamais parvenir à se débarrasser complètement.

Il avait, en juin 1876, après l'achèvement de sa première année de cours à l'École de Saint-Étienne, fait, en compagnie de M. Arbel, l'éminent maître de forges de Rive-de-Gier, une rapide excursion en Amérique pour visiter l'exposition de Philadelphie, et ce voyage avait été pour lui, je ne puis m'abstenir de le rappeler, l'occasion d'un véritable succès devant la Société des ingénieurs américains : assistant un jour à une réunion de celle-ci, il avait dû, presque à l'improviste, pressé par d'instantes demandes, faire sur l'exploitation de la houille et sur la métallurgie du fer dans le bassin de la Loire une sorte de conférence, dans laquelle la précision et la clarté de ses explications furent vivement appréciées de ses nombreux auditeurs et lui valurent d'unanimes applaudissements. Il profita, de son côté, de l'accueil qui lui était fait pour étudier, aussi complètement que le lui permit le peu de temps dont il disposait, les mines et les usines métallurgiques de Pennsylvanie, et il put ainsi rapporter en France des notes d'un sérieux intérêt sur la fabrication des rails Bessemer aux États-Unis (*), particulièrement dans les usines d'Edgar Thomson et de Bethléhem, sur le *Pays de l'huile* (**) et ses gisements de pétrole, sur les bassins

(*) *Bull. Soc. ind. min.*, 2e sér., VI (1877), p. 767-786, pl. XLVIII-L.
(**) *Ibid.*, VII (1878), p. 135-143, pl. VII.

anthracifères de Pennsylvanie (*) et sur leur exploitation.

En outre de ce voyage, le séjour de Rive-de-Gier fut coupé pour Henry par trois ou quatre missions industrielles en Algérie, où il fut envoyé notamment par la Compagnie de l'Horme pour explorer divers gîtes ferrifères de la province d'Alger et de la province de Constantine ; il s'était, dès sa première visite de 1873, attaché vivement à ce beau pays et à l'étude de ses richessès minérales, et il y retournait chaque fois avec un plaisir nouveau.

Ce ne furent pas là, du reste, les seuls appels qui lui furent adressés par l'industrie ; il avait été l'objet, dans le courant de 1876, d'une proposition singulièrement flatteuse, si l'on songe qu'il venait à peine d'accomplir sa trentième année, et qui prouve en quelle estime il était tenu dans la Loire : son nom avait été mis en avant, sans qu'il l'eût en rien sollicité, pour la direction d'une grande Compagnie houillère, et l'on était venu lui demander son acceptation ; mais le changement d'organisation auquel était liée sa nomination à ce poste, et qui consistait à réunir entre les mains du nouveau directeur à la fois les services techniques et les services commerciaux de la Compagnie, fut, à la suite de longues délibérations, et après de vives compétitions auxquelles il demeura résolument étranger, écarté finalement par le Conseil d'administration. Il n'en resta à Henry que le souvenir de la haute confiance que lui avaient témoignée ceux des administrateurs qui avaient songé à lui, et s'il ne vit pas échapper sans quelque sentiment de regret la brillante position qu'on lui avait fait entrevoir et que la pensée de sa famille devait lui faire désirer, il était, comme il le disait lui-même, à un âge où l'on doit regarder en avant et non pas en arrière.

Cette foi dans l'avenir était justifiée, car moins de deux

(*) *Bull. Soc. ind. min.*, 2e série, VII (1878), p. 595-610, pl. XXV-XXVI.

ans plus tard, dès les premiers mois de 1878, de nouvelles offres lui étaient faites presque simultanément, d'un côté par une importante Société ayant son siège à l'étranger, de l'autre par la Compagnie de Paris-Lyon-Méditerranée, celles-ci absolument fermes et particulièrement pressantes. Bien que la situation qu'il devait définitivement occuper n'eût pu lui être à l'avance exactement précisée, sa résolution fut vite prise : les questions de chemins de fer l'intéressaient depuis longtemps, il sentait ce qu'il pouvait donner, il savait à quel excellent appréciateur des hommes il aurait affaire dans le chef qui lui demandait sa collaboration, et, le 1er mai 1878, il se faisait mettre en congé illimité pour entrer à la Compagnie P.-L.-M. comme attaché à la direction de l'exploitation.

Il passait d'abord dans les différents services pour en étudier les principaux rouages et en bien connaître le fonctionnement; puis, après quelques mois de cette espèce de stage, il était placé définitivement sous les ordres de l'ingénieur en chef du matériel et de la traction, M. Marié, qui s'était rendu compte de ce qu'il pouvait attendre de son concours, et dont il devenait aussitôt l'adjoint.

La première question importante dont il eut à s'occuper fut celle des freins continus. Les essais faits sur le frein à vide Smith-Hardy et sur le frein Westinghouse avaient laissé M. Marié hésitant, à raison des critiques que tous deux lui paraissaient mériter : le premier avait pour lui la modérabilité et la simplicité des organes, le second l'automaticité et la rapidité ainsi que la simultanéité de son action sur tous les véhicules; mais les avantages de l'un faisaient défaut à l'autre, et si l'automaticité paraissait indispensable, la modérabilité semblait aussi fort utile sur un réseau qui, comme celui de P.-L.-M., comporte de longues et nombreuses sections à fortes déclivités; le risque, pour le système Westinghouse, de fonctionnement intempestif, et, dans ce cas, la difficulté du desserrage, constituaient également pour M. Marié un motif de sérieuses préoccupations. Henry ne tarda pas à présenter à son chef un système complètement étudié, dont il mûrissait l'idée depuis quelque temps déjà, et qui devait donner satisfaction à tous ces *desiderata :* c'était un frein à double conduite, à la fois automatique et modérable, à action instantanée comme le Westinghouse, et agencé de telle sorte qu'en cas de fonctionnement intempestif, la mise en action, par le mécanicien, du frein modérable permît le desserrage et l'annulation du frein automatique, et par conséquent la remise en marche pour ainsi dire sans arrêt.

Un autre projet avait été soumis vers la même époque à M. Marié par M. Wenger, alors ingénieur de la Compagnie; mais, tel qu'il était alors conçu, s'il comportait, comme celui d'Henry, le double avantage de l'automaticité et de la modérabilité, avec la même complication d'une double conduite (*), il lui était inférieur au point de vue de la rapidité et de la simultanéité du serrage; de plus l'étanchéité paraissait difficile à obtenir; enfin les risques et les inconvénients d'un serrage intempestif y étaient les mêmes qu'avec le frein Westinghouse.

D'autre part, à peine Henry avait-il pris pour son système un brevet, sur lequel il abandonnait d'ailleurs tous ses droits à la Compagnie, que M. Westinghouse venait proposer à celle-ci de s'en rendre acquéreur pour le combiner avec les siens, et de lui céder ensuite pour le réseau P.-L.-M. la jouissance des uns et des autres. Dans de telles conditions, l'hésitation ne devait pas être longue : les organes essentiels du frein Westinghouse avaient fait leurs preuves comme fonctionnement et comme facilité d'entretien; l'invention d'Henry permettait, sans y rien modifier, et avec une faible augmentation de dépenses, de 6 à 6,5 p. 100, d'en conserver les avantages en y ajou-

(*) Voir *Ann. des mines*, 8e série, II (1882), p. 116, 124, 126.

tant ceux d'un frein modérable et d'un desserrage rapide en cas de fonctionnement intempestif, constituant ainsi une solution absolument complète du problème tel qu'il avait été posé ; elle assurait de plus à la Compagnie, grâce à la convention proposée par M. Westinghouse, des conditions particulièrement avantageuses pour l'application à son matériel des appareils à livrer par lui. Le nouveau frein ainsi constitué ayant, d'ailleurs, aux essais pratiques, donné des résultats de tout point satisfaisants, l'application en fut décidée, à la fin de l'année 1880, d'abord et immédiatement à tout le matériel des trains directs, express et rapides, ainsi que des trains de banlieue, et en principe à tout l'ensemble du matériel des trains de voyageurs.

Vers le milieu de 1882, Henry perdait, en la personne de M. Marié, un chef auquel il s'était profondément attaché durant ces trois années de collaboration, qui avaient créé entre eux les rapports les plus intimes, et il était appelé à prendre après lui le lourd fardeau de la direction de ce grand et complexe service du matériel et de la traction. A la fin de la même année, il était, sur la proposition du Ministre de la guerre, fait chevalier de la Légion d'honneur. Le plaisir qu'il éprouva à recevoir cette distinction ne laissa pas d'être obscurci par le regret de ne pouvoir le partager avec ceux à qui il rapportait la brillante carrière parcourue par lui et qu'il avait aimé à associer à tout ce qui lui arrivait d'heureux : il avait, dès 1877, vu s'éteindre son vieil ami M. Prugneaux, et il avait eu, dans les derniers jours d'octobre 1881, le profond chagrin de perdre son père ; l'un et l'autre du moins avaient pu jouir de leur œuvre, et les lourds sacrifices que ce dernier avait faits jadis avaient trouvé toutes leurs récompenses.

Ce que fut Henry comme ingénieur en chef du matériel et de la traction de la Compagnie P.-L.-M., je n'aurais pour le dire en peu de mots qu'à reproduire quelques-unes des éloquentes paroles prononcées sur sa tombe par

M. Noblemaire (*) : « Pas une de ces dix années qui n'ait été marquée par une découverte nouvelle, une réforme, un perfectionnement, lentement étudié, mais réalisé avec une sûreté, une précision, qui ne laissaient jamais place à l'erreur et n'ont jamais comporté de rectification ultérieure ». C'était là, en effet, l'un des traits caractéristiques de sa méthode de travail et qui ne pouvait être plus justement apprécié : ne rien livrer au hasard, étudier chaque question à fond et sous toutes ses faces, contrôler expérimentalement les résultats de la théorie, et ne donner une solution que quand il pouvait vraiment la regarder comme définitive. Se gardant de rien annoncer qu'il ne fût absolument certain de réaliser, s'il a pu sembler parfois à ceux qui ne le connaissaient pas aussi bien que son éminent directeur, peu empressé à entrer dans la voie de certaines modifications et à tenir compte de certains conseils, c'est qu'ayant la responsabilité d'intérêts considérables, il ne voulait toucher qu'en parfaite connaissance de cause à l'œuvre de son prédécesseur : il mûrissait silencieusement son plan, dans lequel chaque détail devait venir à son heure, et dont la réalisation devait montrer combien il était soucieux de tout progrès.

Avant d'arrêter de nouveaux types de machines, et afin de pouvoir les approprier exactement aux services auxquels ils devaient être respectivement affectés, il avait tenu à entreprendre une étude méthodique approfondie, devant les difficultés de laquelle plus d'un eût à sa place reculé. Je ne puis que rappeler ici, sans entrer dans le détail, les ingénieuses expériences instituées par lui sur les principaux types de locomotives en usage dans les divers réseaux, et qui consistaient, pour chaque type, d'une part dans la détermination des déplacements, transversaux et longitudinaux, de la machine librement sus-

(*) *Ann. des mines*, 9e série, I (1892), p. 283.

pendue en l'air et marchant à différentes allures, d'autre part dans des essais de vitesse et de puissance, les uns en charge et les autres sans charge.

Une autre série d'expériences, peut-être plus complètes encore, avait eu pour but l'étude de la vaporisation dans les chaudières de locomotives, et la détermination des meilleures dispositions à donner au foyer, du nombre et de la longueur à adopter pour les tubes de fumée, ainsi que de l'influence du tirage sur la puissance de la machine. Les premiers résultats de ce travail avaient été publiés par Henry à l'occasion du Congrès international de 1889 (*), et l'intérêt pratique en avait été hautement apprécié par tous les ingénieurs de chemins de fer. Il ne le considérait cependant pas comme terminé, il avait fait procéder à des expériences nouvelles, et il se proposait d'en donner dans les *Annales des mines* le compte rendu détaillé, avec les conclusions définitives auxquelles il était arrivé; les notes qu'il a laissées permettront, du moins, à ses excellents et dévoués collaborateurs de réaliser à cet égard l'intention qu'il avait exprimée.

Mettant à profit les résultats de cette longue série d'études, il avait arrêté et fait construire tout d'abord trois types nouveaux de locomotives, qui furent mis en service, à titre d'essai, au commencement de l'année 1889, et dont les deux principaux figurèrent à l'Exposition: l'un destiné aux trains de voyageurs à grande vitesse, le second aux trains de voyageurs et de marchandises des lignes à fortes rampes, le troisième aux trains de marchandises des lignes faciles à grand trafic, ainsi qu'aux trains de voyageurs et mixtes des lignes à rampes susceptibles d'atteindre 20 millimètres. Tous trois étaient du système compound, mais avec des dispositions spéciales longuement élaborées : par suite d'une série de

(*) *Congrès international des ch. de fer*, 3e session. *Compte rendu général*, vol. II, question XII, p. 235-259, pl. LX et LXI.

considérations relatives tant à la puissance à obtenir qu'à l'économie de combustible, le timbre de la chaudière avait été élevé à 15 kilogrammes, et le nombre des cylindres avait été porté à quatre, les deux cylindres d'admission agissant sur un essieu, et les deux cylindres de détente sur un autre; les volumes de ces cylindres étaient calculés de manière à ce que chacun donnât le même effort, et l'accouplement des deux essieux moteurs dans une position relative invariable avait permis d'augmenter dans une proportion considérable le minimum des moments moteurs au démarrage, de même que de resserrer entre des limites plus étroites la variation de ces moments pendant la marche; en même temps, les perturbations dues tant aux forces d'inertie qu'à l'obliquité des bielles, avaient été réduites dans une importante mesure, et avec elles les réactions exercées sur la voie.

La continuation de ses expériences sur la vaporisation devait encore, d'ailleurs, conduire Henry à de nouveaux perfectionnements; grâce à l'adoption des tubes à ailettes, et à la diminution de longueur qui en est résultée pour la chaudière, ainsi qu'à l'emploi des tôles d'acier pour le foyer, il est parvenu à obtenir à la fois une légèreté plus grande et une puissance plus considérable : deux nouveaux types à grande vitesse ont été ainsi créés, qui n'ont été terminés et mis en service que dans le courant de 1892, alors qu'Henry, qui les avait étudiés, n'était déjà plus là pour voir la réalisation de l'œuvre qu'il avait conçue; ils ont, de plus, sur les machines à grande vitesse de 1889, l'avantage de réactions transversales et verticales encore plus réduites, résultant d'une modification de la position relative des cylindres et des essieux.

Je ne puis me dispenser de mentionner, en outre de ces études si remarquables sur les machines locomotives, celles qu'il entreprit à diverses époques sur des questions d'un intérêt moins captivant, mais dont il avait

apprécié l'importance, telles, d'une part, que le graissage des machines et des véhicules, et l'emploi des charbons menus, d'autre part; les essais auxquels il fit procéder, avec la méthode et la sûreté dont il était coutumier, ont abouti, pour la Compagnie, aux plus sérieuses économies, montant, de ce dernier chef seulement, à un chiffre annuel de près de deux millions de francs.

Je dois rappeler encore, sans pouvoir tout citer, la suite donnée par lui au plan conçu par M. Marié relativement à la réduction du nombre des dépôts, et qui se traduisit, pour la seule ligne de Paris à Marseille, grâce à la meilleure utilisation du personnel et du matériel, par une économie finale de 60 à 70 machines. C'est au même ordre idées que se rattache l'expérimentation qu'il fit faire du système de la double équipe et de celui des machines banales, l'un et l'autre alors préconisés en Amérique, et qui lui permit de conclure, avec des chiffres formels, à l'avantage du maintien de la simple équipe.

Enfin, je ne saurais passer sous silence les heureuses dispositions données par lui aux trains d'amublance militaires qu'il a eu à organiser sur la demande du Ministère de la guerre, et dont il est arrivé à doubler la capacité, comparativement aux trains similaires d'un même nombre de voitures organisés précédemment sur d'autres réseaux, grâce au choix du matériel qu'il y a affecté et aux aménagements de détail qu'il a lui-même combinés.

Dans toutes les branches de cet immense service du matériel et de la traction, Henry s'est, en un mot, montré un maître, et les comptes rendus des Congrès internationaux tenus en 1887 et en 1889, à Milan et à Paris, aux discussions desquels il prit une part des plus actives, témoignent de l'intérêt avec lequel ses communications sur tous les sujets qu'il avait étudiés étaient accueillies par ses collègues de la France et de l'étranger. En même temps à la valeur technique s'ajoutaient chez lui toutes

les qualités nécessaires au commandement de la nombreuse armée de travailleurs qu'il avait à diriger : à la fois ferme et bienveillant, il avait su se faire aimer de tout son personnel par sa profonde équité, par sa constante sollicitude pour les intérêts de tous, depuis les premiers jusqu'aux plus modestes de ses subordonnés.

Au milieu de toutes ses occupations, si multiples et si absorbantes, d'ingénieur de chemins de fer, Henry n'oubliait pas qu'il avait été mineur, et il était heureux d'en exercer le métier, quand l'occasion s'en présentait, aux houillères de la Chazotte, qui, appartenant à la Compagnie P.-L.-M., se trouvaient faire partie intégrante de son service; il ne cessa d'en surveiller de près l'exploitation avec toutes ses annexes, et l'on a pu voir figurer à l'Exposition de 1889 une remarquable machine à agglomérer les briquettes, qui était son œuvre absolument personnelle.

Lorsqu'en 1888 fut reconstitué le Conseil de perfectionnement de l'École des mines de Saint-Étienne, il se trouvait ainsi désigné de toutes manières pour y représenter l'industrie, et pendant les trois dernières années de sa vie il fut appelé à siéger dans ce Conseil.

A différentes reprises, du reste, sa compétence l'avait fait désigner comme membre de diverses Commissions, soit par le Ministère des travaux publics, pour la Commission chargée de rechercher les perfectionnements réalisables dans le matériel roulant et dans le service des agents de chemins de fer, soit par le Ministère du commerce et de l'industrie, pour la Commission d'examen des projets d'un chemin de fer à l'Exposition de 1889, comme pour les Comités d'admission et d'installation de cette même Exposition, et pour le Conseil supérieur du travail. A la fin de 1888, il avait été présenté par le syndicat du chemin de fer de ceinture pour prendre au Comité de l'exploitation technique la place laissée vacante par la mort de M. Delebecque, et il en fit partie jusqu'au jour

jour où la nouvelle organisation de 1891 en élimina les représentants des grandes Compagnies. Enfin, en 1886, l'Administration supérieure, en lui conférant le grade d'ingénieur en chef des mines, lui avait montré que son passage dans l'industrie ne l'avait pas fait oublier et qu'elle rendait justice à ses mérites.

Il pouvait regarder avec fierté en arrière, et un passé aussi brillant permettait de penser que pour lui l'avenir n'avait pas dit son dernier mot : à quelle destinée ne semblait-il pas appelé, avec les éminentes qualités dont il avait fait preuve, avec l'estime et l'affection qu'il avait inspirées à son directeur, avec la longue carrière sur laquelle on était en droit de compter pour lui ? Sa robuste constitution paraissait incapable de plier jamais sous le poids du travail; et cependant peut-être aurait-elle, en raison de sa vigueur même, exigé un plus juste équilibre entre la dépense intellectuelle et la dépense physique; rien néanmoins n'avait pu faire pressentir l'atteinte qu'allait tout à coup recevoir sa santé. Au printemps de 1890, une phlébite grave le forçait brusquement à prendre le lit, mais sans parvenir à lui faire interrompre l'étude des affaires qui lui étaient confiées; mettant au contraire à profit les longues heures de calme que lui assurait cet éloignement forcé de son bureau, il s'attacha à utiliser cette pénible période d'immobilité pour élaborer et rédiger un travail considérable qui lui avait été demandé par le Comité de ceinture et qui consistait dans la détermination des prix de traction des trains de voyageurs et de marchandises sur les lignes de petite et de grande ceinture (*), travail le plus complet sans doute qui ait été fait sur la question des dépenses de traction. La convalescence arriva au moment où il y mettait la dernière

(*) *Ch. de fer de ceinture. Dépenses de traction. Rapport à M. le Président du Comité de ceinture*, par M. A. Henry, 51 p., tableaux A-Z.

main; mais bientôt après de nouveaux accidents se produisirent, du côté du cœur, puis de la poitrine, et après une saison au mois d'octobre à Amélie-les-Bains, il dut se résigner à aller passer l'hiver à Menton. Ce fut pour lui une cruelle épreuve, de laisser ainsi de côté pour plusieurs mois le service auquel il s'était jusqu'alors consacré; elle lui fut du moins adoucie par la pensée qu'il le remettait en bonnes mains, et pendant toute la durée de son absence l'amitié dévouée de son adjoint, M. Baudry, qui le tenait au courant des principales questions, tout en prenant soin de lui atténuer ce qui aurait pu lui causer des soucis ou des préoccupations, lui permit de suivre de loin les affaires traitées et de se tenir prêt à en ressaisir les rênes dès que sa santé le lui permettrait. Il comptait, comme il le disait lui-même, sur sa vigoureuse constitution de campagnard pour prendre le dessus et triompher du mal; pourtant, par moments, il ne pouvait s'empêcher de se laisser envahir par les plus tristes pensées, et, comme le rappelait M. Noblemaire (*), de se demander si cette maladie n'était pas une punition de l'ambition qu'il avait eue, à vouloir sortir de son orbite : « Paysan j'étais, » écrivait-il à la fin de cette triste année 1890, « paysan j'aurais dû rester ! » Il se préoccupait, non de lui-même, mais des siens, des nombreux enfants de sa sœur aînée, restés orphelins en 1887, de tous ceux à qui il se sentait si nécessaire, et pour longtemps encore.

Cependant une amélioration notable, survenue en peu de jours dans le courant du mois de mars 1891, lui avait rendu confiance, et lorsqu'il revint à Paris, au commencement de mai, il ne doutait pas que ce fût pour se remettre bientôt à la besogne. Il put en effet reprendre ses occupations, et même d'une façon presque régulière : mais l'illusion qu'il s'était faite un moment, d'un retour

(*) *Ann. des mines*, 9e série, I (1892), p. 284.

rapide et définitif à la santé, ne tardait pas à lui être enlevée par de nouveaux assauts de la maladie, qui semblait ne pouvoir terrasser un corps aussi robuste qu'en s'y reprenant à plusieurs fois et en s'attaquant successivement à tous les organes. L'été s'écoula ainsi pour lui dans une série alternative d'espoirs et de découragements ; et quand il dut repartir pour Amélie-les-Bains, dans les premiers jours de novembre, navré d'abandonner encore une fois son service, c'était pourtant, grâce aux assurances dont on le berçait, avec la pensée qu'un nouveau séjour dans le Midi finirait par avoir raison du mal dont il souffrait. Il emportait là-bas les éléments du mémoire qu'il voulait donner aux *Annales* sur les expériences relatives à la vaporisation dans les chaudières de locomotives, et il me confirmait, vers la fin de l'année, son intention d'en commencer très prochainement la rédaction. Il éprouvait en effet un mieux sensible, et ses deux collaborateurs et amis, MM. Baudry et Chabal, qui le virent le 17 janvier à Marseille, purent se réjouir avec lui des progrès accomplis ; mais quand il leur dit adieu, pour se diriger sur Menton, il ne put retenir les larmes qui lui vinrent aux yeux, comme s'il avait deviné que c'était là l'adieu définitif, comme s'il avait senti se briser, dans cette suprême poignée de main, le dernier lien qui le rattachait à ce service auquel il s'était donné tout entier.

A peine était-il installé à Menton, que de nouvelles complications se déclaraient, et le 25 janvier 1892 il était brusquement enlevé à l'affection des siens.

Il repose aujourd'hui dans le cimetière de ce petit village de Barizey-au-Plain, où s'était écoulée son enfance et auquel il était demeuré profondément attaché ; mais le souvenir de cette belle intelligence, de cette nature foncièrement droite et sympathique, reste vivant dans le cœur de ses amis.

NOTE

SUR LE

SYSTÈME DE DISTRIBUTION DE VAPEUR

A

TIROIRS D'ADMISSION ET D'ÉCHAPPEMENT INDÉPENDANTS

APPLIQUÉ A DES LOCOMOTIVES

DE LA COMPAGNIE DU CHEMIN DE FER DE PARIS A ORLÉANS

Par M. E. POLONCEAU,
Ingénieur en chef du matériel et de la traction
au Chemin de fer de Paris à Orléans.

Afin de bien faire ressortir les qualités essentielles qui caractérisent cette nouvelle distribution, il est nécessaire de passer en revue, d'une façon très succincte, les principales dispositions en usage sur les locomotives.

Depuis la coulisse de Stephenson qui est d'ailleurs encore usitée, les distributions qui ont été appliquées sont celles de Gooch, Allan, Walschaert, Joy, Solms, Strong, Stevens, Deprez et J. Garnier ; tous ces systèmes diffèrent surtout entre eux par les moyens mécaniques employés pour produire le mouvement du tiroir et le renversement de la marche, mais ils ne permettent pas de faire varier sensiblement les différentes phases constituant le cycle de la transformation de la chaleur en travail moteur.

On peut donc dire que ces différents mécanismes n'ont pas produit d'amélioration sensible au point de vue de l'utilisation de la vapeur et par conséquent au point de vue de la consommation de combustible.

Depuis longtemps d'ailleurs, des recherches sont faites dans ce but; M. Camille Polonceau avait imaginé et appliqué, en 1858, sur une locomotive du chemin de fer d'Orléans, une distribution présentant une grande analogie avec la distribution Meyer employée dans les machines fixes (voir Pl. VII, *fig.* 6).

Les deux excentriques ordinaires de la marche en avant et de la marche en arrière conduisent une double coulisse composée de deux coulisses ordinaires accolées et ne faisant qu'une seule pièce.

Le tiroir A et la plaque B sont actionnés chacun par le coulisseau de l'une des coulisses; chaque coulisseau est manœuvré par un levier spécial de changement de marche.

Le tiroir est exactement dans les conditions du tiroir ordinaire et agit de la même manière. Au delà de ses bords extrêmes se trouvent deux lumières de mêmes dimensions que celles du cylindre; le second tiroir n'est qu'une plaque de fonte dont la longueur est exactement celle laissée entre les orifices supérieurs des deux lumières du tiroir inférieur.

Le tiroir A sert à l'échappement; la plaque B n'est destinée qu'à régler les introductions, elle produit la détente. On comprend dès lors qu'en plaçant le levier d'échappement au point extrême de sa course et en manœuvrant seulement la plaque d'introduction on peut obtenir des détentes variables pour des compressions et des échappements constants; ces derniers peuvent d'ailleurs être augmentés ou diminués à volonté par la manœuvre du levier qui commande le tiroir.

Du mouvement combiné du tiroir et de la plaque, il

résulte que les ouvertures de lumières sont très grandes et après être restées longtemps ouvertes sont brusquement fermées par la marche contraire des deux tiroirs.

Pour renverser la marche, il suffit de changer la position du levier d'échappement sans toucher à celui d'introduction, et en rendant les deux tiroirs solidaires et les manœuvrant ensemble, on se trouve exactement dans les conditions d'une machine ordinaire.

Les résultats obtenus ne furent pas satisfaisants : car l'économie réalisée ne compensait pas la perte de travail résultant du frottement des deux tiroirs et les inconvénients dus à la complication du mécanisme. Il faut d'ailleurs remarquer qu'à cette époque la pression de la vapeur était bien moins élevée qu'actuellement. Avec les hautes pressions employées aujourd'hui, les distributions ordinaires à un seul tiroir laissent échapper la vapeur dans l'atmosphère à une pression élevée; il en résulte une grande perte d'effet utile; aussi toutes les compagnies de chemins de fer en France et à l'étranger se préoccupent-elles, depuis plusieurs années, d'obtenir une meilleure utilisation de la vapeur dans les locomotives.

Beaucoup d'entre elles ont cherché le remède dans le système compound. Ce système serait certainement économique pour des machines dont le travail est à peu près constant, mais il perd la plus grande partie de ses avantages quand le travail à produire s'écarte notablement de celui pour lequel il a été établi.

D'ailleurs, si les machines compound ont pu donner des résultats avantageux sur un certain nombre de lignes, on peut dire que leur emploi n'est pas toujours économique. En 1878, la compagnie d'Orléans a essayé ce système sur une de ses locomotives à grande vitesse et les résultats n'ont pas été avantageux. Nous en avons encore un exemple dans les résultats que nous avons pu connaître sur les expériences qui ont été faites en 1890 sur

la ligne de Paris à Laroche, où figurait une machine compound.

Le système compound ne nous paraît donc pas devoir être considéré comme l'*ultima ratio* pour les locomotives dont la puissance de traction doit avoir de très grandes variations.

Il est possible que ce système arrive à prouver sa supériorité; mais jusqu'à présent je n'ai vu aucune de ces machines donner des résultats que l'on ne puisse atteindre avec des machines ordinaires.

Il faut aussi tenir compte de la complication du mécanisme; ainsi dans les locomotives à quatre cylindres fonctionnant en compound, on retrouve en double tous les organes d'une locomotive ordinaire.

Il est à remarquer également que le système compound exige une transformation plus ou moins complète de la locomotive; souvent même il ne peut s'appliquer qu'à des machines nouvelles et on ne peut songer, vu la dépense, à appliquer ce système à toutes les locomotives existantes.

Il paraît donc bien plus simple de chercher à améliorer les conditions d'utilisation de la vapeur par le seul remplacement des cylindres et d'une partie du mécanisme de distribution, ce qui occasionne une dépense d'environ 2.000 francs par machine.

Il ne paraît pas douteux d'ailleurs que l'on puisse obtenir sur les locomotives les avantages qui se sont immédiatement révélés dans les machines fixes dès qu'on eut l'idée de substituer au tiroir simple des distributions perfectionnées telles que celles de Meyer, Corliss, Sulzer, etc....

Cependant on doit remarquer que les systèmes de distribution par chocs et déclics qui fonctionnent bien dans les machines fixes marchant à une faible vitesse semblent bien fragiles pour des locomotives qui marchent à des vitesses de plus de 100 kilomètres à l'heure, ce qui

correspond à environ 300 révolutions par minute; soit à 600 introductions et à 600 échappements par minute et produit 1.200 chocs par minute ou $\frac{1.200}{60} = 20$ par seconde; cela paraît irréalisable en pratique.

Les distributions à coulisse comportant des organes simples et robustes à mouvement continu sont bien préférables eu égard à la sécurité absolue que réclament les services publics.

Ce sont les considérations qui précèdent qui décidèrent la compagnie d'Orléans à essayer le système de distribution dont la description est relatée ci-après et qui a été proposé par MM. Durant et Lencauchez.

Le but cherché était, tout en conservant la coulisse, d'augmenter l'effet utile de la vapeur en prolongeant la détente et en réglant convenablement la compression.

Le moyen d'y arriver consistait à disposer des tiroirs indépendants pour l'admission et pour l'échappement.

La première disposition essayée en 1887 est représentée dans la *fig.* 1, Pl. VII.

Le tiroir d'introduction reçoit le mouvement par l'intermédiaire de la coulisse Gooch, celle-ci étant actionnée par deux excentriques comme dans les machines ordinaires.

Ce tiroir présente certaines particularités de construction qui ont pour objet de l'équilibrer en partie et de doubler la section de la lumière d'introduction (voir Pl. VIII, *fig.* 8 et 9).

« A cet effet la table du cylindre présente entre les « deux lumières aboutissant à chaque fond de cylindre « un évidement qui est en communication avec la boîte « à vapeur. De plus, deux encoches pratiquées dans le « tiroir permettent à la vapeur d'y pénétrer quand elles « se présentent au-dessus des encoches ou des lumières « de la table du cylindre. On conçoit donc que le tiroir

« ne supporte plus que la pression qui correspond aux « parties en contact avec la table du cylindre : il est dé- « chargé d'environ 50 p. 100 (*). »

Le tiroir spécial d'échappement reçoit un mouvement alternatif au moyen de la crosse de piston. Il est appuyé sur la glace par la vapeur prise dans la boîte d'introduction et détendue à une pression de 3 à $3^{kg},5$ par l'intermédiaire d'un détendeur spécial.

Les phases de l'admission sont les mêmes que pour les tiroirs ordinaires, mais l'avance à l'échappement est constante pour tous les crans de marche ; elle est de 22 p. 100 de la course du piston et, par suite de la symétrie, la compression commence après 22 p. 100 de la course rétrograde. On obvie ainsi à l'inconvénient des distributions ordinaires qui, à la marche au point mort, ont une avance à l'échappement et une compression de 50 p. 100 environ de la course. On obtient donc pour la marche au point mort 28 p. 100 de détente en plus et on limite à 44 p. 100 la durée de l'échappement qui a généralement pour valeur une course de piston.

Il y a donc 56 p. 100 de temps en moins pour la communication du cylindre avec l'atmosphère. La pression de la vapeur à la fin de la compression correspond théoriquement à la pression de la chaudière.

Il y avait donc lieu d'espérer une augmentation de travail de la vapeur par :

1° Le prolongement de la détente ;

2° La diminution du temps de l'échappement et par suite diminution du refroidissement des cylindres ;

3° La diminution de la chute de pression résultant et de la double introduction et d'espaces nuisibles mieux remplis.

(*) Extrait du *Bulletin* de juin 1890 de la *Société des Ingénieurs civils*. Mémoire de MM. Durant et Lencauchez, page 75.

A faibles vitesses, tout allait bien, mais aux grandes vitesses le temps d'échappement était trop faible, une contre-pression sensible se manifestait et il en résultait aux fins de course une pression beaucoup trop élevée qui soulevait les tiroirs et produisait un travail résistant beaucoup plus grand que celui qui est nécessaire pour amortir les chocs et remplir les espaces nuisibles. Comme ce travail résistant n'était récupéré que pour une faible partie (50 p. 100 environ) l'économie due aux autres avantages était rendue nulle par cette grande compression qui; de plus, donnait lieu à des difficultés de démarrage et augmentait la durée de la mise en vitesse de la machine.

La *fig.* 2, Pl. VII, représente la deuxième application de la nouvelle distribution.

Les différences qui existent avec le type précédent sont les suivantes :

1° Les tiroirs d'échappement sont cylindriques et placés aux fonds de course ;

2° Les cylindres sont d'un diamètre plus grand.

Cet essai avait pour but de permettre l'emploi de tiroirs d'échappement sans être obligé d'avoir recours au détendeur et d'atténuer les effets de la compression par une augmentation de puissance positive.

Les phases de la distribution sont sensiblement les mêmes que dans le cas précédent.

Malgré l'amélioration obtenue, la compression a encore été trop forte et les résultats pratiques n'ont pas été économiques.

En résumé, ces deux premiers essais ont démontré que les fortes compressions sont incompatibles avec la marche des locomotives à grande vitesse.

On a donc été conduit à chercher une disposition nouvelle permettant de diminuer la période de compression tout en prolongeant celle de la détente.

Le dispositif auquel on s'est arrêté consiste à faire jouer dans la même coulisse les deux bielles de commande des deux tiroirs d'admission et d'échappement, ces deux bielles étant reliées entre elles par des bielles entretoises de connexion de longueur déterminée et étant déplacées en même temps par le même arbre de changement de marche.

Les deux machines 67 et 76 qui avaient les dispositions déjà décrites ont été transformées.

La machine 67 suivant Pl. VII, *fig.* 3.

— 76 — Pl. VII, *fig.* 4.

Le mécanisme de la machine 67 comporte un balancier type Evans et celui de la machine 76 un renvoi de mouvement par levier d'équerre.

Dans la machine 67 l'échappement anticipé au point mort commence à 25 p. 100 de la fin de la course du piston et la compression commence à environ 30 p. 100 de la course rétrograde. La détente est donc par rapport aux machines ordinaires prolongée de 25 p. 100 et la compression diminuée de 20 p. 100. Ces deux conditions sont évidemment favorables et se maintiennent pour tous les crans de marche.

Dans la machine 76 l'échappement anticipé a une durée de 34 p. 100 et la compression de 29 p. 100.

Les résultats obtenus furent cette fois satisfaisants ; les démarrages étaient plus faciles et la mise en vitesse plus rapide. Au point de vue économique le travail de la vapeur était plus grand pour un même poids que dans les machines ordinaires. On reconnut cependant qu'au point de vue de l'économie, il y aurait intérêt pour les nouvelles applications à réduire les espaces neutres conservés un peu grands ici par suite de l'utilisation des cylindres des premiers essais.

La *fig.* 5, Pl. VII, représente la disposition appliquée à la suite des essais précédents à la machine 67 en employant

de nouveaux cylindres, et les *fig.* 1 à 7 de la Pl. VIII représentent le dessin type qui a été suivi définitivement pour les locomotives à voyageurs et qui est en service à la Compagnie depuis un an et demi (*).

On remarquera que la commande des tiroirs d'échappement se fait par l'intermédiaire d'un balancier prenant son point d'appui sur le cylindre.

Cette disposition a pour objet d'éviter les vibrations qui se produisaient à grande vitesse dans la disposition du parallélogramme avec balancier type Evans de la machine 67, Pl. VII, *fig.* 5.

Chaque cylindre comporte quatre distributeurs cylindriques (genre Corliss), deux pour l'admission et deux pour l'échappement. En les plaçant aux extrémités on a pu réduire l'espace nuisible au minimum possible, soit 4 1/2 p. 100 du volume du cylindre.

Les tiroirs d'admission sont à double introduction et ceux de l'échappement sont à double lumière d'échappement.

Les avantages résultant de cette nouvelle combinaison sont les suivants :

« 1° Au point de vue du refroidissement de la vapeur « avant son entrée dans le cylindre, les conditions sont « meilleures que dans les machines ordinaires, puisqu'ici « la boîte à vapeur et les tiroirs ne sont pas refroidis « par le passage de la vapeur d'échappement qui n'a que « 110° environ, celle de la boîte à vapeur étant de 180°.

« Il y a de ce fait dans les cylindres ordinaires à un « seul tiroir une condensation qui n'existe pas dans les « cylindres à quatre distributeurs distincts.

« 2° Au point de vue de la chute de pression à l'intro- « duction, on peut admettre que cette perte est diminuée « en pratique puisque la vapeur afflue par une section « presque doublée.

(*) La Pl. IX représente une vue générale de la locomotive 331 munie de la nouvelle distribution.

« 3° Au point de vue de l'utilisation du travail de la « vapeur dans le cylindre, l'espace nuisible diminué, la « durée de la compression amoindrie et la prolongation « de la détente sont autant d'éléments favorables à l'em- « ploi de la nouvelle disposition.

« 4° Au point de vue de l'emploi de la contre-vapeur, « le travail résistant est augmenté puisque la quantité « de vapeur qui remplit les espaces neutres est diminuée « ainsi que l'échappement anticipé.

« 5° Au point de vue des frottements, les quatre distri- « buteurs étant presque équilibrés absorbent un peu « moins de frottement qu'un seul tiroir ordinaire (*). »

6° La disposition des tiroirs d'échappement à la partie inférieure du cylindre permet la purge naturelle par l'échappement et la suppression ou tout au moins l'emploi moins fréquent des purgeurs.

Le nombre des articulations est augmenté, il n'en peut être autrement, mais nous ne pensons pas que cette petite complication soit comparable à celle qui résultait des dispositions compound et autres qui ont été essayées.

Il est à remarquer que la disposition des commandes séparées des deux tiroirs par une seule coulisse ne peut donner pour la marche en arrière les mêmes phases de distribution que pour la marche en avant. La marche en arrière est évidemment sacrifiée, mais cela ne présente aucun inconvénient pour les machines du service courant des trains qui ne marchent en arrière que dans les manœuvres pour la sortie et la rentrée des dépôts.

Les *fig.* 7 et 8, Pl. VII représentent des diagrammes comparatifs relevés sur une locomotive munie du système à quatre distributeurs et sur une locomotive à tiroir ordinaire et de la même série.

(*) Extrait du *Bulletin* de juin 1890 de la *Société des Ingénieurs civils*. Mémoire de MM. Durant et Lencauchez, page 94.

Diagrammes relevés au moyen de l'indicateur Watt (système Martin).

Traits forts : Locomotive à quatre distributeurs (67).

Traits fins : Locomotive à tiroir ordinaire (75).

Il est facile de se rendre compte par ces diagrammes des avantages du système à quatre distributeurs.

La différence la plus saillante entre les deux types de diagrammes est dans la forme de la courbe de la compression qui renfle notablement la surface des diagrammes correspondants à la nouvelle distribution.

La courbe est plus renflée à l'admission et la contre-pression est diminuée à grande vitesse.

Dans le *Bulletin de la commission internationale du congrès des chemins de fer*, de novembre 1891, M. W. Adams, après avoir donné une description succincte de la nouvelle distribution, écrivait :

« Il sera intéressant de connaître les résultats définitifs obtenus avec cette distribution. »

Nous sommes en mesure de donner maintenant les résultats de la pratique au point de vue de l'usure des pièces et de la dépense de combustible.

L'application de la nouvelle distribution est faite à huit locomotives à grande vitesse :

Machine	331	mise en service le	2	janv.	1892
—	332	—	25	juin	1892
—	67	—	6	août	1892
—	76	—	2	avril	1892
—	397	—	26	nov.	1892
—	398	—	17	—	1892
—	399	—	25	août	1892
—	395	—	7	mai	1893

Elle est de plus, en cours d'exécution, à trois autres locomotives à voyageurs et à trois locomotives à marchandises, soit en totalité quatorze locomotives.

Les parcours de ces locomotives étaient, au 1er juin 1893:

Pour la locomotive	331	de	97.462 kilomètres
—	332		76.856 —
—	67		55.288 —
—	76		62.513 —
—	397		27.312 —
—	398		34.903 —
—	399		50.514 —
—	395		4.878 —

Ces locomotives se sont particulièrement bien comportées au service des trains express et rapides dont la vitesse atteint parfois 100 kilomètres à l'heure et ont montré une supériorité incontestée sur les locomotives ordinaires, à cause de la grande facilité qu'elles ont de se mettre en vitesse.

On a surtout remarqué qu'elles franchissent la rampe d'Étampes (8^{mm} d'inclinaison sur une longueur de 8^{km} environ) avec une vitesse dépassant de 7 à 8 kilomètres celle des machines ordinaires avec une charge variant de 150 à 194 tonnes.

La locomotive 331 étant rentrée aux ateliers de Paris le 7 décembre 1892, après un parcours de 64.694 kilomètres, pour réparations d'entretien général, on en a profité pour procéder à une visite des organes de la distribution et on a constaté que :

Pour les cylindres, l'usure des tables d'orifices pour l'admission et l'échappement était insignifiante.

Les tiroirs d'admission et d'échappement avaient un peu d'usure et de beaux frottements.

Toutes les articulations des bielles, manivelles, balanciers du mécanisme de distribution étaient pour ainsi dire sans jeu, seuls, les carrés des manivelles de commande des arbres des tiroirs d'admission avaient pris un peu de jeu sur les arbres; cet inconvénient n'existe pas aux autres locomotives de ce système, car ces manivelles sont plus solidement maintenues par un emmanchement claveté sur partie conique.

Les colliers d'excentriques avaient le même jeu que

dans les locomotives ordinaires. En somme, les seules réparations à faire au mécanisme spécial de la nouvelle distribution étaient les carrés des arbres à resserrer.

Ainsi, après un parcours de 64.694 kilomètres, les tiroirs et les tables étaient dans un si bon état que la machine a été remise en service sans réparations alors que pour les locomotives ordinaires, les visites de tiroirs se font généralement après un parcours de 20.000 à 28.000 kilomètres et presque à chaque visite on est obligé de dresser les tiroirs et les tables ; les cas où l'on peut s'en dispenser sont très rares.

Résultats au point de vue de la dépense du combustible.

La locomotive 331 ayant fait le service des express, voici la comparaison au point de vue de la dépense de combustible entre cette locomotive et toutes les autres de la même série avec distribution ordinaire ayant fait un parcours à peu près égal dans le même service.

État des moyennes de consommation de combustible en 1892.

NUMÉROS d'ordre	NUMÉROS des locomotives	KILOMÈTRES parcourus	MOYENNE de consommation de combustible pour 100 tonnes kilométriques	ÉCONOMIE de combustible de la locomotive 331 sur les autres
1	331	54.890	5,352	»
2	339	44.923	5,538	0,034
3	340	44.874	5,740	0,072
4	348	40.838	5,925	0,107
5	395 (*)	46.922	6,020	0,124
6	330	42.959	6,029	0,126
7	329	41.547	6,035	0,127
8	347	44.914	6,038	0,128
9	344	42.197	6,087	0,137
10	337	48.767	6,096	0,139
11	343	45.408	6,149	0,148
12	393	43.392	6,170	0,152
13	269	45.768	6,226	0,163
14	268	51 046	6,351	0,186
15	394	45.639	6,416	0,198
16	341	44.787	6,480	0,210
17	334	40.110	6,502	0,215
18	342	44.006	6,525	0,219
19	266	48.665	6,665	0,245
		Total.	110,992	»
		Moyenne	6,166	0,152

(*) Avant l'application de la nouvelle distribution.

De l'examen de ce tableau il ressort que la locomotive 331 est la première en économie pendant l'année 1892, et que la dépense de combustible est de 3, 4 p. 100 inférieure à celle qui est la deuxième dans le classement et de 15, 2 p. 100 inférieure à la moyenne.

Il est à remarquer que la locomotive 331, pendant l'année 1891 (immédiatement avant la modification), avait un rang moyen correspondant à la vingt et unième place dans le classement et que le machiniste titulaire de la locomotive 331, pendant l'année 1892, a eu un rang moyen correspondant à la cinquième place.

La dépense de graissage seule a été un peu supérieure à celle des autres locomotives : elle a été de 51 grammes par kilomètre alors que la moyenne est de 42 grammes.

L'avantage de la locomotive 331, munie de la distribution à quatre tiroirs indépendants, sur les autres paraît donc clairement indiqué puisqu'elle est la première maintenant alors qu'elle n'était que la vingt et unième avant la modification, et que le machiniste qui la conduit n'était que le cinquième et qu'il est maintenant le premier.

De plus, à l'économie de combustible vient se joindre une plus grande durée des tiroirs et des tables d'orifice des cylindres.

La Pl. X, *fig.* 1 à 7, représente la disposition d'ensemble des locomotives à marchandises.

Dans cette application aux locomotives à marchandises on a simplifié le mécanisme en supprimant le balancier de renvoi pour la commande des tiroirs d'échappement et en attaquant directement les tiroirs par les bielles prenant le coulisseau.

THÉORIES

RELATIVES A LA

COORDINATION DES SOULÈVEMENTS

RÉSEAU PENTAGONAL ET RÉSEAU TÉTRAÉDRIQUE

Par EDM. FUCHS, Ingénieur en chef des mines (*).

I. — ACTIONS MÉCANIQUES MISES EN JEU PAR UN SOULÈVEMENT.

La théorie générale des soulèvements, telle qu'elle ressort des lois du refroidissement appliquées à notre planète, montre qu'il faut chercher la cause même du

(*) Ce travail est extrait de la leçon d'ouverture du cours professé par Ed. Fuchs, en 1886-87, au dépôt de la guerre devant les officiers de la section topographique du génie. De cette leçon, complètement rédigée par lui avec le concours de M. J. Rey, ingénieur civil des mines, on a retranché les généralités du début, relatives notamment aux rapports de la géologie et de la topographie, pour ne conserver que la partie la plus importante, consacrée à la question de la coordination des soulèvements et, en particulier, à la théorie du réseau pentagonal.

En raison du rôle considérable que cette théorie a joué dans l'enseignement, de l'influence qu'elle a exercée, elle occupera toujours une place importante dans l'histoire du développement de la géologie et des grandes conceptions qui s'y rapportent; aussi pouvait-on, en dehors de toute appréciation sur le fond, regretter qu'il n'en eût jamais été publié dans les *Annales des mines* de résumé synthétique. C'est afin de combler cette lacune qu'a été résolue la publication posthume du présent travail (*Note de la Commission des Annales*).

relief terrestre dans le jeu des forces de la dynamique interne, les chaînes de montagnes étant ainsi le trait fondamental de la géographie et de la géologie de notre globe.

On peut chercher à entrer plus avant dans l'étude du phénomène d'un soulèvement, de façon à constater ses effets sur la partie de l'écorce où il se produit.

Expérience de M. de Chancourtois. — Comme il n'a pas été possible jusqu'ici d'observer un soulèvement au moment de sa production, plusieurs expériences ont été imaginées pour essayer de reproduire en petit des effets analogues.

M. de Chancourtois, le disciple et le collaborateur d'Élie de Beaumont, a résumé d'une façon très heureuse l'ensemble du phénomène. Il s'est servi pour cela d'un ballon en caoutchouc, gonflé d'air en excès, de façon à le dilater le plus possible. Ce ballon, muni d'un robinet, a été plongé dans un bain de cire et retiré avec précaution, couvert d'une mince couche de cette substance, non encore solidifiée. En ouvrant légèrement le robinet, l'air s'échappe, le diamètre diminue et la couche de cire, jouant le rôle de l'écorce terrestre, est forcée de se plisser pour continuer à couvrir le noyau. La surface se sillonne alors de rides, de bossellements, accompagnés de fractures et disposés suivant un réseau presque régulier.

Si l'on étudie de près ces plissements, on observe nettement qu'ils ont donné lieu à trois sortes d'efforts mécaniques : des efforts d'extension, de compression et de torsion. C'est bien là, en effet, ce que l'on peut constater dans la nature.

Efforts d'extension. — Les efforts d'extension sont dus surtout à la poussée intérieure provenant des matières

fluides accumulées sous l'écorce et comprimées par le plissement. Les terrains disloqués dans le voisinage d'un soulèvement en fournissent de nombreux exemples. Les efforts d'extension se présentent nécessairement à la partie supérieure et bombée du plissement, où le peu de plasticité de l'écorce l'empêche de se courber sur un petit rayon et la soumet à une distension considérable quand elle n'occasionne pas sa rupture.

Un exemple classique de ces efforts d'extension est fourni par les Bélemnites étirées des Alpes. Ces fossiles, qui se présentent sous la forme d'un cylindre légèrement conique, sont souvent brisés en plusieurs tronçons, séparés par des intercalations de schiste, la roche dont elles sont formées n'ayant pas pu se prêter elle-même, comme les assises plus plastiques du terrain schisteux encaissant, à l'étirement auquel elle était soumise.

Efforts de compression. — Les efforts de compression sont latéraux et leur maximum a lieu surtout dans les parties creuses du plissement. Ils y atteignent quelquefois des proportions si considérables que les roches les plus dures deviennent plastiques, leurs molécules coulant les unes sur les autres presque comme celles des liquides, ce qui leur permet de mouler les plus petites anfractuosités et les détails les plus délicats des fossiles qu'elles renferment. Ce n'est même qu'assez récemment que l'on s'est rendu compte des erreurs que la déformation mécanique de ces fossiles, postérieure à leur dépôt, et résultant des efforts de compression ou d'extension, peut entraîner pour leur détermination exacte.

Efforts de torsion. — Les efforts de torsion résultent d'une combinaison des deux autres. Ils se font généralement autour d'un axe horizontal dans une partie de l'écorce dont une extrémité est soumise à un effort

d'extension vertical et l'autre à un effort de compression en sens inverse.

Plus rarement ils ont lieu autour d'un axe vertical ou incliné; toutefois ce cas peut aussi se présenter.

Reproductions expérimentales. — Différentes dispositions ont été imaginées pour reproduire d'une façon visible les efforts mécaniques mis en jeu par un soulèvement et leurs effets sur les strates soulevés. Nous rappellerons seulement ici les expériences classiques d'Alph. Favre et de M. Daubrée.

Causes originaires du soulèvement. Filons métallifères. — On ne doit pas oublier que la cause première de ces effets mécaniques complexes est toujours le mouvement général de concentration lente de l'écorce terrestre et les ruptures qui en résultent. Tout soulèvement est connexe d'une grande cassure terrestre dont la direction générale et l'importance ne dépendent en aucune façon des accidents de détail qui l'accompagnent et des modifications locales.

Les forces si complexes mises en jeu et dont les effets apparents semblent les plus considérables ne sont que des conséquences du soulèvement principal et ne doivent point, comme cela a souvent eu lieu, être confondues avec sa cause.

Les cassures sont donc la partie essentielle du phénomène orogénique et, comme l'a si bien dit Élie de Beaumont : « Les fractures opérées dans la croûte extérieure du globe ont déterminé l'élévation et le redressement des couches dont cette croûte se compose, et les arêtes de ces couches brisées et redressées sont devenues les crêtes de ces aspérités de la surface du globe qu'on nomme chaînes de montagnes » (*).

(*) *Notice sur les systèmes de montagnes*, p. 11.

Ces vues si nettes et si rationnelles ont permis d'établir, sur une base solide, la théorie des filons métalliques.

D'après ce que nous venons de dire, on comprend que le mode de production et de distribution des fractures a exercé la plus grande influence sur le dégagement des matières liquides ou gazeuses accumulées sous l'écorce et que cette influence s'est fait sentir, non seulement sur les grandes masses éruptives qui constituent la matière du soulèvement, mais aussi sur les substances métalliques qui les accompagnent. La direction, la nature des fractures adventives, l'épaisseur, l'inclinaison, la composition chimique des couches traversées, les actions mécaniques auxquelles elles se trouvaient soumises, l'âge de leur dislocation, la pression et la température de l'atmosphère extérieure, sont autant de causes secondaires, mais extrêmement variées, qui ont déterminé la nature et la disposition des dépôts métallifères.

II. — PRINCIPES DE LA COORDINATION DES SOULÈVEMENTS.

1° Nécessité d'une symétrie sphérique.

La forme que présente la terre est celle d'un sphéroïde légèrement aplati aux pôles et renflé à l'équateur.

La valeur de l'aplatissement terrestre peut se déduire des nombreuses mesures géodésiques, effectuées surtout dans notre siècle, et qui fournissent, après un choix convenable des meilleures d'entre elles, le chiffre de $\frac{1}{294}$.

Ce chiffre peut être considéré comme représentant la valeur moyenne de l'aplatissement, valeur sensiblement plus forte que celle admise au siècle dernier, mais toujours

comprise entre les deux limites que la théorie avait indiquées à Newton et Huyghens, quoique beaucoup plus voisine de celle qu'avait calculée Newton.

Il existe cependant des écarts notables entre les diverses mesures, écarts que le perfectionnement des méthodes ne permet pas de mettre sur le compte des erreurs d'observation. On peut en conclure qu'il n'y a pas, à proprement parler, d'une façon mathématique, d'ellipse méridienne et que, si l'on descend à une certaine approximation, chacune des lignes, lieu des points d'égale longitude, possède sa courbure et sa forme propres.

Les résultats fournis par l'observation du pendule aux différentes latitudes viennent confirmer ces déductions. Quoique leur moyenne donne pour l'aplatissement un nombre très voisin du premier, les inégalités subsistent et ont fait naître les explications et les théories les plus variées.

Mais il importe de remarquer que ces inégalités et ces anomalies seraient tout à fait insensibles pour un observateur placé sur une planète voisine et que, non seulement il ne pourrait s'apercevoir de l'aplatissement aux deux pôles affirmée par certains auteurs, mais que même il ne pourrait distinguer la figure de notre sphéroïde de celle d'une sphère. Sur une sphère, en effet, de 1 mètre de diamètre l'aplatissement correspondant ne serait que de $1^{mm},7$ et il n'est pas inutile de constater que le plus habile ouvrier tourneur ne pourrait obtenir une boule de bois ou d'ivoire, même de petite dimension, d'une forme aussi parfaite.

La différence du rayon polaire et du rayon équatorial est de moins de 22 kilomètres, elle est tout à fait comparable à la différence d'altitude entre les plus hautes cimes du globe et les plus grandes profondeurs, qui atteint 17 kilomètres, et il n'est pas étonnant qu'elle

n'ait été révélée que dans les temps modernes. Si donc les phénomènes qui ont accompagné la consolidation de la croûte terrestre et que nous avons étudiés plus haut, et, en particulier, les soulèvements se sont produits et groupés sous l'influence d'une loi de symétrie ou avec une tendance marquée vers un arrangement symétrique, cette symétrie doit être sphérique et la faible déformation de notre sphéroïde ne peut l'affecter que dans une mesure presque insignifiante.

Une fois admise la théorie des soulèvements, dont les bases nous paraissent indiscutables, il reste donc à résoudre la question suivante : les conditions de formation et de consolidation de l'écorce terrestre sont elles soumises à une loi de symétrie quelconque, ou bien l'histoire de phénomènes aussi considérables que les soulèvements n'est-elle qu'une suite arbitraire livrée au hasard ?

La réponse à cette question, déjà traitée par les anciens au point de vue spéculatif, a été donnée dans notre siècle. Les géographes et les géologues qui l'ont abordée n'ont pas hésité à reconnaître qu'une loi géométrique doit avoir présidé à l'arrangement du relief immergé et émergé de notre globe, les grandes lignes de l'ossature terrestre n'étant point disposées d'une manière quelconque. Sur ce principe l'accord est général et peut se résumer par ce mot si vrai de Jean Reynaud : « Il n'y a pas un trait fondamental dans le relief de la terre qui ne soit un trait de géométrie » (*). Régies par des lois physiques positives, les courbes fondamentales de la géographie et de la géologie sont aussi précises pour une géométrie supérieure que le sont pour la nôtre les lignes élémentaires.

Mais là où les théories contraires se font jour, c'est dans l'appréciation de l'importance relative des lignes du relief. Les géographes attribuent une valeur prépondé-

(*) *Terre et Ciel*, p. 40.

rante à la distribution des continents et des mers, et par conséquent aux lignes de rivage, négligeant souvent complètement les chaînes de montagnes et les soulèvements sous-marins. Cette manière de voir ne peut être admise en géologie, où l'étude des variations des lignes de rivage et des déplacements des mers tient une si grande place.

Certaines côtes, dont les alignements prennent tant d'importance sur une carte géographique, ne sont bien souvent qu'un détail insignifiant du relief terrestre et tout à fait subordonné à telle chaîne de montagnes à peine marquée. Il n'est donc pas possible d'adopter, en géologie, des systèmes de coordination comme les systèmes tétraédriques ou loxodromiques, dont le canevas principal est constitué par des lignes de rivage et qui ont été suscités par l'unique préoccupation d'expliquer les formes actuelles des continents, ce que l'on fait sans tenir compte de toute leur histoire.

Ceci posé, examinons les faits et nous verrons clairement que la marche des phénomènes terrestres a dû se plier à une loi d'ordre et de symétrie.

Lorsque la croûte a commencé à se former, le globe était animé d'un mouvement de rotation probablement différent de ce qu'il est maintenant, mais toujours dirigé autour du même axe des pôles. La longue période pendant laquelle il était resté à l'état fluide avait permis aux matériaux de s'ordonner par ordre de densités croissantes de la surface au centre, et cela avec une grande régularité, comme l'étude des gneiss et des micaschistes de la première écorce l'a démontré pleinement. Les matériaux qui composent ces roches sont, en effet, les plus légers de notre planète (silice et silicates) et les plus régulièrement disposés.

En outre, même si l'on suppose, comme l'exige la théorie du savant astronome anglais G. Darwin, que,

sous l'influence du soleil, notre globe encore fluide ait été soumis à des marées énormes capables d'en détacher notre satellite la lune, ces mouvements s'étaient équilibrés à l'époque de la première croûte, l'état déjà visqueux de la planète les rendant de plus en plus difficiles. Ajoutons enfin que la forme de l'orbite terrestre et sa rotation diurne n'ont pas influé sur la distribution de la température du globe et sur son refroidissement.

Toutes ces causes, astronomiques ou physiques, ont donc contribué à donner à notre terre une grande homogénéité, qui n'empêchait pas, du reste, d'assez fortes variations locales dans la composition des roches. C'est donc surtout sur une sphère sensiblement homogène, c'est-à-dire suivant une loi de symétrie, que se sont produits et propagés les premiers soulèvements et les premières cassures de la croûte. L'ensemble des forces d'attraction se faisant sensiblement équilibre, il n'y a pas eu de tendance prédominante à produire les ruptures de cette croûte sur un point plutôt que sur un autre. De petites causes locales, telles que de faibles variations dans la viscosité du noyau, ou sa température, ou son retrait, sont donc seules intervenues et, en rompant l'équilibre, ont entraîné les plissements de l'écorce absolument comme dans une machine un simple ressort ou un déclic suffit à mettre en jeu des actions hors de proportion avec sa puissance. Les premiers et probablement le premier plissement une fois marqués, les autres ont dû suivre et se disposer sensiblement d'après une loi géométrique.

Mais ce n'est pas tout; en vertu du principe naturel que les phénomènes physiques prennent naissance avec la moindre dépense d'énergie, la propagation d'un plissement, c'est-à-dire la ligne suivie par le soulèvement et la fracture correspondante a dû toujours être un arc de grand cercle de la sphère. Entre deux points donnés où les tensions locales devaient produire un plissement, la

ligne la plus courte est, en effet, l'arc de grand cercle : c'était donc la ligne de moindre résistance, et celle qu'une fracture devait suivre de préférence à toute autre.

On peut donc énoncer ainsi les conditions générales qui ont réglé l'alignement, la direction et la disposition des soulèvements du relief terrestre :

1° Les soulèvements et les phénomènes qui les accompagnent se sont succédé et se sont disposés suivant une loi de symétrie sphérique ;

2° Ils sont dirigés sensiblement suivant des arcs de grands cercles.

Il est dès lors nécessaire, quel que soit le système adopté pour la coordination des accidents terrestres, d'étudier les modes de symétrie que peut présenter non pas la sphère, qui a la symétrie parfaite, mais les polyèdres qui en diffèrent peu, c'est-à-dire les polyèdres sphériques. C'est l'un d'entre eux, ou plutôt son mode de symétrie, que l'on choisira pour l'appliquer à la systématisation des grandes lignes du relief. L'observation sera chargée ensuite de justifier ce choix et par conséquent d'élever cette induction à la hauteur d'une théorie.

2° Étude de la symétrie des polyèdres sphériques.

Définitions. — On appelle axe de symétrie d'ordre p dans un système matériel quelconque, un axe tel que, si l'on fait tourner tout le système autour de cet axe d'un angle égal à $\frac{2\pi}{p}$, chaque point du système reprend une position analogue et le système est entièrement restitué.

Un système renfermant un axe de symétrie binaire ou d'ordre 2 est donc entièrement restitué par une rotation de $\frac{2\pi}{2}$ ou de 180° autour de cet axe. Le mode primitif

de symétrie binaire est évidemment insuffisant dans le cas de la terre, la coordination des accidents terrestres ne se faisant point par une simple rotation de 180° autour d'un axe.

Mais il est nécessaire, pour aller plus loin, de rappeler ici un théorème d'un grand usage en cristallographie et qui indique que le mode binaire constitue bien le mode élémentaire de toute symétrie plus élevée.

Théorème. — Lorsqu'un polyèdre possède p axes de symétrie binaire dans un plan, il possède aussi un axe de symétrie d'ordre p perpendiculaire à ce plan.

Réciproquement, tout polyèdre qui possède un axe de symétrie binaire perpendiculaire à un axe d'ordre p, possède aussi p axes binaires perpendiculaires à l'axe d'ordre p.

Exemple. — Le prisme hexagonal régulier ABCDEF (*fig.* 1) possède 6 axes binaires OX, OX′, OX″, OY, OY′, OY″, dans le plan de sa section droite ; l'axe OP du prisme, perpendiculaire à ce plan, est donc un axe d'ordre 6, ce qu'il est facile de vérifier.

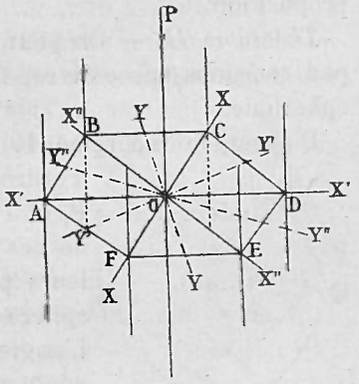


Fig. 1.

Le cas représenté par la *fig.* 1 ci-contre doit être écarté *a priori*, car un tel mode de symétrie, quelle que soit la valeur de p, ne peut être appliqué à un polyèdre sphérique susceptible de se reproduire suivant les différentes directions de l'espace. Nous admettrons donc en principe que le mode de symétrie cherché renferme au moins deux axes de symétrie d'ordre supérieur à 2, un axe d'ordre p et un axe d'ordre q. Il est facile de voir que cette condition est la plus générale de toutes et qu'elle

comprend toutes les hypothèses que l'on peut faire sur les polyèdres réalisant la symétrie sphérique. Cela résulte, en effet, des cinq propositions suivantes.

Théorème I. — Tout polyèdre qui possède deux axes d'ordre supérieur à 2 et différents l'un de l'autre en possède plus de 2.

Soient un axe d'ordre p et un axe d'ordre q faisant entre eux un angle quelconque. Si l'on fait tourner le polyèdre autour de l'axe q d'un angle égal à $\frac{2\pi}{q}$, le polyèdre est restitué par définition; l'axe p a pris alors une nouvelle position p_1, tout en conservant la symétrie d'ordre p; en opérant une nouvelle rotation analogue, suivie de plusieurs autres, on obtiendra donc une série d'axes d'ordre p. Il existe donc forcément dans le polyèdre plus d'un axe d'ordre p, ce qui démontre la proposition.

Théorème II. — On peut, avec les axes d'ordre p et par rotations successives, former un polygone régulier sphérique.

D'après le théorème I, il existe une série d'axes d'ordre p dans le polyèdre. Soient P_1 et P_2 (*fig.* 2) les pôles de deux de ces axes contigus, c'est-à-dire leurs points d'intersection avec la sphère circonscrite au polyèdre. L'angle de P_1 et de P_2 est supposé minimum par hypothèse.

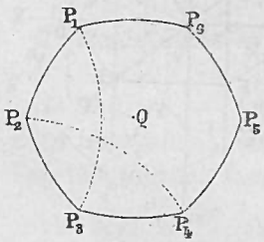


Fig. 2.

Si l'on fait tourner l'axe P_1 autour de P_2 de l'angle $\frac{2\pi}{p}$, l'axe P_2 étant d'ordre p, le polyèdre est restitué. Soit P_3 la nouvelle position de P_1; P_3 est donc un axe d'ordre p. A son tour, si l'on fait tourner P_2 autour de P_3 de l'angle $\frac{2\pi}{p}$, il vient en P_4, qui est aussi

un axe d'ordre p. En continuant ainsi, on finira par obtenir un polygone régulier sphérique, dont les sommets seront les pôles d'axes d'ordre p. On arrivera forcément, en effet, à une figure fermée, car au plus après p rotations successives autour de chaque sommet on devra retomber dans le voisinage du pôle P_1, et par hypothèse on ne peut retomber entre P_1 et P_2, qui sans cela ne seraient pas des axes contigus; la dernière rotation ramènera donc deux axes en coïncidence en fermant le polygone. De plus, le polygone sphérique est régulier, car ses angles et ses côtés sont égaux; Q désignera alors le pôle du petit cercle circonscrit au polygone.

Théorème III. — Si q est le nombre des côtés du polygone régulier sphérique, le pôle Q du petit cercle circonscrit est le pôle d'un axe de symétrie d'ordre $\frac{q}{2}$ si q est pair, ou d'ordre q si q est impair.

Soit un point α_1 (*fig.* 3) pris dans le voisinage de P_1; si l'on amène P_1 en coïncidence avec P_3 au moyen d'une rotation autour de P_2 d'un angle $\frac{2\pi}{p}$, le point α_1 prendra la position α_2. Une seconde rotation de P_2 autour de P_3 l'amènera en α_3, occupant par rapport à P_3P_4 la même position que α_1 par rapport à P_1P_2, et il en sera toujours ainsi après un nombre pair de rotations. Or q étant le nombre des côtés du polygone, l'angle au centre en Q est $\frac{2\pi}{q}$, et on pourra ramener α_1 en α_3 par une rotation de deux fois cet angle autour du point Q, soit de $2 \times \frac{2\pi}{q}$ ou de $\frac{4\pi}{q}$. Le polyèdre est donc restitué identiquement par une rotation de

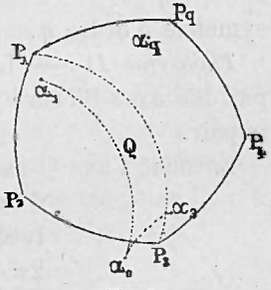


Fig. 3.

$\frac{4\pi}{q}$ autour de Q, tous les points comme α_1 reprenant des positions identiques. Mais l'angle $\frac{4\pi}{q}$ pouvant s'écrire $\frac{2\pi}{\left(\frac{q}{2}\right)}$, cette expression montre que, par définition, Q est le pôle d'un axe de symétrie d'ordre $\frac{q}{2}$, résultat qui ne peut s'appliquer que si q est divisible par 2, c'est-à-dire un nombre pair.

Si q est impair, après $q-1$ rotations ($q-1$ étant pair), α_1 prend la position α_q, ce dernier point occupant par rapport à $P_q P_1$ la même situation que α_1 par rapport à $P_1 P_2$, et le polyèdre est entièrement restitué. Il suffit alors, pour faire coïncider $P_q P_1$ avec $P_1 P_2$ et α_q avec α_1, de faire tourner le polyèdre autour de Q de l'angle au centre $\frac{2\pi}{q}$; Q est donc par définition le pôle d'un arc de symétrie d'ordre q.

Théorème IV. — Les bissectrices des angles formés par les axes d'ordre p sont des axes binaires si q est impair.

En effet l'axe Q est, d'après le théorème précédent, d'ordre q. En faisant tourner le polyèdre autour de cet axe de l'angle $\frac{2\pi}{q}$, il est entièrement restitué, et dans cette rotation $P_1 P_2$ (*fig.* 4) vient en $P_2 P_3$. On peut arriver au même résultat par deux rotations successives, l'une de P_1 autour de P_2 de l'angle $\frac{2\pi}{p}$, ce qui amène $P_1 P_2$ en $P_3 P_2$, et l'autre de $P_3 P_2$ autour de son milieu O d'un angle de 180°; P_1 revient alors en P_2, et P_2 en P_3.

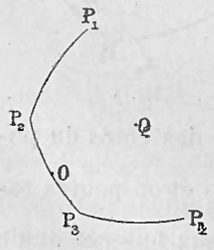


Fig. 4.

Cette dernière rotation restitue le polyèdre, la première étant effectuée autour d'un axe d'ordre p. Le point O est donc le pôle d'un axe binaire.

Théorème V. — Par rotations successives autour de ses sommets, le polygone régulier sphérique dont les sommets sont les pôles d'axes d'ordre p couvre exactement la sphère.

En faisant tourner le polygone tout entier autour de P_1 (*fig.* 5) de l'angle $\frac{2\pi}{p}$, il prendra la position $P_1, P_5, P'_3, P'_4, P'_5$; une seconde rotation analogue autour d'un autre sommet fournira une troisième position, et en continuant ainsi on devra forcément retomber sur l'une des positions précédentes, c'est-à-dire couvrir exactement la sphère; s'il en était autrement, on arriverait à un axe d'ordre p compris entre deux axes P_1 et P_2 contigus, ce qui serait contraire à l'hypothèse.

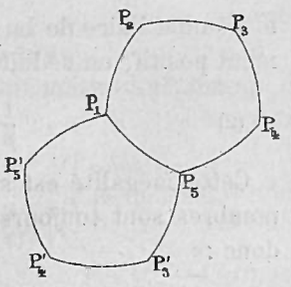


Fig. 5.

La dernière proposition ramène donc l'étude des polyèdres réguliers sphériques à celle des polygones réguliers sphériques qui couvrent exactement la sphère, ces polygones ayant forcément pour sommets les pôles d'axes d'ordre p et pour centre le pôle d'un axe d'ordre q.

Aire d'un polygone régulier sphérique dont les sommets sont les pôles d'axes d'ordre p *et dont le nombre des côtés est* q. — On sait que l'aire d'un polygone sphérique est mesurée par la somme de ses angles intérieurs, diminuée d'un multiple de deux angles droits égal au nombre des côtés moins deux.

Les angles aux sommets sont ici égaux à $\frac{2\pi}{p}$ et le poly-

gone a q côtés. On a donc :

$$S = q \times \frac{2\pi}{p} - \pi(q-2) = 2\pi q \left(\frac{1}{p} + \frac{1}{q} - \frac{1}{2}\right).$$

Soit n le nombre de ces polygones couvrant exactement la sphère; la somme de leurs aires sera égale à l'aire totale de la sphère dont le rayon est l'unité :

$$Sn = 4\pi,$$

ou

$$2\pi q n \left(\frac{1}{p} + \frac{1}{q} - \frac{1}{2}\right) = 4\pi, \tag{1}$$

et comme l'aire de la sphère est un nombre essentiellement positif, on déduit de l'égalité précédente l'inégalité

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} - \frac{1}{2} > 0. \tag{2}$$

Cette inégalité est symétrique en p et en q; ces deux nombres sont toujours entiers et supérieurs à 2; on a donc :

$$p > 2 \quad q > 2.$$

Le minimum de p et de q est donc 3 et le maximum de $\frac{1}{p}$ et de $\frac{1}{q}$ est $\frac{1}{3}$. En prenant $\frac{1}{p} = \frac{1}{3}$ l'inégalité (2) donne :

$$\frac{1}{q} > \frac{1}{2} - \frac{1}{3}, \quad \text{ou} \quad \frac{1}{q} > \frac{1}{6},$$

ce qui oblige, puisque q est entier, à prendre la valeur :

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{5} \text{ ou } q = 5.$$

On a donc :

Minimum de p . . . . . $p = 3$
Maximum de q . . . . . $q = 5$

et par symétrie :

Maximum de p . . . . . $p = 5$
Minimum de q . . . . . $q = 3$.

Il en résulte que p et q ne peuvent prendre que les valeurs 3, 4 ou 5. En combinant ces valeurs deux à deux, on est conduit à rejeter les combinaisons suivantes, qui ne satisfont pas à l'inégalité (2) :

$$\left.\begin{matrix} p=5 \\ q=5 \end{matrix}\right\} \text{ car } \frac{2}{5} - \frac{1}{2} < 0$$

$$\left.\begin{matrix} p=5 \\ q=4 \end{matrix}\right\} \text{ car } \frac{9}{20} - \frac{1}{2} < 0 \qquad \left.\begin{matrix} p=4 \\ q=5 \end{matrix}\right\} \text{ car } \frac{9}{20} - \frac{1}{2} < 0 \Bigg\} \text{ symétriques réciproques}$$

$$\left.\begin{matrix} p=4 \\ q=4 \end{matrix}\right\} \text{ car } \frac{2}{4} - \frac{1}{2} = 0.$$

Il ne reste donc que les cinq combinaisons suivantes :

1° $\left.\begin{matrix} p=5 \\ q=3 \end{matrix}\right\}$ 2° $\left.\begin{matrix} p=3 \\ q=5 \end{matrix}\right\}$ symétriques réciproques

3° $\left.\begin{matrix} p=4 \\ q=3 \end{matrix}\right\}$ 4° $\left.\begin{matrix} p=3 \\ q=4 \end{matrix}\right\}$ symétriques réciproques

5° $\left.\begin{matrix} p=3 \\ q=3 \end{matrix}\right\}$.

3° Définition et description des cinq polyèdres réguliers sphériques.

1° *Icosaèdre* ($p=5$, $q=3$, $n=20$). — L'axe p est quinaire, et le polygone élémentaire a trois côtés. Le polyèdre est donc formé de triangles équilatéraux assemblés cinq à cinq, dont les sommets sont des pôles d'axes quinaires et les centres des pôles d'axes ternaires. Comme q est impair, les milieux des côtés sont, d'après le théorème IV, les pôles d'axes binaires.

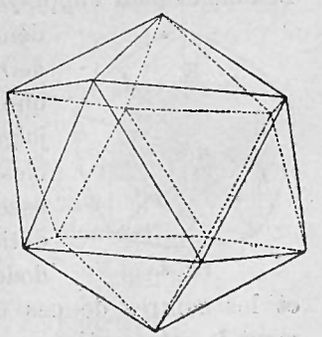


Fig. 6.

La formule (1) donne le nombre des triangles :

$$n = \frac{2}{q\left(\frac{1}{p}+\frac{1}{q}-\frac{1}{2}\right)} = \frac{2}{3\left(\frac{1}{5}+\frac{1}{3}-\frac{1}{2}\right)} = 20.$$

Le polyèdre est donc formé de 20 triangles équilatéraux assemblés cinq à cinq autour de chaque sommet. C'est l'*icosaèdre* (*fig.* 6).

2° *Dodécaèdre pentagonal* ($p=3$, $q=5$, $n=12$). — L'axe p est ternaire et le polygone a cinq côtés. Les milieux des côtés sont les pôles d'axes binaires, q étant impair.

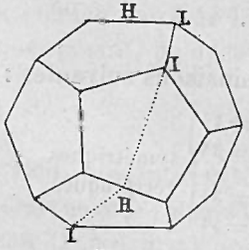


Fig. 7.

On a :

$$n = \frac{2}{5\left(\frac{1}{3}+\frac{1}{5}-\frac{1}{2}\right)} = 12.$$

Le polyèdre est donc formé de 12 pentagones assemblés trois à trois, dont les sommets sont des pôles d'axes ternaires et les centres des pôles d'axes quinaires.

C'est le *dodécaèdre pentagonal* (*fig.* 7).

Ce mode de symétrie est celui qu'a choisi Elie de Beaumont pour l'appliquer à la systématisation des accidents du relief terrestre sous le nom de *réseau pentagonal*. Il est réciproque du précédent, c'est-à-dire qu'en joignant par des arcs de grands cercles les centres I de cinq triangles assemblés de l'icosaèdre (*fig.* 8), on obtient précisément une des faces du dodécaèdre pentagonal, les sommets et les centres de ces deux figures jouant réciproquement le même rôle, comme l'indique la *fig.* 8.

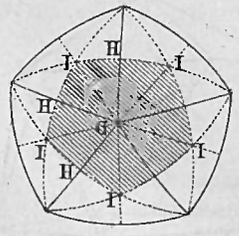


Fig. 8.

Octaèdre ($p=4$, $q=3$, $n=8$). — L'axe p est quaternaire et le polygone a trois côtés, dont les milieux sont les pôles d'axes binaires. On a :

$$n = \frac{2}{3\left(\frac{1}{4}+\frac{1}{3}-\frac{1}{2}\right)} = 8.$$

Le polyèdre est donc formé de 8 triangles équilatéraux assemblés quatre à quatre, dont les sommets sont les pôles d'axes quaternaires et les centres les pôles d'axes ternaires. C'est l'*octaèdre régulier*.

Cube ($p=3$, $q=4$, $n=6$). — L'axe p est ternaire et le polygone a quatre côtés. On a :

$$n = \frac{2}{4\left(\frac{1}{3}+\frac{1}{4}-\frac{1}{2}\right)} = 6.$$

Le polyèdre est donc formé de 6 carrés assemblés trois à trois, dont les sommets sont les pôles d'axes ternaires et les centres les pôles d'axes quaternaires. C'est le *cube*.

Ce mode de symétrie est réciproque du précédent. Il suffit en effet, pour obtenir le cube, de joindre par des arcs de grands cercles les centres des faces de l'octaèdre. En cristallographie, ce mode prend le nom de premier système, ou système cubique; c'est, comme Bravais l'a démontré, la symétrie la plus élevée que puisse présenter un édifice cristallin.

Tétraèdre ($p=3, q=3, n=4$). — L'axe p est ternaire et le polygone a 3 côtés, dont les milieux sont les pôles d'axes binaires. On a :

$$n = \frac{2}{3\left(\frac{1}{3}+\frac{1}{3}-\frac{1}{2}\right)} = 4.$$

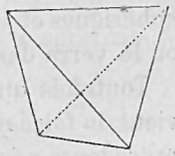


Fig. 9.

Le polyèdre est donc formé de 4 triangles équilatéraux assemblés trois à trois, dont les som-

mets et les centres sont des pôles d'axes ternaires. C'est le *tétraèdre régulier* (*fig.* 9).

Ce mode de symétrie, quoique très inférieur au précédent, a été choisi pour la coordination des faits du relief sous le nom de *système tétraédrique*. L'étude en sera faite plus loin.

4° Choix du mode de symétrie sphérique applicable à la systématisation du relief terrestre.

Élie de Beaumont a choisi comme base de la coordination rationnelle des accidents du relief terrestre, parmi les cinq modes de symétrie sphérique, celui du dodécaèdre pentagonal. Il a été amené à faire ce choix par la considération que la symétrie du dodécaèdre est, avec sa réciproque, la symétrie de l'icosaèdre, la plus élevée que l'on puisse concevoir. Elle renferme, en effet, le nombre maximum d'éléments de symétrie (6 axes ou plans de symétrie quinaire, 10 axes ou plans ternaires, 15 axes ou plans binaires) et par conséquent elle constitue le système le plus riche que l'on puisse appliquer à la coordination des formes infiniment variées et diverses du relief. Or, il est évident que, dans une recherche de ce genre, c'est au système le plus riche, de l'ordre le plus élevé, c'est-à-dire qui se rapproche le plus de la nature, qu'il faut s'adresser, et non à un mode inférieur moins fécond en combinaisons. En outre, la symétrie pentagonale renferme tous les éléments de symétrie des autres modes sphériques et peut généraliser leur représentation, comme on le verra dans l'étude qui va suivre.

Toutefois une objection se présente : le choix que l'on vient de faire n'est pas absolument fixé, la considération précédente pouvant avec autant de raison s'appliquer à l'icosaèdre. Par réciprocité, il possède les mêmes éléments de symétrie, et il est par conséquent tout aussi

fécond au point de vue géométrique que le dodécaèdre. Il faut alors s'adresser à la mécanique, et c'est le principe de l'effort minimum ou de la moindre dépense d'énergie dans la production des phénomènes naturels qui va servir à résoudre cette difficulté.

En supposant les principaux soulèvements et les fractures qui les ont accompagnés, disposés suivant les côtés du dodécaèdre pentagonal ou suivant ceux de l'icosaèdre, tout revient à savoir quel est celui de ces deux modes qui correspond à une plus facile rupture de la croûte. Or, la rupture la plus facile est évidemment celle du système dont le périmètre total (somme des côtés des faces polygonales) est minimum, à égalité d'aires. Il est facile de montrer par un calcul approximatif que cette condition est satisfaite dans le cas du dodécaèdre.

Soient DD′D″, D′D″D‴ (*fig.* 10) deux triangles équilatéraux sphériques adjacents de l'icosaèdre. L'arc de grand cercle II′ qui joint leurs centres est un côté de la face pentagonale du dodécaèdre.

L'icosaèdre renferme 20 triangles équilatéraux. En appelant c le côté de ces triangles, le périmètre total est

$$\frac{20 \times 3}{2} \times c \quad \text{ou} \quad 30\,c,$$

chaque côté appartenant à deux triangles adjacents.

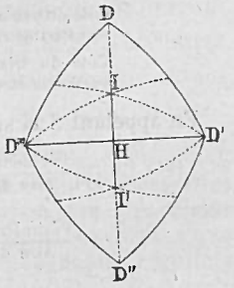


Fig. 10.

Le côté II′ du dodécaèdre vaut 2 fois l'arc IH et, si l'on remplace les arcs par leurs cordes, on a approximativement :

$$\text{IH} = \frac{1}{3}\,\text{DH} \text{ et } \text{DH} = \sqrt{c^2 - \frac{c^2}{4}} = \frac{c\sqrt{3}}{2}$$

$$\text{IH} = \frac{c\sqrt{3}}{6} \qquad \text{II}' = \frac{c\sqrt{3}}{3}.$$

Or, le dodécaèdre renfermant 12 pentagones a, comme périmètre total, 30 II', chaque côté appartenant à 2 pentagones adjacents, soit $30\,c\,\frac{\sqrt{3}}{3}$.

On a donc :

$$\text{périmètre dodécaèdre} = \text{périmètre icosaèdre} \times \frac{\sqrt{3}}{3} = \\ = \text{périmètre icosaèdre} \times 0{,}577.$$

Soit un peu plus de la moitié de ce dernier (*).

La rupture pentagonale satisfait donc beaucoup mieux au principe de l'effort minimum et l'avantage qu'elle présente à cet égard sur la rupture icosaédrique justifie

(*) Le vrai chiffre est 0,659 et, pour faire le calcul exact, il faut connaître le périmètre d'un pentagone du dodécaèdre et d'un triangle de l'icosaèdre et évaluer le rapport de ce périmètre à la surface sphérique qu'il enveloppe. La trigonométrie fournit les nombres suivants :

Côté du pentagone du dodécaèdre = $46^{c},45592$ (en grades décimaux.)
Périmètre du pentagone = $232^{c},27960$
Côté du triangle de l'icosaèdre = $70^{c},48328$
Périmètre du triangle = $211^{c},44984$

En appelant S la surface de la sphère, on a :

$$\frac{\text{Périmètre pentagone}}{\text{Aire du pentagone}} = \frac{232^{c},2796}{\frac{S}{12}} = \frac{2787,3552}{S}$$

$$\frac{\text{Périmètre du triangle}}{\text{Aire du triangle}} = \frac{211^{c},44984}{\frac{S}{20}} = \frac{4228,9968}{S}.$$

Le quotient de ces rapports est donc $\frac{2787,3552}{4228,9968} = 0{,}659$. On peut donc en conclure que l'effort de rupture qu'exige l'écrasement pentagonal de la croûte n'est que les $\frac{659}{1000}$ de celui qu'exigerait l'écrasement icosaédrique.

Si l'on cherche à résoudre la même question pour une masse parallélipipédique limitée par des plans, on s'aperçoit que les seules ruptures possibles sont les ruptures hexagonales, carrées ou triangulaires. L'hexagone, le carré et le triangle sont, en effet, les seules figures qui puissent exactement couvrir le plan. En

pleinement le choix du mode dodécaédrique. Il est nécessaire maintenant de l'étudier en détail en lui appliquant désormais le nom de *réseau pentagonal*, donné par Élie de Beaumont (*).

III. — THÉORIE DU RÉSEAU PENTAGONAL.

1° Définition des cercles.

Nombre et disposition des côtés du dodécaèdre pentagonal. — Le polyèdre fondamental est formé de 12 pentagones. Il possède donc 5×12 ou 60 côtés, mais chacun

prenant comme longueur du côté de ces figures l'unité, on a immédiatement :

$$\frac{\text{Périmètre de l'hexagone}}{\text{Aire de l'hexagone}} = \frac{6}{\frac{6\sqrt{3}}{4}} = \frac{4}{\sqrt{3}} = 2{,}30$$

$$\frac{\text{Périmètre du carré}}{\text{Aire du carré}} = \frac{4}{1} = 4{,}00$$

$$\frac{\text{Périmètre du triangle équilatéral}}{\text{Aire du triangle}} = \frac{3}{\frac{\sqrt{3}}{4}} = 6{,}90.$$

Il en résulte que la rupture, suivant le réseau hexagonal, s'effectuera avec la plus grande économie des efforts nécessaires pour vaincre la cohésion et c'est, en effet, ce que l'on vérifie dans la nature, particulièrement sur les masses basaltiques que le retrait force à se diviser en prismes hexagonaux réguliers (Grotte de Fingal, Auvergne, etc.).

(*) Il importe de faire remarquer que la division pentagonale par retrait s'observe quelquefois sur les septarias (concentrations de calcaires marneux au milieu des argiles) quand ils sont exactement sphéroïdaux et sur les sphérosidérites (minerais de fer en boules du terrain houiller), comme l'École des mines en possède un exemplaire remarquable. Citons encore un autre fait expérimental : les petits pois cuits ou desséchés dans certaines conditions présentent des ridements de l'écorce où le dodécaèdre pentagonal apparaît plus ou moins marqué par des méplats dont les contours pentagonaux saillants sont comparables aux chaînes de montagnes en préparation.

d'eux étant commun à 2 pentagones, il n'y a en réalité que $\frac{60}{2}$ ou 30 côtés.

Les faces sont parallèles deux à deux, et il est facile de le voir si l'on se rappelle que le pôle de chaque axe de symétrie d'ordre q est situé au centre Q d'un pentagone ; tout axe ayant deux extrémités, il correspond par conséquent à 2 pentagones inscrits dans deux petits cercles parallèles. En outre tous les axes de symétrie du polyèdre ayant une intersection commune en son centre, ce point est un centre de symétrie de la figure. Chaque côté d'un pentagone quelconque est parallèle à un autre côté et symétriquement placé par rapport au centre. Les côtés sont donc forcément disposés par paires sur un même grand cercle et le nombre des grands cercles à tracer sur la sphère pour dessiner le dodécaèdre est de $\frac{30}{2}$ ou de 15. On a donné à ces 15 grands cercles le nom de *cercles primitifs* ou *hexaédriques* du réseau pentagonal, dont ils constituent la première catégorie.

Principe de dérivation des cercles du réseau. — Élie de Beaumont, sous le nom de *réseau pentagonal*, comprend non seulement les 15 grands cercles fondamentaux, mais tous ceux, en nombre indéfini, que l'on peut y rattacher au moyen du principe de dérivation suivant. Les points d'intersection de chaque catégorie de cercles sont pris comme pôles des cercles de la catégorie suivante. On voit facilement que les 15 cercles primitifs donneront ainsi naissance à une catégorie plus nombreuse, et celle-ci à son tour à une troisième catégorie encore plus riche. La multiplication sera bientôt telle que, sans aller bien loin dans l'ordre des dérivations, les cercles formeront sur la sphère un réseau à mailles suffisamment serrées pour permettre de l'appliquer à la représentation des

détails mêmes du relief terrestre. Mais comme conséquence à signaler dès maintenant du principe de dérivation, leur symétrie, c'est-à-dire leur importance, baissera à mesure que leur nombre augmentera.

En résumé, les cercles auxiliaires dérivent des cercles fondamentaux par la suppression d'une ou de plusieurs des conditions qui fixent ces derniers dans la position limite qui leur appartient ; ils ne ramassent, en effet, qu'une partie des points principaux du réseau. Les familles nouvelles ainsi obtenues reflètent encore d'une manière très marquée, quoique approchée, la symétrie pentagonale, et c'est bien le résultat à obtenir si cette symétrie est réellement réalisée dans la nature.

1re catégorie. — Cercles primitifs.

Les cercles primitifs forment les côtés et les apothèmes des pentagones ; assemblés trois par trois, ils constituent des systèmes trirectangulaires.

Pour cela il suffit de démontrer que le côté AC (*fig.* 11) vient couper le côté RS du pentagone adjacent au point N milieu de RS. S'il n'en était pas ainsi, le prolongement viendrait en CK par exemple, mais alors en faisant tourner la figure de 180° autour du point N, pôle d'un axe binaire, le polyèdre étant restitué, le symétrique de CK serait CK′, soit une nouvelle direction, ce qui est impossible puisque le polyèdre est entièrement restitué ; donc K′ se confond avec K, c'est-à-dire avec N. Le prolongement de AC est donc bien l'apothème CN et les deux angles CNR et CNS devant se superposer après la rotation sont droits. De même les côtés RS et PI sont apothèmes en P et en M. Les trois grands cercles MCN, NSP, PIM forment ainsi

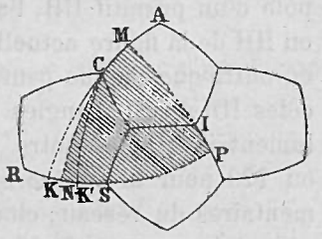


Fig. 11.

un triangle trirectangulaire qui est une face de l'octaèdre régulier et dont l'aire est égale au 1/8e de celle de la sphère. En outre ces 3 cercles trirectangulaires sont parallèles aux faces d'un cube inscrit dans la sphère et conjugué à l'octaèdre. Les 15 grands cercles primitifs peuvent donc former $\frac{15}{3}$ ou 5 systèmes trirectangulaires correspondant à 5 cubes et 5 octaèdres symétriquement placés.

La *fig.* 12 ci-dessous présente les intersections des cercles primitifs pour 4 pentagones adjacents, chacun d'eux étant respectivement côté et apothème; on a adopté les mêmes lettres pour les points analogues.

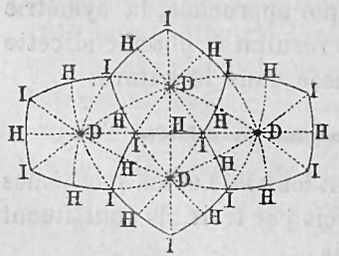


Fig. 12.

La considération des systèmes trirectangulaires montre que chaque point H est le pôle d'un primitif HH, l'arc MCN de la figure précédente ou HH de la figure actuelle étant égal à un droit. On voit en outre que chaque pentagone renferme 5 triangles isocèles IDI ou 10 triangles rectangles scalènes DHI absolument identiques entre eux et au nombre de 10×12 ou 120 pour la sphère entière. Ce sont les mailles élémentaires du réseau; chacun de ces triangles pouvant reproduire par symétrie tous les 119 autres, comme il est facile de s'en assurer, il en résulte que tout point ou pôle placé dans l'un d'eux se retrouvera identiquement dans tous les autres.

Angles et côtés du triangle scalène élémentaire. — L'angle en H étant droit, il reste à calculer les angles IDH et DIH.

L'angle IDH est la moitié de l'angle HDH, lequel est

précisément l'angle du triangle équilatéral DDD, face de l'icosaèdre. Or, comme nous l'avons vu, l'icosaèdre est formé de triangles équilatéraux assemblés cinq à cinq et il est facile de voir que l'on ne peut assembler plus de cinq triangles équiangles autour d'un même point sur la sphère. Leurs angles seraient, en effet, de $\frac{360°}{6}$ ou de 60° et la formule $s = A + B + C - 180°$, qui fait connaître l'aire d'un triangle sphérique, nous donnerait $s = 3 \times 60° - 180° = 0$, ce qui est impossible.

Dans le cas actuel, l'angle HDH est donc de $\frac{360°}{5}$ ou de 72° (*) et l'angle $IDH = \frac{72°}{2} = 36°$.

Quant à l'angle DIH, il s'obtient facilement au moyen des deux autres et de l'aire du triangle. L'aire de la sphère étant de 720° (*), celle du triangle scalène élémentaire est de $\frac{720°}{120} = 6°$. On a donc :

$$DIH + 90° + 36° - 180° = 6°, \quad \text{d'où} \quad DIH = 60°.$$

Le triangle scalène élémentaire DHI est donc formé par :

2 primitifs se coupant à angle droit au point H;
5 primitifs se coupant à 36° au point D;
3 primitifs se coupant à 60° au point I.

Théorème. — La somme des côtés du triangle scalène

(*) On peut vérifier facilement que l'angle du triangle équilatéral de 72° est bien celui de l'icosaèdre. L'aire de ce triangle étant $s = 3 \times 72° - 180° = 36°$ et celle de la sphère, formée de 8 triangles trirectangles $S = 8[3 \times 90° - 180°] = 720°$; la sphère renferme donc $\frac{720°}{36°} = 20$ de ces triangles, ce qui correspond bien à l'icosaèdre.

DHI est égale à 1/4 de circonférence ou mesure un angle droit.

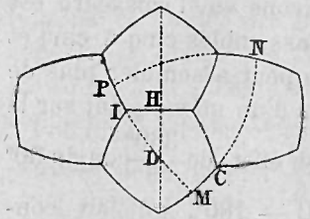


Fig. 13.

En effet dans le triangle trirectangulaire MNP (*fig.* 13), on a :

$$MN = 1 \text{ droit} = MC + CN.$$

d'autre part dans le triangle scalène DHI, on a :

$$HI = 1/2 \text{ côté de pentagone} = CM.$$
$$DH = DM.$$

On en conclut que :

$$DH + DI = MD + DI = MI = CN,$$

d'où :

$$DH + HI + ID = MC + CN = 1 \text{ droit}.$$

2e catégorie. — Cercles principaux.

Octaédriques ou Icosaédriques. — Si l'on joint de deux en deux les points H, milieux des côtés du pentagone, on obtient une nouvelle série de grands cercles dont les pôles sont aux points I.

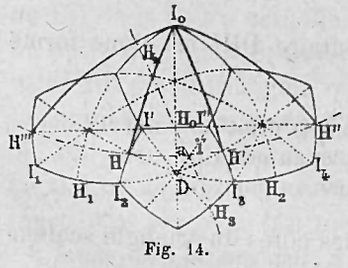


Fig. 14.

Le grand cercle décrit du point I_0 (*fig.* 14) comme pôle coupe le cercle $I_0 H_0 D$ en un point a compris entre H_0 et D.

On a, en effet,

$$\text{Arc de } 90° = 1/2 \text{ côté} + I_0 H_0.$$

Dans le triangle scalène $H_0 I'' D$, $H_0 I''$ opposé à un angle de 36° est plus petit que $H_0 D$ opposé à un angle de 60°. Or

$$H_0 a = 1/2 \text{ côté} = H_0 I'', \text{ car } I_0 a = 90°;$$

donc

$$H_0 a < H_0 D$$

et a est compris entre H_0 et D.

Mais, comme le cercle $I' H_0 I''$ et le cercle mené de I_0 comme pôle et passant au point a sont perpendiculaires au cercle $I_0 H_0 D$ aux points H_0 et a, ils passent aux points H'' et H''' pôles du cercle $I_0 D$, les arcs $H_0 H'''$ et $H_0 H''$ étant égaux à 90°.

Il en résulte que le cercle ayant pour pôle le point I_0 passe aux trois points H''', a et H''; donc

$$I_0 H'' = I_0 H''' = I_0 a = 90°.$$

D'autre part, les arcs $I_0 H_1$ et $I_0 H_2$ étant perpendiculaires sur le milieu de $I_1 I_2$ et de $I_3 I_4$, on a :

$$I_0 H'' = I_0 H' = 90°$$
$$I_0 H''' = I_0 H = 90°$$

comme obliques s'écartant également du pied de la perpendiculaire. Les points H et H' sont donc situés sur le cercle $H''' a H''$ ayant I_0 pour pôle.

Le nombre des points I est de $\frac{5 \times 12}{3}$ ou de 20, chacun d'eux étant un sommet commun à trois pentagones. Mais, comme ils sont diamétralement opposés, il n'y a en réalité que 10 pôles par hémisphère, c'est-à-dire 10 cercles $H a H$.

Ces cercles sont parallèles aux faces des cinq octaèdres dont les côtés sont formés par les cercles primitifs, chaque face étant commune à deux octaèdres.

En outre, ces mêmes cercles sont parallèles aux faces de l'icosaèdre, mais ne forment pas ses côtés. Ils prennent ainsi le nom de *cercles octaédriques* ou *icosaédriques*.

On peut remarquer qu'il passe dans chaque triangle scalène tel que $D H_0 I''$ deux arcs d'octaédriques $H a H'$ et $H_0 T H_3$, le point T étant l'intersection commune des

deux octaédriques sur le côté DI. Le point a est en outre commun à deux triangles scalènes.

Dodécaédriques réguliers. — Si l'on joint les points H, milieux des côtés immédiatement voisins, on obtient une autre série de cercles dont les pôles sont aux points D.

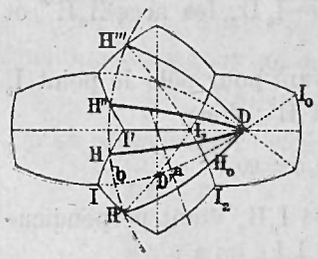


Fig. 15.

Le grand cercle décrit du point D (*fig.* 15) comme pôle coupe le cercle I_0DD' en un point b compris entre D' et I.

En effet, les deux arcs Db et I_0a, qui sont égaux à 90°, ayant une partie commune aD, on a :

$$ab = I_0D;$$

mais l'apothème étant toujours inférieure au rayon du pentagone,

$$I_0D > H_0D' > aD';$$

donc

$$ab > aD'$$

et le point b tombe entre D' et I.

Pour achever la démonstration, il suffit de remarquer que les cercles I_1I_2 et b sont perpendiculaires au cercle I_0DD' aux points H_0 et b, ils passent donc par les pôles de ce dernier cercle et en particulier au point H''' puisque $H_0I_1H''' = 90°$. Le cercle b mené de D comme pôle passant au point H''', l'arc DH''' est égal à 90°. En outre, la figure indique que l'arc DH''' est égal à DH', ces deux obliques s'écartant également du pied de la perpendiculaire DI'; donc $DH' = 90°$ et le cercle bH''' passe au point H'. Pour la même raison, il passe aux points H et H'', car on a évidemment

$$DH' = DH$$
$$DH''' = DH''.$$

Les cercles ayant les points D pour pôles passent donc

par les milieux des côtés adjacents. Les points D, pôles des faces du dodécaèdre pentagonal, étant au nombre de 6 par hémisphère, il y a donc six cercles analogues qui sont parallèles à ces mêmes faces, d'où le nom de *dodécaédriques réguliers* qui leur a été donné.

On peut remarquer qu'il ne passe dans chaque triangle scalène DHI qu'un seul arc de dodécaédrique régulier et que chaque point b est commun à deux de ces triangles.

La deuxième catégorie de cercles du réseau pentagonal comprend donc

	10 octaédriques ou icosaédriques.
	6 dodécaédriques réguliers.
Total.	16 cercles principaux.

3e catégorie. — Cercles semi-principaux.

Dodécaédriques rhomboïdaux. — Les cercles ayant pour pôles les points T, c'est-à-dire l'intersection de deux octaédriques et d'un primitif, passent chacun par deux points T, par quatre points I et par deux points H. Ils sont également inclinés sur les faces des cubes conjugués et bissecteurs des angles H.

Le point T, intersection commune de deux octaédriques, est situé au milieu de l'arc H_0H_2 (*fig.* 16).

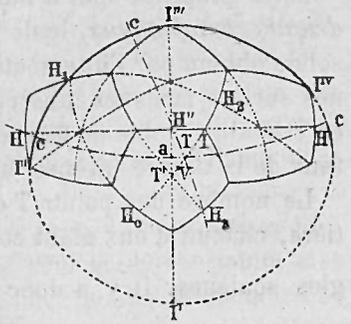


Fig. 16.

En effet, l'arc H_0H_2 fait partie du système trirectangulaire $H_0H_1H_2$ qui représente une face d'un octaèdre. Les milieux des côtés de l'octaèdre étant les pôles d'axes binaires, le polyèdre sera restitué si on le fait tourner de 180° autour du point V, milieu de H_0H_2; mais alors le point T prenant

une position symétrique T' par rapport à V, l'arc IH_0 se trouverait posséder deux points T, ce qui est impossible, les intersections des octaédriques entre eux ne fournissant qu'un seul point T sur chaque diamètre du pentagone.

Donc le point T doit coïncider avec V, milieu de l'arc H_0H_2, et les arcs H_0T, H_2T sont égaux à 45°.

Il en résulte que les cercles ayant pour pôles les points T comprennent deux autres points T situés sur le primitif passant par chacun de ces pôles.

Le point H_1 et son antipode étant les pôles du cercle H_0TH_2, les cercles T ramassent aussi deux points H.

Enfin, le point T étant situé sur les octaédriques HH', $H''H_3$, dont les pôles sont $I'I'''$, $I''I^{IV}$, les cercles ayant T pour pôle passent par quatre points I antipodes deux à deux. On peut remarquer aussi que, le point T étant le milieu de l'arc H_0H_2 de 90°, les cercles T sont également inclinés sur les primitifs H_1H_2, H_1H_0, qui sont perpendiculaires entre eux et parallèles aux faces du cube. Les cercles T font donc un angle de 45° avec chacun de ces derniers cercles et l'on a $I''H_1H_0 = 45°$. Les cercles ayant pour pôles les points T sont donc bissecteurs des angles droits en H et également inclinés sur les faces du cube, formant ainsi les plans diagonaux de ce polyèdre.

Cette propriété leur a fait donner le nom de *dodécaédriques rhomboïdaux*, le dodécaèdre rhomboïdal étant le solide obtenu par l'intersection de plans également inclinés sur les faces du cube et de l'octaèdre, solide étudié en cristallographie et fréquemment réalisé dans les cristaux de la nature (grenat, magnétite, cuprite).

Le nombre des points T est de 60 pour la sphère entière, chacun d'eux étant commun à deux des 120 triangles scalènes. Il y a donc $\frac{60}{2}$ ou 30 cercles dodécaédriques rhomboïdaux, dont $\frac{30}{5}$ ou 6 pour chacun des

cinq systèmes trirectangulaires, ce qui devait être, d'ailleurs, chaque cube possédant six plans diagonaux. La figure précédente montre que les dodécaédriques rhomboïdaux ayant pour pôles les intersections de deux octaédriques leur sont perpendiculaires et les recoupent chacun en deux points *c* diamétralement opposés. Chaque cercle T jouit donc de quatre intersections orthogonales *c*; il y a donc 4×30 ou 120 points *c* sur la sphère.

Bissecteurs diagonaux. — Si l'on considère le cercle octaédrique $H\,a\,a'\,a''\,H'$ (*fig.* 17) ayant pour pôle le point I_0, et que du point *a* comme pôle on décrive un grand cercle, ce cercle sera bissecteur de l'angle I_0 du triangle scalène $D_0I_0H_0$ et il passera au point H_2 situé sur l'octaédrique.

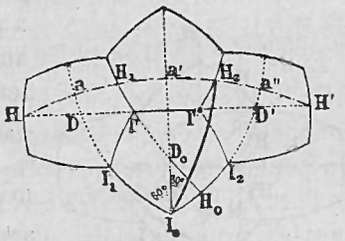


Fig. 17.

En effet, ce nouveau cercle étant perpendiculaire à I_0I_1 en I_0, et l'angle $D_0I_0H_0$ étant de 60°, il détache de cet angle un angle de 30° et par conséquent le divise en deux parties égales. En outre, l'arc $H\,H_1\,H_2\,H'$ étant égal à 180° puisque $H\,I'\,I''\,H' = 180°$, et les arcs HH_1, H_1H_2, H_2H' étant égaux entre eux, on a :

$$3\,H_1H_2 = 180°, \text{ d'où } a\,H_1H_2 = a\,H_1 + H_1H_2 = H_1H_2 + \frac{1}{2}\,H_1H_2 = 90°.$$

Le cercle décrit du point *a* comme pôle passe donc au point H_2; mais comme l'angle en *a* est droit, le système $a\,H_2\,I_0$ est trirectangulaire, et l'arc $I_0\,H_2$ est égal à 90°.

Les cercles bissecteurs des angles I, ou cercles bissecteurs diagonaux, ont donc pour pôles les points *a* et passent par deux points I et deux points H diamétralement opposés, les arcs I H comptés sur ces cercles étant égaux à 90°.

Des considérations empruntées à la cristallographie leur ont aussi fait donner le nom d'*hémihexatétraédriques diagonaux*.

Les points *a* étant communs à deux triangles scalènes sont au nombre de 60 pour la sphère entière. Il y a donc 30 cercles bissecteurs diagonaux.

Bissecteurs diamétraux. — Les cercles bissecteurs des angles D ont pour pôles les points *b*.

En effet, le dodécaédrique régulier $HH'H''H'''$ (*fig.* 18) a pour pôle le point D_0 et passe aux points H_0 et H_1 diamétralement opposés. On a donc :

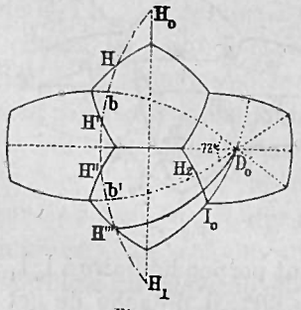


Fig. 18.

$$\text{arc } H_0 H H' H'' H''' H_1 = 5 \text{ arc } H_0 H = 180°,$$

mais

$$\text{arc } b H' H'' b' H''' = \frac{1}{2}\text{arc } H H' + 2 \text{ arc } H' H'' = 90°$$

et

$$\text{arc } D_0 H''' = 90°;$$

donc le cercle mené de *b* comme pôle passe aux points H''' et D_0, et le système $b D_0 H'''$ est trirectangulaire.

Au point D_0

$$\text{l'angle } b D_0 b' = 2 \times 36° \text{ ou } 72°;$$

il en résulte que

$$\text{l'angle } H_2 D_0 H''' = b D_0 H''' - b D_0 b' = 90° - 72° = 18° = \frac{1}{2} H_0 D_0 I_0.$$

Le cercle $D_0 H'''$, ayant *b* pour pôle est donc bissecteur de l'angle D_0.

Les cercles ayant les points *b* pour pôles passent ainsi par deux points H et deux points D distants de 90°. On leur a donné quelquefois le nom d'*hémihexatétraédriques diamétraux* d'après des considérations empruntées à la cristallographie.

Les points *b* étant communs à deux triangles scalènes sont au nombre de 30 par hémisphère; il y a donc 30 bissecteurs diamétraux ou bissecteurs des angles D.

La troisième catégorie de cercles du réseau pentagonal comprend donc :

	30 dodécaédriques rhomboïdaux.
	30 bissecteurs diagonaux.
	30 bissecteurs diamétraux.
Total.	90 cercles semi-principaux.

Les trois premières catégories de cercles renferment, par suite :

	15 cercles primitifs.
	16 cercles principaux.
	90 cercles semi-principaux.
Total.	121 cercles.

En suivant le même principe de dérivation, c'est-à-dire en cherchant à construire les cercles ayant pour pôles les points d'intersection des cercles de la troisième catégorie avec les cercles des catégories précédentes, on obtiendrait une quatrième catégorie qui ne comprend pas moins de 1.590 cercles, soit au total, pour les quatre premières catégories, 1.711 cercles.

Cette quatrième catégorie comprend des cercles passant par 2 points T, 2 points T et 2 points *a*, 2 points T et 2 points *b*, etc. Les plus remarquables de tous sont les cercles ayant pour pôles les points *c*, intersections orthogonales des dodécaédriques rhomboïdaux et des octaédriques. Comme on l'a montré plus haut, ces points sont au nombre de 120 pour la sphère entière et forment ainsi les pôles de 60 cercles auxquels on a donné le nom de *trapézoédriques*, d'après des considérations empruntées encore à la cristallographie.

2° Classement des cercles.

Poids des cercles. — Élie de Beaumont a classé les cercles du réseau pentagonal d'après le plus ou moins grand nombre de points d'intersection que chacun d'eux ramasse sur tout son parcours. La valeur de chaque cercle est donnée par son poids, qui n'est autre chose que le nombre des points d'intersection situés sur ce cercle. Seulement les points d'intersection n'ont pas tous la même valeur. Un point quelconque, en effet, pris dans l'intérieur de l'un des 120 triangles scalènes, aura un homologue dans tous les autres : il y aura donc 120 points analogues pour la sphère entière. Mais si le point est situé, comme les points T, *a*, *b*, sur l'un des côtés du triangle, il appartiendra à 2 triangles à la fois, ce qui ne donnera en tout que 60 points semblables. Toutefois, ces derniers points ne doivent pas être considérés comme des points simples ; chacun d'eux représente la limite vers laquelle tendraient deux points analogues placés sur deux triangles scalènes voisins, mais séparés, et qui se rapprocheraient peu à peu jusqu'au contact. Ces points ont donc une valeur double des points ordinaires, et l'on doit compter en réalité sur le réseau 120 points T, 120 points *a* et 120 points *b*.

De même, les points H placés au contact de 4 triangles scalènes valent 4, les points I sur 6 triangles valent 6 et les points D communs à 10 triangles ont une valeur de 10 unités.

En calculant ainsi le poids de chaque cercle et celui de chaque catégorie, Élie de Beaumont a dressé le tableau suivant :

	DÉSIGNATION DES CERCLES	NOMBRE des cercles	POIDS de chaque cercle	POIDS total
1re catégorie.	Primitifs ou hexaédriques (pôles H). . .	15	921	13.815
2e catégorie.	Octaédriques ou icosaédriques (pôles I).	10	864	8.640
	Dodécaédriques réguliers (pôles D). . .	6	840	5.040
3e catégorie.	Dodécaédriques rhomboïdaux (pôles T). Bissecteurs des angles droits en H . .)	30	216	6.480
	Bissecteurs diagonaux ou des angles I (pôles *a*) . . . . .)	30	48	1.440
	Bissecteurs diamétraux ou des angles D (pôles *b*) . . . . .)	30	40	1.200
		121		
	Poids des trois premières catégories.			36.615
	Poids des quatre premières catégories.			68.055

Ce tableau montre clairement que, d'après le mode de classement adopté, les trois premières catégories présentent à elles seules plus de la moitié du poids total du réseau arrêté à la 4e catégorie, les 121 premiers cercles ayant déjà à eux seuls un poids supérieur à celui des 1.590 cercles suivants, sur un ensemble de 1.711 cercles. En outre, sur ce nombre de 121 cercles, les 15 primitifs représentent un poids de 13.815, soit plus des $\frac{2}{5}$ du poids total, qui est de 36.615.

Il ressort de là que, dans l'application du réseau pentagonal à la systématisation des accidents du relief, les cercles des premières catégories devront jouer un rôle tout à fait prépondérant à côté des cercles des catégories suivantes, et qu'en général les grandes lignes de fracture devront pouvoir être représentées par des primitifs, des principaux ou des semi-principaux.

L'importance relative des divers alignements géologiques étant établie d'une façon précise, toute applica-

tion du réseau pentagonal qui ne satisferait pas à cette règle primordiale devra être rejetée, et il conviendra d'en essayer une nouvelle installation sur la sphère.

Points principaux et intersections orthogonales. — En terminant cette exposition théorique, il importe de rappeler que le réseau pentagonal d'Élie de Beaumont est riche en intersections orthogonales. Elles sont, en effet, au nombre de 270, réparties de la façon suivante :

	30 points H	(intersection de 2 primitifs.)
	60 points *a*	(intersection de 1 primitif et 1 octaédrique.)
	60 points *b*	(intersection de 1 primitif et 1 dodécaédrique régulier.)
	120 points *c*	(intersection de 1 octaédrique et 1 dodécaédrique rhomboïdal.)
Total.. .	270	intersections orthogonales.

Si l'on joint à ces 270 points importants les 12 points D, les 20 points I et les 60 points T, on arrive à un total de 362 points, auxquels Élie de Beaumont a réservé le nom de points principaux du réseau.

Nous ne développerons pas davantage la théorie du réseau pentagonal. On trouvera dans les nombreux mémoires d'Élie de Beaumont et dans sa notice sur les *Systèmes de montagnes*, toutes les formules nécessaires au calcul des angles et des intersections des cercles jusqu'à la cinquième catégorie inclusivement.

IV. — THÉORIE DU RÉSEAU TÉTRAÉDRIQUE.

1° Exposé du système.

Arguments invoqués en faveur du système tétraédrique. — Nous avons cité plus haut, parmi les polyèdres réguliers sphériques, le *tétraèdre*, formé de quatre triangles

équilatéraux assemblés trois à trois, dont les sommets et les centres sont des pôles d'axes ternaires. M. Lowthian Green a pensé que ce solide, quoique d'un ordre de symétrie moins élevé que le dodécaèdre pentagonal, pouvait rendre compte des traits principaux de la surface terrestre et servir à la coordination des faits de relief.

L'assimilation de la figure presque sphérique du globe avec celle d'un tétraèdre se justifierait, au point de vue cristallographique, par la substitution de l'*hexatétraèdre* au tétraèdre proprement dit. A chacun des triangles primitifs on substitue un hexagone gauche, qu'on prend pour base d'une pyramide régulière à six faces ayant son centre sur la sphère. Si, de plus, à chacune des arêtes droites on substitue une arête courbe (cas réalisé par la nature pour le diamant), on se rapprochera autant que l'on voudra de la forme sphérique. Nous discuterons plus loin la légitimité de cette transformation.

M. Lowthian Green prétend, en outre, que la forme tétraédrique est mécaniquement admissible pour une écorce sphérique qui s'écrase par suite de la contraction de son noyau. Il prend pour point de départ les expériences de Fairbairn sur l'écrasement des tubes à section circulaire (*fig.* 19). Dans la plupart des cas, la section de ces tubes tend à prendre la forme d'un triangle équilatéral.

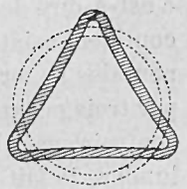


Fig. 19.

En assimilant la sphère à un édifice formé par la juxtaposition d'une infinité d'anneaux cylindriques de diamètre décroissant, on arriverait ainsi à l'équivalent du triangle équilatéral pour le plan, c'est-à-dire au tétraèdre, qui est, on le sait, le solide possédant la surface maxima pour un volume donné. Cette forme permettrait à l'écorce de conserver le plus longtemps possible son équilibre avant de se plisser et de se rompre.

Application du tétraèdre à la sphère. — Ceci posé, si l'on admet que, par suite des mouvements provoqués par son écrasement, la partie solide du globe terrestre ait aujourd'hui une forme se rapprochant du tétraèdre A B C D (*fig.* 20), tournant autour de l'un de ses axes principaux D E, la masse océanique sera représentée par une sphère ayant pour centre, le centre de gravité de la pyramide.

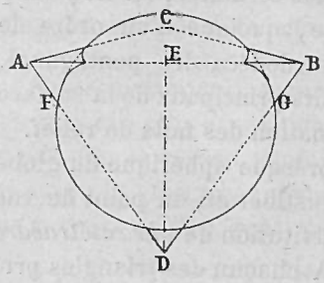


Fig. 20.

On voit facilement alors que l'hémisphère boréal comprendra trois saillies continentales symétriques A, B, C; le pôle arctique sera occupé par une mer tandis qu'un continent se fera jour au pôle austral D.

Cette disposition est en effet réalisée *grosso modo* sur le globe terrestre. Si l'on rétablit par la pensée la dépression Aralo-Caspienne qui, longeant l'Oural, séparait autrefois l'Europe de l'Asie et que l'on fasse de l'archipel de la Sonde une sorte de pont rejoignant l'Australie, c'est-à-dire de ce dernier continent un prolongement du continent asiatique, on retrouve ainsi trois masses continentales se terminant en pointes vers le sud, et séparées par trois océans triangulaires dont la pointe est dirigée au contraire vers le nord. La figure tétraédrique met aussi en lumière le fait de l'opposition diamétrale qui caractérise l'orographie générale de notre planète, puisqu'à tout pointement saillant du tétraèdre correspond à l'autre extrémité du même diamètre une dépression cachée par la nappe océanique. Or, il est facile de voir sur une mappemonde que l'Océan Pacifique, le plus considérable, est opposé à l'Asie si remarquablement développée, l'Océan Indien à l'Amérique, et l'Australie à l'Atlantique nord. On sait enfin que la mer libre occupe le pôle nord, tandis

qu'un continent sert d'appui à la banquise australe. L'emploi du tétraèdre permet donc de rappeler d'une façon très approximative le fait de la terminaison en pointe des continents et l'opposition diamétrale des océans et des terres.

M. Green a voulu aller plus loin et il a cherché à se rendre compte, toujours par la même figure, de la déviation vers l'est que présentent les trois masses continentales et de la grande zone de rupture qui les partage chacune en deux parties.

Torsion du tétraèdre terrestre. — Si l'on examine une mappemonde et même un simple planisphère on aperçoit facilement que l'Afrique australe, l'Amérique du Sud et l'Australie ne sont pas situées dans le prolongement direct de la masse principale du continent saharien, de l'Amérique du Nord et du massif asiatique, mais que ces trois pointes, au moins envisagées dans leur ensemble, sont placées plus à l'est. En outre, comme on l'a souvent fait remarquer, une grande dépression intercontinentale divise la terre ferme en deux moitiés presque complètement séparées. L'Amérique du Nord ne se rattache à l'Amérique du Sud que par l'étroite langue de terre de Panama ; l'Europe et l'Afrique sont séparées par la Méditerranée, et l'Océan Indien s'étend entre l'Asie et le continent australien, qui ne sont reliés que par les îles de la Sonde et les archipels polynésiens.

M. Green explique cette disposition générale, contraire à la forme tétraédrique régulière, par le fait du mouvement de la terre autour de son axe. A mesure, en effet, que l'écrasement de la croûte a fait naître et accentuer les quatre protubérances A, B, C, D, les trois premières A, B, C, écartées de l'axe de rotation D E, n'avaient plus une vitesse absolue de rotation suffisante, eu égard à leur nouvelle distance à l'axe. Elles se sont donc trouvées en

retard relativement à la surface moyenne et, par suite, elles ont été sollicitées à une déviation en sens contraire du mouvement. La protubérance australe D et les parties voisines, c'est-à-dire la portion méridionale des trois pointes A, B, C, à mesure que l'écrasement les a rapprochées de l'axe D E, ont dû conserver, par rapport à la surface primitive, un excès de vitesse de plus en plus caractérisé. La rotation du globe s'effectuant de l'ouest à l'est, il a dû se produire par conséquent une déviation vers l'ouest pour les parties boréales et vers l'est pour les parties australes. Ces deux actions rotatoires de sens différents ont donc soumis le tétraèdre à une sorte de torsion, qui a dû faire naître entre ses deux parties une ligne de rupture ou une nouvelle zone de dépression intercontinentale que l'on a depuis fort longtemps signalée sous le nom de route d'Orient.

Cette ingénieuse explication n'a pas suffi à M. Green; il a voulu expliquer au moyen de phénomènes astronomiques non seulement la position moyenne de cette grande ligne de rupture, laquelle ne coïncide pas avec l'équateur, mais aussi un des éléments primordiaux de notre monde, l'inclinaison de l'axe des pôles sur le plan de l'écliptique.

Influence des marées internes. — Au premier abord il semble que la ligne de rupture aurait dû, en effet, se placer parallèlement à l'équateur terrestre et au nord de cet équateur, puisque la portion centrale des trois protubérances boréales est environ par 45° à 50° de latitude nord. Or il n'en est rien : la zone de dépression intercontinentale est très inclinée et recoupe même l'équateur. M. Green a eu recours, pour expliquer ce fait, à l'influence des marées luni-solaires sur la masse fluide du globe à l'époque primitive où l'écorce était encore très mince. Il admet que ces marées atteignaient leur maximum d'amplitude aux solstices, c'est-à-dire aux époques où les conjonctions du

soleil et de la lune ont le plus de chances de se produire. L'attraction de ces deux astres faisant naître sous la pellicule solide un bourrelet de matières fondues, la pression de ce bourrelet a dû déterminer des ridements ou des fractures, et cette tendance s'est manifestée avec le plus d'énergie pour les points du globe situés dans le plan de l'écliptique. La tendance au crevassement se serait ainsi produite suivant des cercles parallèles et très voisins de l'écliptique, ou suivant des cercles perpendiculaires à celui-ci, l'effet du bourrelet étant aussi de déterminer un minimum de soutien, c'est-à-dire l'écrasement suivant des plans perpendiculaires.

La ligne principale sera donc un cercle vraisemblablement parallèle à l'écliptique et voisin de celui-ci. Un tel petit cercle, incliné de 23° 28′ sur l'équateur et mené par 31° N. sur le méridien de Gibraltar, passe en effet par l'axe de la Méditerranée, le golfe Persique, la côte du Beloutchistan, le golfe du Bengale, la Nouvelle-Guinée, les Marquises, l'isthme de Tehuantepec, Cuba et les Açores. Ce serait suivant ce cercle que ce serait effectuée la séparation par torsion des deux parties du tétraèdre terrestre.

Quant aux lignes de rupture qui seraient perpendiculaires au plan de l'écliptique, on peut, d'après certains géologues américains (Dana, Owen), en signaler plusieurs, telles que : la ligne des côtes de l'Afrique australe du cap de Bonne-Espérance à la pointe sud-est de l'Arabie, la ligne moyenne du rivage oriental de l'Amérique du Sud, le littoral moyen de l'Amérique du Nord entre le détroit de Behring et la Californie, la côte d'Asie de la Chine au Kamtschatka, celle des États-Unis de la Floride à Terre-Neuve, enfin la direction de la mer Rouge et celle du canal de Malacca. Ces différentes lignes forment *grosso modo* deux systèmes de directions qui, les unes et les autres, vont toucher les deux cercles polaires,

c'est-à-dire sont perpendiculaires au plan de l'orbite terrestre.

Influence de l'attraction solaire sur les protubérances. — Comme on vient de le voir, c'est à l'inclinaison de l'écliptique (23° 28′ sur l'équateur) que M. Green attribue en grande partie la position de la ligne de fracture intercontinentale qui lui est parallèle. Mais cette inclinaison même de l'écliptique ou plutôt celle de l'axe des pôles sur le plan de l'orbite terrestre, le savant anglais prétend en donner l'explication par son hypothèse tétraédrique, et il invoque pour cela les effets de l'attraction solaire sur les trois protubérances boréales.

Pour cela, supposons à l'origine le tétraèdre A B C D tournant autour de son axe D E, perpendiculaire au plan de l'écliptique, et se transportant parallèlement à lui-même en décrivant l'orbite terrestre. Le soleil exercera une attraction spéciale sur chacune des trois protubérances boréales, et cette attraction sera maximum pour chacune d'elles chaque fois que l'astre central se trouvera dans le plan méridien qui la contient. Il y aura donc là une action perturbatrice tendant à dévier la ligne des pôles D E en la rapprochant de l'écliptique. D'après M. Green, pour que cette action n'ait plus lieu de s'exercer, il faut que, au moment où le soleil passe au méridien des protubérances, ces dernières soient justement dans le plan de l'écliptique, ce qui revient à dire que le cône engendré par la rotation des trois axes du tétraèdre issus de A, B, C, autour de D E, doit être tangent à l'écliptique. Or, si l'on fixe approximativement les points A, B, C, centres des trois masses continentales, on peut calculer l'angle de ce cône, d'où l'on déduit l'angle de l'axe terrestre D E avec la normale à l'écliptique, et M. Green a trouvé justement pour cet angle une valeur comprise entre 23° et 24°, c'est-à-dire très voisine de la valeur réelle.

Cette conséquence tout à fait inattendue du système tétraédrique a semblé à plusieurs personnes un argument décisif en sa faveur ; aussi croyons-nous nécessaire d'examiner de très près les objections que soulève l'hypothèse de M. Green.

2° Objections au système tétraédrique.

Objections au principe. — La partie solide de l'écorce terrestre présente-t-elle réellement une forme se rapprochant du tétraèdre? Telle est la première question que l'on peut se poser, et il ne paraît pas difficile d'y répondre négativement.

Les sondages pratiqués, ces dernières années, dans les principaux océans, ont montré que les plus grandes profondeurs maritimes ne dépassent guère 8 à 9.000 mètres, c'est-à-dire sont à peine supérieures aux plus hautes montagnes ; en outre, ces profondeurs maxima n'ont point été constatées uniquement aux basses latitudes, comme l'action de la force centrifuge, qui est maximum à l'équateur et doit y accumuler la masse océanique, semblait le faire croire. En général, la figure de l'écorce solide ne s'écarte pas notablement de celle du sphéroïde des eaux, c'est-à-dire est très voisine d'un ellipsoïde dont l'aplatissement serait un peu moindre.

Quant aux mesures géodésiques, elles sont assez nombreuses maintenant pour démontrer que le niveau moyen des continents est sensiblement celui d'un ellipsoïde et que les variations locales sont de beaucoup trop faible importance pour pouvoir être attribuées à des protubérances aussi importantes que celles du tétraèdre ou de l'hexatétraèdre de M. Green. Tout au plus peut-on dire que les mesures effectuées dans l'hémisphère austral ne sont pas assez étendues pour fixer absolument l'aplatis-

sement du pôle sud, qui est peut-être légèrement différent de celui du pôle nord.

De même que les océans ne présentent pas de profondeurs exagérées, comme celles qui seraient nécessaires à la théorie, les continents n'offrent pas d'altitudes moyennes suffisantes. Les calculs de M. de Lapparent, venant rectifier ceux de Humboldt, n'attribuent, en effet, à l'Asie que 819 mètres de relief moyen; l'Afrique suit immédiatement avec 602 mètres, puis l'Amérique du Nord 595 mètres, l'Amérique du Sud 537 mètres, l'Océanie 362 mètres, et l'Europe 292 mètres. On voit combien ces chiffres sont insignifiants et peuvent difficilement s'appliquer à des pointements comme ceux du tétraèdre.

Enfin, aucun astre du système solaire ne nous a montré jusqu'ici un contour se rapprochant, même approximativement, du tétraèdre, à commencer par notre satellite la lune, actuellement refroidi et figé et qui devrait présenter au maximum une telle tendance. On sait, au contraire, que la lune est un ellipsoïde à 3 axes légèrement inégaux dont le plus long est tourné constamment vers la terre.

Objections aux analogies géométriques. — Si l'hypothèse tétraédrique peut servir à donner une représentation grossière de l'allure générale des continents, examinée de près elle n'est pas susceptible de rigueur. On ne peut en effet, pour justifier l'identification de la forme du globe avec celle d'un solide aussi différent que le tétraèdre, le remplacer par un hexatétraèdre sans s'écarter du principe de symétrie qui est à la base de toute systématisation des accidents terrestres.

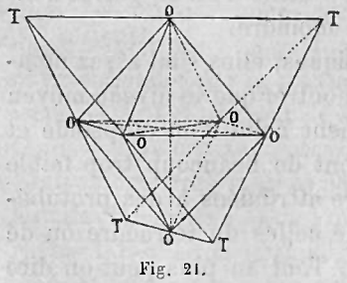


Fig. 21.

Le tétraèdre renferme quatre axes ternaires et trois axes binaires, mais pas de centre ni de plans de symétrie. Il dérive de l'octaèdre (*fig.* 21) par la perte de son centre de symétrie qui entraîne celle de une face sur deux et par conséquent ne possède qu'une symétrie amoindrie.

L'hexatétraèdre à faces courbes dérive au contraire du polyèdre le plus complexe du système cubique, de l'hexoctaèdre (*fig.* 22), lequel possède 48 faces. La perte de son centre de symétrie fournit en effet une figure à 24 faces que l'on appelle plus exactement l'hemihexoctaèdre. Ce dernier polyèdre, quoiqu'il ait les mêmes axes de symétrie, ne peut en aucune façon s'obtenir en partant du tétraèdre, car les axes ternaires ne permettent pas de remplacer chaque face de ce dernier solide par six autres faces, outre qu'il faudrait pour cela substituer au triangle équilatéral plan un hexagone gauche comme base de chacune des quatre pyramides, transformation tout à fait contraire au principe de symétrie.

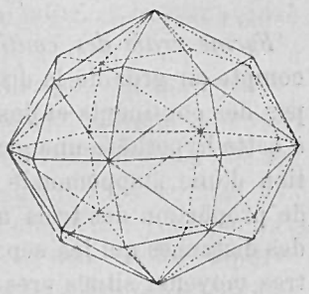


Fig. 22.

Objections aux analogies physiques. — L'assimilation que fait M. Green d'une sphère à une série de cylindres circulaires de diamètres décroissants (*fig.* 23) et de hauteur infiniment petite n'est pas admissible. Les conditions de résistance à l'écrasement sont, en effet, très différentes pour les deux bases de chacun de ces cylindres, lesquelles sont en contact avec des cercles de diamètres différents. C'est là un trompe-l'œil, un emploi illégitime de la méthode infinitésimale,

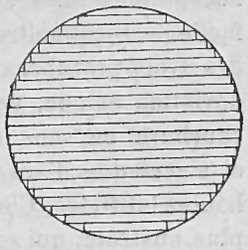


Fig. 23.

qui contredirait les lois connues sur la résistance des matériaux. On peut remarquer en outre que, si le raisonnement était admis, il conduirait à une double pyramide tétraédrique dont la base serait le triangle équilatéral inscrit dans un grand cercle et non point à un tétraèdre ou à un hexatétraèdre.

Forme vraie des continents. — Si le tétraèdre rend compte en gros de la disposition générale en trois groupes des continents et des mers, il ne faut pas demander à cette hypothèse une grande précision. La seule inspection d'une mappemonde montre les grandes différences de proportion des trois masses continentales, l'inégalité des distances qui les séparent et qui séparent leurs centres moyens, situés presque à l'équateur pour le couple Europe-Afrique et le couple Amérique, et au moins par 45° N. pour le couple Asie-Océanie. Nous sommes donc bien loin des formes géométriques ou régulières d'un polyèdre sphérique. Mais une objection plus grave se présente. Il n'est pas exact, comme le prétend M. Green, que la partie australe de chaque continent soit déviée vers l'est. Si l'on considère le phénomène toujours *grosso mode*, c'est-à-dire l'Amérique du Sud tout entière par rapport à l'Amérique du Nord, l'Australie et l'Asie, l'Afrique australe et le Sahara, la formule peut sembler acceptable; mais si l'on y met plus d'attention, il est facile de reconnaître que ce sont les parties équatoriales des trois protubérances qui présentent le maximum de déviation et que, vers le 10e parallèle sud environ, une courbure en sens contraire commence à se produire et s'accentue d'autant plus que l'on s'avance vers les hautes latitudes. C'est ainsi que le cap Horn, la pointe la plus australe, qui se prolonge jusqu'au 56e parallèle, est à une distance de 40° environ à l'ouest du cap San-Roque et que le cap de Bonne-Espérance sur le 36e parallèle est encore à 26° ouest du cap Guardafui. La direction seule des côtes orientales de ces deux continents, presque N.-E., suffirait à montrer l'exagération de la forme adoptée par M. Green et qu'il cherche à expliquer. Même l'Australie est déjà dans une position moins excentrique que la Nouvelle-Guinée, précisément située sur l'équateur et qui semble la position extrême des terres asiatiques.

Il semble donc probable que, si l'on pouvait suivre sous les eaux les pointes méridionales des continents, c'est vers l'ouest et non vers l'est qu'elles continueraient à se diriger.

Objections à la théorie de la torsion. — La théorie tétraédrique, destinée à donner la clef d'une déviation générale vers l'est de la partie australe des continents, ne semble donc plus d'une grande portée, puisque cette déviation ne se prolonge pas indéfiniment vers le sud. Mais en supposant même que les contours généraux des continents fussent bien ceux dont parle M. Green, les doutes les plus graves n'en subsisteraient pas moins sur la cause de cette torsion terrestre. L'hypothèse exige, en effet, que les portions australes soient plus rapprochées de l'axe terrestre que les protubérances boréales, et rien jusqu'ici ne paraît justifier cette assertion. L'Afrique australe constitue, au contraire, un grand plateau dont l'altitude moyenne est notablement supérieure à celle du Sahara, et l'Amérique du Sud est loin d'être une zone de faible relief (Brésil, chaîne des Andes). Si d'autre part l'Australie vient à l'appui de cette thèse, l'Europe présente un relief au-dessous de la moyenne, hors de proportion avec celui de l'Asie et de l'Amérique du Nord, dont il ne devrait pas différer beaucoup.

Quant à la cause de la torsion, c'est-à-dire la différence des vitesses relatives de rotation des points du

tétraèdre, elle semble hors de proportion avec l'effet produit, une variation de 16.000 mètres dans le relief moyen (8.000 mètres profondeur de l'Océan, 8.000 mètres hauteur des montagnes) ne représentant que 1/398 du rayon terrestre et ne pouvant donner lieu, par conséquent, qu'à une augmentation ou une diminution de 1/398 de la vitesse de rotation. A l'équateur, où cette vitesse maximum est de 464 mètres par seconde, la variation de vitesse ne serait donc que de $1^m,16$ par seconde, quantité absolument insuffisante pour expliquer de pareilles déviations, sans compter que le mouvement de l'écorce étant fort lent, les vitesses de rotation vont se répartissant et s'égalisant peu à peu.

Zone de rupture intercontinentale. Objection à la théorie des marées. — Nous ne croyons donc pas que l'explication donnée par la torsion soit acceptable, mais il n'en reste pas moins vrai qu'un effort général dû à une cause supérieure a dû présider à l'arrangement des parties émergées pour leur donner cette déviation équatoriale vers l'est, tandis que les parties polaires sont en retard à l'ouest. La zone médiane de dépression et de fracture nettement visible reste aussi à expliquer si l'on ne se contente pas de la torsion tétraédrique.

Quant à la théorie des marées luni-solaires que M. Green invoque pour expliquer l'inclinaison de la ligne de fracture médiane sur l'équateur, elle est difficilement acceptable si l'on songe, d'après les recherches de l'éminent astronome anglais G. Darwin, que la lune a eu une influence prépondérante à l'époque où notre sphéroïde était encore à l'état visqueux et que cette influence s'exerçait sensiblement dans le plan de l'équateur ; la position de l'écliptique n'a donc pas influé d'une façon notable sur la situation de la marée terrestre maximum, et par conséquent sur les fractures qu'elle a pu produire.

On peut aussi se demander si ces marées étaient vraiment sensibles à l'époque de la première consolidation de la croûte, et si le globe était susceptible d'éprouver des vibrations élastiques dans toute sa masse déjà si dense et si peu mobile : on peut en douter quand on considère l'influence assez minime qu'exercent la lune et le soleil sous le sphéroïde sensible des eaux.

Inclinaison de l'axe de rotation sur l'écliptique. — A l'inverse des astronomes, qui rattachent cet élément important de chaque planète à la formation du système tout entier, M. Green cherche à en rendre compte par les conditions particulières de notre monde, seulement son idée fondamentale, l'attraction du soleil sur les protubérances boréales, inspirée évidemment par le phénomène de la précession des équinoxes, n'a pas été développée d'une façon logique. On sait, en effet, que la précession est le résultat d'une composition de deux rotations, celle de la terre autour de son axe, et une seconde rotation très faible de la terre autour d'un axe horizontal situé dans le plan de l'écliptique, perpendiculairement au rayon vecteur qui joint le centre du globe au centre du soleil ou de la lune. Cette dernière rotation est produite par l'attraction inégale du soleil ou de la lune sur les portions de la protubérance équatoriale, résultant de l'aplatissement, qui se trouvent placées dans le plan de cet astre. Or la composition de ces deux rotations montre que l'axe des pôles doit s'incliner dans le sens perpendiculaire au rayon vecteur d'une quantité minime, qui est de 50″ par an environ, et tourner ainsi lentement autour de sa position primitive, décrivant un petit cercle entier en 26.000 ans environ. Si donc la théorie tétraédrique était exacte et qu'à l'origine l'axe des pôles eût été normal au plan de l'écliptique, l'inégale attraction du soleil et de la lune sur les protubérances boréales, estimées de

même ordre que le renflement équatorial, aurait au plus fait dévier l'axe des pôles d'un angle très faible en lui faisant décrire un cône de cet angle autour de sa position initiale.

Il est tout à fait inadmissible, eu égard aux dimensions possibles des pointements tétraédriques, que la valeur de cet angle eût dépassé au maximum quelques minutes et qu'elle ait pu atteindre l'inclinaison actuelle de 23° 28′ sans entrainer forcément une rotation beaucoup plus rapide de l'axe des pôles. Il ne faut pas oublier en outre que l'attraction sur la protubérance australe D, dont la distance au soleil était constante à l'origine, viendrait contre-balancer en partie le balancement produit par les protubérances boréales et qu'il en serait de même du renflement équatorial.

Quant au cône, tangent à l'écliptique, formé par les axes des protubérances boréales, il ne pourrait satisfaire à l'équilibre cherché et résoudre la question que s'il roulait lui-même sur le plan de l'écliptique, son axe décrivant un cercle entier pendant une révolution de la terre autour du soleil. Cette dernière observation achève de montrer que les preuves astronomiques du système tétraédrique sont loin de présenter la rigueur nécessaire en ces délicates matières; et pourtant ce n'est pas là encore l'objection la plus décisive qui oblige, croyons-nous, à repousser cette ingénieuse hypothèse.

Le système tétraédrique et les grandes lignes du relief terrestre. — Au moins tel qu'il a été exposé jusqu'ici, le système tétraédrique n'est qu'un essai de systématisation des lignes de rivage, et, comme nous l'avons bien souvent dit, ces lignes ne doivent pas prendre une importance aussi excessive. L'affleurement de la masse des eaux, variable avec une foule de circonstances, n'a pas la valeur des grandes lignes de fracture émergées ou

immergées, tout particulièrement des systèmes de montagnes continentaux ou sous-marins qui constituent l'ossature vraie de notre globe. En un mot une systématisation rationnelle doit être avant tout géologique, car c'est la géologie qui explique et donne la clé de la géographie physique.

Disons enfin que l'hypothèse de M. Green ne recherche pas la précision et que, par conséquent, il est plus difficile avec elle qu'avec toute autre de constituer un réseau pouvant réellement mettre en évidence une loi de symétrie dans la disposition des accidents du relief. La symétrie si pauvre du tétraèdre permettait tout au plus de le conserver comme une représentation schématique destinée à grouper *grosso modo* un certain nombre de faits de l'orographie terrestre, ce qui peut offrir certains avantages au point de vue didactique.

V. — REPRÉSENTATION DES GRANDES LIGNES DU RELIEF PAR D'AUTRES COURBES QUE LES GRANDS CERCLES DE LA SPHÈRE.

Avant de clore cette étude sur la systématisation des accidents, il importe de rappeler les efforts tentés par certains savants pour rendre compte de l'orographie générale du globe au moyen de courbes qui ne sont plus des grands cercles.

M. Jourdy, chef d'escadron d'artillerie, membre de la Société géologique de France, a exposé (*) une théorie au moyen de laquelle il cherche à rendre compte des grands alignements de cette zone de dépression intercontinentale, dont l'axe, assez difficile à fixer du reste, constitue la route d'Orient. Il a cherché aussi, au moyen d'un réseau

(*) *Revue scientifique*, 1er semestre 1887, p. 129 et 334.

de lignes droites, tracées sur un planisphère de Mercator, à mettre en évidence les formes géométriques des continents. Cette méthode l'a conduit à admettre que la direction des fractures est constante sur le globe, c'est-à-dire qu'elle est représentée fidèlement par une ligne coupant les méridiens sous le même angle et qui est, on le sait, une loxodromie. Poursuivant l'explication de ce fait, il a supposé un mouvement de torsion d'un hémisphère sur l'autre, mouvement produit par une compression axiale, dirigée de chaque pôle vers le centre, et par une rotation. Ce double effort, dont il paraît du reste impossible d'entrevoir la cause, aurait eu pour effet bizarre de disjoindre les hémisphères plutôt que de les appuyer l'un contre l'autre.

Sans entrer dans la discussion approfondie de cette théorie, nous ajouterons qu'on peut lui reprocher à juste titre son manque de justesse dans le choix des alignements, l'emploi du planisphère qui déforme si complètement les directions réelles, la méconnaissance des grandes lignes émergées et immergées de la géologie, enfin l'hypothèse, peu conforme à la mécanique, de la rupture d'une croûte sphérique suivant des loxodromies, courbes non fermées, spiraliformes, tandis que jusqu'ici aucune rupture de ce genre ne s'est produite que suivant des courbes fermées.

VI. — CONCLUSIONS GÉNÉRALES.

Le problème de la systématisation des accidents terrestres peut-il être considéré comme résolu ? La loi véritable de la symétrie de notre planète est-elle découverte ?

La réponse à cette question ne peut encore être donnée d'une façon définitive ; nous croyons cependant que les travaux que nous venons de résumer ont montré dans

quelle voie et par quelle méthode on pourra y arriver.

La comparaison du système pentagonal et du système tétraédrique nous a convaincu de la supériorité incontestable du premier, lequel possède le summum de la symétrie sphérique, c'est-à-dire la plus riche que l'on puisse appliquer à l'enchaînement des faits naturels. Si l'on peut élever quelques doutes sur son adaptation actuelle et sur les preuves théoriques encore vagues qui servent à l'étayer, il est impossible de se refuser à lui reconnaître le caractère d'un réseau complet pouvant coordonner dans leur immense variété les accidents du relief terrestre. Son auteur était avant tout un maître en géologie, qui possédait d'instinct le tact si nécessaire en ces matières et le don d'apprécier et de discerner l'importance relative des grands alignements du globe. Malgré les immenses travaux accumulés par Élie de Beaumont et ses disciples, le réseau pentagonal n'a jamais été populaire et il a été abandonné ces dernières années par la plupart des géologues.

On peut se demander quelles sont les causes de ce discrédit, qui n'est sans doute que momentané. Nous en voyons deux principales.

Tout d'abord la grande difficulté qu'éprouvent les géologues et généralement les personnes adonnées aux sciences naturelles à pénétrer et à se rendre familières des notions aussi ardues de géométrie et de géodésie. La vérification d'un cercle du réseau ou l'identification d'un cercle observé est, en effet, malgré les perfectionnements des instruments et des méthodes de sphérodésie, une opération délicate et laborieuse qui exige un outillage spécial et une assez grande habileté de calcul (*). En

(*) C'est dans ce but que M. de Chancourtois a imaginé et fait construire tout un système d'instruments de sphérodésie permettant de se livrer à tous les tracés de géométrie sphérique et en particulier à tous ceux exigés par l'étude du réseau penta-

second lieu, on est facilement disposé à repousser un système qui, tout en prétendant donner la clé de l'orographie et de la stratigraphie terrestres, ne fournit pas immédiatement des figures simples analogues aux formes simplifiées des continents émergés, si apparentes sur une mappemonde, et cela sans réfléchir que ces formes ne constituent qu'une faible partie des lignes du relief terrestre.

La géologie synthétique traverse, selon nous, la même évolution qu'ont subie les sciences physiques au commencement de ce siècle. Après avoir posé en principe la simplicité des lois de la nature, on est arrivé à reconnaître que les phénomènes naturels, beaucoup plus complexes, n'obéissent pas toujours à des lois algébriquement simples, mais que ces lois particulières tendent vers des lois-limites plus générales qui en expliquent la variété et établissent clairement le principe d'harmonie qui régit notre univers.

Nous sommes convaincu qu'il en sera de même en géologie synthétique, où la recherche d'une simplicité apparente dans les lois de coordination fera place à une appréciation plus juste de la complexité et de l'importance des faits de détail, trop relégués aujourd'hui au second plan. On arrivera ainsi à la formule définitive qui résumera l'histoire du relief terrestre.

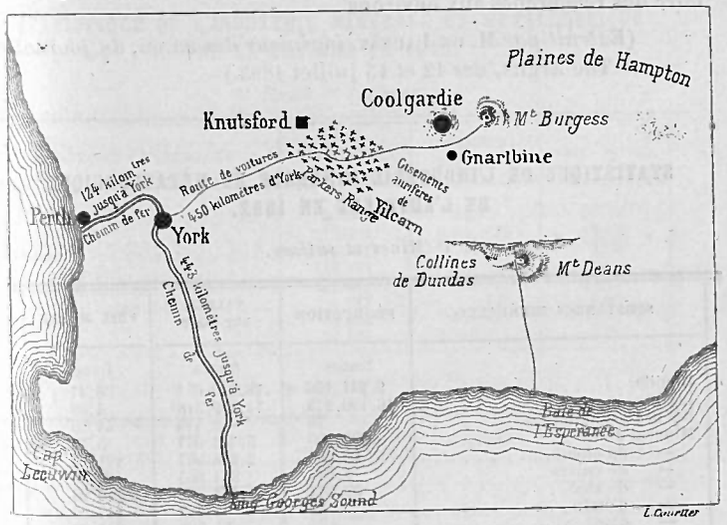
---

gonal. Il a ainsi établi des sphères armillaires à double mouvement et munies de coupoles axiales, des règles (grand cercle), des équerres (triangle birectangle) des rapporteurs sphériques, un compas sphérique très original, enfin le triangle élémentaire scalène (90°, 36°, 60°). Tous ces instruments s'appliquent à des globes spéciaux aux échelles décimales du 1/50.000.000 et du 1/100.000.000.

BULLETIN.

DÉCOUVERTE DE NOUVEAUX GISEMENTS D'OR A COOLGARDIE (AUSTRALIE OCCIDENTALE).

Tandis que la partie orientale de l'Australie produit, depuis près d'un demi-siècle, des quantités d'or considérables, la richesse aurifère de l'Australie Occidentale n'est encore qu'assez vaguement connue par suite de l'immensité des territoires à parcourir, du manque d'eau, etc. Cependant, on y a signalé les champs aurifères d'Yilgarn, Murchison, Gascoigne, Ashburton, Pilbarra et Kimberley, à l'est desquels commence une grande région inexplorée et déserte qui s'étend jusqu'à l'Australie du Sud.



Les environs de *Coolgardie*, dans le champ d'Yilgarn, ont tout spécialement appelé l'attention cette année. Comme le montre le croquis ci-dessus, on y accède par la ville d'York, reliée soit à Perth, soit à Albany (King Georges Sound), par des chemins de fer. De York à Coolgardie, la distance est de 450 kilomètres sur de mauvaises routes. Le pays est très stérile et dénudé : les bois y

manquent et quelques dépressions seulement retiennent les pluies d'orage.

La géologie de la région a été étudiée par M. Woodward, géologue du Gouvernement. D'après lui, entre Southern Cross et Gnarlbine, sauf une bande étroite de terrain métamorphique, on ne rencontre que du granite. Le granite existe également auprès de Coolgardie. C'est en ce dernier point que l'on a découvert, en 1892, des alluvions aurifères avec quelques filons quartzeux, dont le plus remarquable, dirigé N.-O. et large de 2m,50 au plus, a fourni rapidement à un mineur, nommé Bayley, 4.500 onces (140 kilogr.) d'or. Le filon qui recoupe parfois nettement les terrains encaissants se perd assez vite au sud et au nord; on n'y a, d'ailleurs, fait encore que très peu de travaux, tout l'or qu'on en a extrait ayant été trouvé dans une petite poche où il était associé avec de l'oxyde de fer provenant de la décomposition des pyrites. A la suite de cette découverte, qui a fait sensation, il était déjà arrivé, en juillet 1893, plus de six cents hommes pour faire des recherches aux environs.

(*Extrait par* M. DE LAUNAY, *ingénieur des mines, du journal* The Argus, *des* 12 et 15 juillet 1893.)

STATISTIQUE DE L'INDUSTRIE MINÉRALE ET MÉTALLURGIQUE DE L'AUTRICHE EN 1892.

1° *Mines et salines.*

SUBSTANCES MINÉRALES	PRODUCTION	VALEUR sur place	PRIX MOYEN
	tonnes	francs	francs
Houille	9.241.126	78.249.674	8,47
Lignite	16.190.273	74.339.318	4,59
Roches asphaltiques	78	3,475	44,55
Minerai de fer	993.290	5.742.967	5,78
— de plomb	13.265	2.278.007	171,73
— de cuivre	8.636	814.665	94,33
— de zinc	33.944	1.433.502	42,23
— d'étain	33	7.163	217,00
— d'or	164	36.768	224,20
— d'argent	14.171	6.601.322	465,83
— de mercure	79.447	2.489.338	31,33
— d'antimoine	97	29.060	300,00
— de manganèse	4.558	135.430	29,71
— de bismuth	856	55.100	64,37
— de wolfram	72	48.921	679,45
Pyrites de fer	1.804	51 835	28,73
Graphite	20.978	1.573.420	75,00
Sel	284.983	48.824.047	171,31

2° *Usines.*

MÉTAUX	PRODUCTION	VALEUR sur place	PRIX MOYEN
	tonnes	francs	francs
Fonte	630.790	60.310.647	95,61
Plomb	9.772	3.751.557	383,90
Cuivre	837	1.244.405	1.483,16
Zinc	5.237	3.123.530	596,43
Etain	72	210.404	2.922,28
Mercure	542	2.836.350	5.233,11
Antimoine	114	109.888	963,92
	kilogr.		
Or	13	43.423	3.340,00
Argent	36.558	8.135.553	222,53
Bismuth	548	11.770	21,47

(Extrait du *Statistisches Jahrbuch des k. k. Ackerbau-Ministeriums für* 1892.)

STATISTIQUE DE L'INDUSTRIE MINÉRALE ET MÉTALLURGIQUE DE LA BAVIÈRE EN 1892.

1° *Mines et Salines.*

SUBSTANCES MINÉRALES	PRODUCTION	VALEUR sur place	PRIX MOYEN
	tonnes	francs	fr. c.
Houille	713.052	8.931.844	12,52
Lignite	13.367	77.061	5,76
Minerai de fer	146.393	733.103	5,00
— de cuivre	1.831	37.915	20,70
— de manganèse	137	1.353	9,87
Graphite	4.036	311.141	77,09
Sel	42.307	2.215.547	52,36

2° *Usines.*

MÉTAUX	PRODUCTION	VALEUR sur place	PRIX MOYEN
	tonnes	francs	fr. c.
Fonte	77.902	4.481.249	57,52
Fer en barres	64.646	9.942.656	153,80
Acier	70.790	9.287.351	131,19

(Extrait de l'*Œsterreichische Zeitschrift für Berg und Hüttenwesen.*)

PRODUCTION MINÉRALE ET MÉTALLURGIQUE DE L'ESPAGNE EN 1890-1891 (*).

SUBSTANCES MINÉRALES	PRODUCTION	VALEUR sur place	PRIX MOYEN
	tonnes	francs	francs
Combustibles minéraux	1.287.978	10.817.538	8,39
Minerai de fer	5.679.600	28.368.390	4,99
— de cuivre	2.477.889	12.803.400	5,16
— de plomb	363.349	28.117.730	77,38
— de zinc	62.577	2.303.250	36,80
— d'étain	51	26.582	521,21
— de mercure	32.139	8.054.628	250,61
— d'argent	14.768	252.512	17,09
— d'antimoine	856	61.125	71,40
— de manganèse	170	2,550	15,00
— de cuivre et cobalt	5.304	423.207	80,00
— de cobalt	116	22.500	194,00
— de nickel	12	840	70,00
— bitumineux	81	900	11,11
— de soufre	31.181	405.444	13,00
Pyrites de fer	170.948	2.735.168	16,00
Graphite	100	4.304	43.04
Sel (de mines)	140.357	1.496.569	10,66

MÉTAUX	PRODUCTION	VALEUR sur place	PRIX MOYEN
	tonnes	francs	francs
Fonte	171.464	11.763.449	68,60
Fer	65.216	14.700.618	225,41
Acier	78.413	15.504.086	197,72
Cuivre (y compris des mattes)	44.673	25.647.283	574,11
Plomb	155.646	67.005.075	430,49
Zinc	5,841	4.242.926	726,40
Mercure	1.765	9.858.334	5.583,45
Arsenic	52	20,800	400,00
Argent	47.607kg	7.962.678	167,25

PRODUCTION MINÉRALE DU PORTUGAL EN 1889.

SUBSTANCES MINÉRALES	PRODUCTION	VALEUR	PRIX MOYEN
	tonnes	francs	fr. c.
Charbon	20.539	310.780	15,13
Minerai de fer	1.588	8.893	5,60
— de cuivre	181.529	2.436.764	13,42
— d'étain	6	8.474	1.412,36
— d'antimoine	1.509	800 193	530,00
— de manganèse	5.893	445.511	75,60
— de plomb	1.308	243.634	186,26
— d'or	13	1.915	147,32

(*) Du 1er juillet 1890 au 30 juin 1891.

SUR
LES MOTEURS ÉLECTRIQUES
A COURANTS ALTERNATIFS

Par M. C. WALCKENAER, Ingénieur des mines.

BIBLIOTHÈQUE NATIONALE DES MINES

Pour la transmission de l'énergie à longue distance et sa distribution, les courants alternatifs se distinguent par l'extrême simplicité avec laquelle l'emploi de transformateurs sans organes mobiles permet de faire varier les deux facteurs de la puissance, potentiel et intensité. Ils sont caractérisés aussi par les facilités d'isolation, résultant de l'influence favorable qu'ils exercent sur la résistance des diélectriques. En fait, les installations les plus étendues, destinées à l'éclairage, adoptent aujourd'hui fréquemment les courants alternatifs.

Lorsqu'il s'agit de recueillir l'énergie sous forme de travail mécanique, la nature alternative des courants implique des difficultés spéciales, qui ont fortement exercé, depuis quelque temps, la sagacité des inventeurs. L'une des principales étant relative au démarrage des moteurs, la production des champs magnétiques tournants au moyen de courants combinés s'est présentée comme une solution rationnelle en même temps qu'élégante, rappelant un peu l'artifice du mécanicien qui pour supprimer des points morts, dans la transformation du

mouvement alternatif en rotation, associe deux ou plusieurs mouvements rectilignes de phases différentes.

Cette solution, dans sa mise en œuvre la plus directe et la plus simple, exige des lignes à trois fils au moins. Ce n'est pas là un inconvénient considérable quand le réseau ne doit alimenter que des moteurs; mais si l'on veut en même temps l'utiliser pour un service d'éclairage relativement important, les inégalités de la puissance empruntée aux différents circuits peuvent réagir d'une manière fâcheuse sur le fonctionnement de la distribution.

On verra plus bas que, par des méthodes convenables de réglage, il paraît possible de surmonter cette difficulté.

Toutefois, s'il s'agit d'annexer une distribution de force à un service d'éclairage, le problème tel qu'il se pose en pratique peut être de constituer des moteurs capables d'être attelés sur des distributions existantes de courants alternatifs pour lumière, simplement monophasés.

Au moyen d'artifices qui font le plus grand honneur aux idées théoriques d'où ils ont été inspirés, l'on sait partager un courant alternatif en deux courants de même période, présentant l'un par rapport à l'autre une différence de phase constante. Il est donc possible, en principe, d'actionner des moteurs à champ tournant au moyen d'un courant alternatif simple, à la condition de le diviser et d'en transformer ainsi l'une des branches. Cette opération ne laissant d'ailleurs pas d'être délicate, et l'emploi du champ tournant n'étant indispensable que pour la période du démarrage, la solution de cette espèce qui a été proposée le plus récemment n'emploie le décalage d'une partie du courant que pour la mise en route, et substitue ensuite au champ tournant un simple flux alternatif (Brown).

On se propose dans ces notes, d'abord d'examiner

sommairement les principes sur lesquels reposent les systèmes de moteurs à courants alternatifs qui sont aujourd'hui les mieux connus, celui des moteurs synchrones et celui des moteurs à champ tournant, puis de décrire un exemple récent de l'application de ces principes à une distribution d'énergie par courants diphasés.

Pour l'aperçu théorique, on a consulté, outre les traités sur la matière, les publications de MM. Hospitalier, Rechniewski (*), Sahulka (**), Dobrowolski, Kapp, Brown (***), le mémoire lu en avril 1893 par M. Snell devant *the Institution of electrical Engineers* et la discussion subséquente; on a particulièrement mis à profit les études de MM. Hutin et Leblanc (****).

L'exemple d'application, décrit au chapitre II, est emprunté à la distribution que MM. Schneider et Cie installent au jour sur le territoire étendu des houillères de Decize. Les conditions avantageuses de la production de la vapeur sur un siège d'extraction y favorisent la création d'une station génératrice, et comme dans l'espèce on se propose d'actionner principalement des récepteurs mécaniques, l'emploi des moteurs à champ tournant permanent trouvait bien sa place dans cette application.

Nous devons de vifs remerciements à M. H. Schneider pour la bonne grâce avec laquelle il nous a mis à même de visiter cette intéressante installation. Nous avons rencontré une précieuse obligeance auprès de ses collaborateurs, principalement M. Barba et M. Faiveley.

(*) *Société de Physique* et *Soc. internationale des Électriciens*, 1891.

(**) *Electrotechnische Zeitschrift*, 1891.

(***) *La Lumière électrique*, 1891 et 1893.

(****) *La Lumière électrique*, t. XL, p. 201, et t. XLI, p. 123, 1891.

CHAPITRE Ier.

GÉNÉRALITÉS SUR LES MOTEURS A COURANTS ALTERNATIFS.

§ 1. — *Moteurs synchrones.*

Lorsqu'un circuit indéformable, mobile autour d'un axe fixe et parcouru par un courant i, se meut sous l'action d'un courant i' fixe dans l'espace, on a pour une rotation infiniment petite $d\alpha$, en appelant c le couple qui agit sur le circuit mobile et dw le travail produit par le déplacement,

$$c\,d\alpha = dw = i\frac{d\Phi}{d\alpha}\,d\alpha, \tag{1}$$

Φ étant le flux d'induction magnétique émané du courant i' et pénétrant dans le circuit du courant i par sa face négative.

Si les deux courants i, i' étaient seuls en présence, dans l'air ou dans un milieu homogène de perméabilité invariable μ, l'on aurait

$$\Phi = \mathrm{M}i', \tag{2}$$

M étant le coefficient d'induction mutuelle des deux circuits, qui ne dépendrait que de leurs formes et de leur position relative. Ce coefficient est en ce cas donné par la formule

$$\mathrm{M} = \mu\iint\frac{ds\,ds'\cos\varepsilon}{r}, \tag{3}$$

dans laquelle ds et ds' sont deux éléments de courant, ε est leur angle, r leur distance, et la double sommation s'étend à tous les éléments de l'un des courants pris avec tous les éléments de l'autre.

Si le milieu, sans être homogène, était composé de parties dont chacune offrît une perméabilité magnétique invariable, la formule (2) subsisterait encore pour chaque arrangement déterminé des circuits et du milieu, M étant cette fois une quantité dont la valeur à chaque instant dépendrait de l'arrangement du milieu en même temps que de la position des circuits, mais qui demeurerait indépendante de i et i'.

Seulement, dans les machines électriques, aucune de ces hypothèses n'est réalisée. Dans le but de donner au flux magnétique, dont les variations déterminent le couple moteur et le travail d'après les relations (1), des valeurs suffisamment élevées, on a soin que le milieu, au travers duquel ce flux se transmet, soit composé le plus possible de fer doux, dont la perméabilité n'est pas constante, en sorte que la formule (2) n'est pas applicable en toute exactitude, même si on laisse de côté les effets de l'hystérésis et du magnétisme rémanent.

Nous serons cependant conduits plus loin à faire usage de cette formule à titre d'approximation.

Mais auparavant, conservant comme point de départ les relations (1), cherchons à obtenir quelques données générales sur le flux d'induction Φ. Nous examinerons d'abord le flux engendré par le système fixe et le courant, supposés seuls dans l'espace. L'introduction du système mobile et du courant i troublera les résultats de cet examen, mais les premières notions acquises serviront de guide pour la suite.

Soit donc un système inducteur fixe comportant $2p$ bobines parcourues par un même courant i' et $2p$ pièces polaires, de polarités alternées, symétriquement rangées

autour d'un axe O. Nous assimilerons chaque bobine à une suite de circuits plans fermés sur eux-mêmes (solénoïde). Les dispositions des pièces de fer et des solénoïdes sont telles que le système présente, abstraction faite de la circulation du courant, les symétries ci-après, dont pour fixer les idées les *fig.* 1 et 2, Pl. XI, montrent des exemples :

1° Symétrie par rapport au plan de la figure (perpendiculaire à l'axe O);

2° Symétrie d'ordre $2p$ autour de l'axe O;

3° Symétrie par rapport à chacun des p plans, angulairement écartés de $\frac{2\pi}{2p}$, qui passent par l'axe O et par les axes OA_1, OB_1, OA_2... des pièces polaires;

4° Comme conséquence des symétries précédentes, symétrie par rapport à chacune des p droites OD_1, OE_1... bissectrices des angles A_1OB_1, B_1OA_2...

Si maintenant on tient compte du sens de la circulation du courant dans chacun des solénoïdes, la symétrie par rapport au plan de la figure n'existe plus en ce qui concerne les courants eux-mêmes, mais elle subsiste en ce qui concerne leurs actions magnétiques extérieures, puisque chaque circuit élémentaire équivaut à ce point de vue à un feuillet magnétique qui présenterait la symétrie considérée. Quant à la symétrie autour de l'axe O, elle n'est plus que d'ordre p; mais le système reste symétrique par rapport à chacun des p plans passant par l'axe O et par OA_1, OB_1, OA_2...

Le champ magnétique engendré par ce système, supposé seul, est par conséquent symétrique par rapport au plan de la figure, symétrique d'ordre p autour de l'axe O, et symétrique par rapport à chacun des p plans passant par l'axe O et les axes des pièces polaires.

Il résulte de cette dernière propriété qu'en un point quelconque de l'un de ces plans, la force magnétique

est comprise dans le plan. Sur chaque élément de ce plan partent donc ou aboutissent tangentiellement deux tubes de force, symétriques de part et d'autre du plan.

En outre, si l'on admet que la force magnétique en chaque point, quand le courant est i', soit égale et contraire à ce qu'elle serait si le courant était $-i'$, je dis qu'en un point quelconque de l'un des plans passant par l'axe O et par les droites OD_1, OE_1..., la force magnétique est perpendiculaire à ce plan, et que les tubes d'induction sont, au sens près du flux, symétriques par rapport à ce plan.

En effet, la droite OD_1 étant l'intersection du plan considéré, que nous appellerons P, avec le plan du tableau, faisons tourner le système de 180° autour de cette droite. Le système revient en coïncidence avec lui-même au point de vue géométrique, mais les faces des feuillets de solénoïdes se trouvent inversées : c'est donc comme si l'on avait le système primitif avec le courant $-i'$ au lieu du courant i'. Cela posé, considérons deux points m et m' symétriques par rapport à la droite OD_1, et les vecteurs $\overline{mf}$ et $\overline{m'f'}$ qui représentent les forces magnétiques en ces deux points. La rotation ci-dessus amènera m' à l'emplacement primitif de m, et $\overline{m'f'}$, d'après ce qui précède, devra dans sa nouvelle position se trouver égal et directement opposé à ce qu'était $\overline{mf}$ avant le mouvement. C'est dire que si dans l'état premier du système, on considère en m le vecteur $\overline{mf}$, et en m' le vecteur $-\overline{m'f'}$ égal et opposé à $\overline{m'f'}$, ces deux vecteurs $\overline{mf}$ et $-\overline{m'f'}$ sont symétriques par rapport à la droite OD_1. Maintenant, la symétrie générale par rapport au plan du tableau fait que si l'on considère le point m'' symétrique de m' par rapport à ce plan, le vecteur $-\overline{m''f''}$ est symétrique de $-\overline{m'f'}$ par rapport audit plan. Comparons alors

entre eux les deux vecteurs $\overline{mf}$ et $-\overline{m''f''}$: de ce que le premier est symétrique de $-\overline{m'f'}$ par rapport à la droite OD_1, et le second symétrique de $-\overline{m'f'}$ par rapport au plan du tableau, il résulte que ces deux vecteurs sont symétriques l'un de l'autre par rapport au plan P.

Ainsi, deux points m et m'' symétriques par rapport au plan P, offrent deux forces magnétiques $\overline{mf}$ et $\overline{m''f''}$ égales en grandeur, et dirigées de telle sorte que $\overline{mf}$ et $-\overline{m''f''}$ sont symétriquement disposés par rapport à P.

De là découlent immédiatement les propriétés énoncées. En effet, en faisant m et m'' infiniment voisins, les angles égaux que $\overline{mf}$ et $-\overline{m''f''}$ font avec le plan P de part et d'autre de ce plan, ne peuvent que tendre chacun vers 90°, puisqu'à la limite $\overline{mf}$ et $\overline{m''f''}$ doivent coïncider, le champ offrant en chaque point une force unique et déterminée. D'autre part, si l'on considère un tube élémentaire d'induction correspondant à un flux $\delta\Phi$, à partir de l'élément sur lequel il traverse le plan P, on aura des trajectoires symétriques par rapport au plan P en suivant le flux $\delta\Phi$ dans un sens et le flux $-\delta\Phi$ dans l'autre.

Dans le champ magnétique dont nous venons ainsi d'examiner les symétries, introduisons maintenant un système mobile. Considérons d'abord un plan OM passant par l'axe O, mobile autour de cet axe, et dont la position est définie par l'angle α qu'il fait avec une direction fixe Ox. Supposons que ce plan entraîne dans ses déplacements une bobine, en forme de solénoïde, mais sans réaction magnétique. Cette bobine a son axe perpendiculaire au plan OM, et elle est symétrique par rapport à ce plan. Le courant inducteur i' conservant une même valeur i'_1, voyons comment varie avec α le flux d'induction total Φ qui pénètre dans les spires (feuillets) de cette bobine par leurs faces A'.

Supposons d'abord que le plan mobile OM soit en OA_1.

Alors, si nous considérons deux feuillets de la bobine symétriques par rapport à OM ou à OA_1, le flux qui entre dans l'un par sa face A', est de même grandeur et de même signe que celui qui entre dans l'autre par sa face $Æ$. Donc le flux total est nul.

Supposons maintenant que le plan OM soit en OD_1 : à deux feuillets s et s' symétriquement placées par rapport à OM ou OD_1 correspondent deux flux égaux en grandeur, et dirigés de telle façon que si l'un entre par la face A', l'autre changé de signe entrerait par la face $Æ$: donc ces deux flux sont de même signe et s'ajoutent. De plus, si à partir de cette position on compare les effets de deux déplacements de sens inverse, $d\alpha$ et $-d\alpha$, et si dans le déplacement $d\alpha$ le contour de s coupe un certain tube de force, dans le déplacement $-d\alpha$, le contour de s' couperait en sens inverse un tube symétrique comme forme, mais inverse comme sens de flux. Donc les déplacements $d\alpha$ et $-d\alpha$ s'équivalent au point de vue de la variation de Φ : donc Φ est maximum ou minimum.

Enfin il résulte de la symétrie du champ par rapport au plan OB_1, que si Φ passe pour OD_1 par un maximum de valeur Φ_1, il passera pour OE_1 par un minimum de valeur $-\Phi_1$.

Si, au lieu d'une bobine ayant ses spires parallèles au plan mobile OM, nous considérions une bobine ayant son axe dans ce plan, et par conséquent symétrique par rapport à ce plan, les conclusions seraient analogues, à cela près que les rôles des deux séries de plans OA_1, OB_1..., et OD_1, OE_1..., se trouveraient permutés.

En effet, supposons d'abord OM en OA_1. Pour chaque feuillet de la bobine, la moitié située à gauche du plan OM reçoit un flux égal à celui que reçoit la moitié de droite ; et, si OM subissait un déplacement infiniment petit $d\alpha$, les tubes de force que gagnerait le demi-feuillet de gauche, seraient de même grandeur et de même signe que ceux

que perdrait le demi-feuillet de droite : donc $\frac{d\Phi}{d\alpha}=0$; Φ est maximum ou minimum.

Supposons maintenant OM en OD_1. Pour chaque feuillet, le flux entrant par la moitié de gauche est égal au flux sortant par la moitié de droite, ou inversement : par conséquent $\Phi=0$.

Soit pour l'une, soit pour l'autre des deux dispositions de bobines, le flux d'induction qui pénètre dans le circuit mobile par une face déterminée est donc, pour une même valeur de i', une fonction périodique de α, de période $\frac{2\pi}{p}$, et il résulte de ce qui précède que cette fonction présente, à partir d'une des valeurs de α qui l'annulent, la succession des valeurs ci-après :

$$(4)\quad \begin{cases} \alpha=\alpha_0 & \Phi=0 \quad \frac{d\Phi}{d\alpha}=\left(\frac{d\Phi}{d\alpha}\right)_0, \\ \alpha=\alpha_0+\frac{2\pi}{4p} & \Phi \text{ maximum}=\Phi_1, \\ \alpha=\alpha_0+\frac{2\pi}{2p} & \Phi=0 \quad \frac{d\Phi}{d\alpha}=-\left(\frac{d\Phi}{d\alpha}\right)_0, \\ \alpha=\alpha_0+\frac{3}{4}\frac{2\pi}{p} & \Phi \text{ minimum}=-\Phi_1; \\ \alpha=\alpha_0+\frac{2\pi}{p} & \Phi=0 \quad \frac{d\Phi}{d\alpha}=\left(\frac{d\Phi}{d\alpha}\right)_0. \end{cases}$$

La fonction simple

$$(5)\qquad \Phi=\Phi_1 \sin p(\alpha-\alpha_0)$$

présenterait ces caractères.

Ces conclusions demeureraient les mêmes, si au lieu d'une seule bobine, nous considérions un système de p bobines, symétriquement disposées autour de l'axe O et tournant d'un mouvement commun, Φ désignant alors la somme des flux d'induction qui pénètrent dans les spire

de ces diverses bobines par les faces de même orientation (par rapport aux azimuts passant par l'axe O).

Les conclusions subsistent encore, si nous portons à $2p$ le nombre de bobines et l'ordre de symétrie du système mobile, pourvu que nous considérions comme positifs les flux qui pénètrent par les faces d'une certaine orientation pour les bobines de rang pair, et par les faces d'orientation contraire pour les bobines de rang impair.

Enfin, nous pouvons supposer que ces $2p$ bobines, tout en restant dépourvues de réactions magnétiques, soient portées par une carcasse en fer doux, pourvu que cette carcasse présente autour de l'axe O une symétrie assez complète pour qu'à tout instant les symétries que nous avons invoquées ne soient pas sensiblement altérées, et pourvu que la carcasse soit en outre parfaitement feuilletée, de façon qu'aucun courant ne s'y développe. A ces conditions, la carcasse influe sans doute d'une manière importante sur le champ à titre de pièce perméable constitutive du milieu étudié ci-dessus; mais ni sa forme ni son mouvement ne troublent sensiblement les raisonnements et les conclusions qui précèdent.

Nous sommes ainsi arrivés au cas où le système comprend une armature, mais tournant sans que ses bobines aient de réaction magnétique : c'est à peu près la situation d'une machine dont l'armature tournerait en *circuit ouvert*.

Il nous faut maintenant supposer le circuit fermé et les spires de l'armature parcourues par un courant variable i, qui suit alternativement dans un sens et dans l'autre les $2p$ bobines successives.

Ce courant modifie le champ magnétique d'une manière plus ou moins importante. Le champ présentera bien encore, à un instant quelconque, une symétrie d'ordre p

autour de l'axe O; mais nous ne savons plus, en rigueur, comment varie maintenant avec le temps le flux d'induction Φ qui, émané du courant i'_1, pénètre dans les spires du courant i.

C'est seulement si les pièces de ce système étaient de perméabilités magnétiques invariables, que l'on aurait, comme on l'a vu plus haut,

$$\Phi = M i'_1,$$

M ne dépendant que des positions relatives des divers éléments des circuits et du milieu, et étant par suite une fonction périodique de α, de période $\frac{2\pi}{p}$. Il en serait donc de même de Φ.

Cependant, par approximation, supposons qu'il en soit ainsi, et supposons que Φ puisse être représenté par la fonction périodique simple

$$\Phi = \Phi_1 \sin p(\alpha - \alpha_0). \tag{5}$$

Si l'armature tourne avec une vitesse constante ω l'on a

$$\alpha = \alpha_0 + \omega t, \tag{6}$$

et par suite :

$$\Phi = \Phi_1 \sin p\omega t. \tag{7}$$

Quant au courant i, il est produit par trois *f. é. m.* qui coexistent dans le circuit de l'armature : l'une qui lui est fournie par une source, dont nous sommes censés maîtres; l'autre qui est induite par le mouvement des spires de l'armature dans le champ; la troisième qui provient de la self-induction.

Nous supposons que la *f. é. m.* provenant de la source est une fonction périodique simple du temps,

de période T, de sorte qu'on a

$$E = E_1 \sin m(t + \theta), \tag{8}$$

en posant

$$\frac{2\pi}{T} = m.$$

Quant à la *f. é. m.* induite, elle a pour valeur

$$-\frac{d\Phi}{dt} = -p\omega\Phi_1 \cos p\omega t.$$

Enfin, pour la self-induction, il faut admettre que l'on peut, par approximation, la considérer comme dépendant d'un coefficient constant L. Cette hypothèse, pour être rigoureuse, exigerait déjà, si l'armature était immobile, que la carcasse et même les autres pièces du champ fussent de perméabilités magnétiques invariables; l'armature étant en mouvement au centre du système inducteur, elle suppose de plus que le flux de self-induction n'est pas sensiblement affecté par les variations périodiques que subit l'arrangement relatif, par rapport à l'armature, des pièces circumvoisines du système fixe.

S'il en est ainsi, l'on a

$$Ri + L\frac{di}{dt} = E_1 \sin m(t + \theta) - p\omega\Phi_1 \cos p\omega t, \tag{9}$$

d'où

$$\left\{\begin{aligned} i = {} & Ce^{-\frac{R}{L}t} + \frac{E_1}{\sqrt{R^2 + L^2 m^2}} \sin m(t + \theta - t_1) \\ & - \frac{p\omega\Phi_1}{\sqrt{R^2 + L^2 p^2 \omega^2}} \cos p\omega(t - t_2), \end{aligned}\right. \tag{10}$$

C étant une constante, mt_1 et $p\omega t_2$ étant des arcs du premier quadrant définis par

$$\operatorname{tg} mt_1 = \frac{Lm}{R}, \quad \operatorname{tg} p\omega t_2 = \frac{Lp\omega}{R}, \tag{11}$$

et les signes $\sqrt{\ }$ étant pris positivement.

Mais, si l'on suppose un régime périodique établi, le premier terme est nécessairement nul ou négligeable, et la valeur de i se réduit à la somme des deux derniers termes.

Il vient donc, en régime périodique,

$$(12)\quad \begin{cases} dw = p\omega\Phi_1 \left[\dfrac{E_1}{\sqrt{R^2+L^2m^2}} \sin m(t+0-t_1)\cos p\omega t \right. \\ \qquad\qquad \left. - \dfrac{p\omega\Phi_1}{\sqrt{R^2+L^2p^2\omega^2}} \cos p\omega(t-t_2)\cos p\omega t \right] dt, \end{cases}$$

ou

$$(13)\quad dw = p\omega\Phi_1 \left\{ \begin{array}{l} \dfrac{E_1}{2\sqrt{R^2+L^2m^2}} \left\{ \begin{array}{l} \sin[(m+p\omega)t+m(0-t_1)] \\ +\sin[(m-p\omega)t+m(0-t_1)] \end{array} \right\} \\ -\dfrac{p\omega\Phi_1}{2\sqrt{R^2+L^2p^2\omega^2}} [\cos p\omega(2t-t_2)+\cos p\omega t_2] \end{array} \right\} dt.$$

Deux cas sont à distinguer, suivant que $m-p\omega$ est différent de zéro ou égal à zéro.

Si $m-p\omega$ est différent de zéro, l'intégrale du second membre prise du temps zéro au temps t est la somme des termes suivants : une constante, trois termes périodiques simples, et le terme

$$-\frac{p^2\omega^2\Phi_1^2}{2\sqrt{R^2+L^2p^2\omega^2}} \cos p\omega t_2 . t.$$

Ce dernier terme, qui seul croît indéfiniment avec le temps, est essentiellement négatif, puisque le signe $\sqrt{\ }$ doit être pris positivement et que $p\omega t_2$ est compris entre zéro et $\frac{\pi}{2}$. Dans ces conditions, la machine ne peut, d'une manière continue, produire aucun travail utile : elle en absorbe au contraire au prorata de ce terme.

Donc, il faut de toute nécessité que l'on ait

$$p\omega = m,$$

ou

$$\omega = \frac{1}{p}\frac{2\pi}{T},$$

c'est-à-dire que la rotation de l'armature soit synchrone de la *f. é. m.* E, l'arc décrit pendant chaque période T étant $\frac{2\pi}{p}$.

Supposons qu'il en soit ainsi. Nous pouvons, en ce cas, considérer comme exacte et non plus seulement comme approximative, l'hypothèse que Φ soit une fonction périodique de t, de période $\frac{2\pi}{p\omega} = \frac{2\pi}{m}$, ou une fonction périodique de α, de période $\frac{2\pi}{p}$. En effet, à $\frac{2\pi}{m}$ d'intervalle quant au temps, ou (ce qui revient au même) à $\frac{2\pi}{p}$ d'écart quant à l'angle décrit par l'armature, tout, dans cette marche synchrone, se reproduit identiquement : arrangements géométriques des circuits et du milieu, valeur et variation de E; quant à i', courant inducteur, nous l'avons supposé constant. Il y a donc maintenant une périodicité complète de toutes les circonstances qui assure à Φ cette même périodicité.

Cette conclusion subsiste, si au lieu de donner i' constant, nous supposons (donnée plus conforme à la réalité des applications) une différence de potentiel constante appliquée aux bornes du système inducteur, qui possède d'ailleurs toujours une grande self-induction.

Malheureusement il ne s'ensuit pas que nous ayons le droit de représenter la variation de Φ par une fonction périodique simple. Mais il faut remarquer que la forme de la fonction périodique qui représenterait réellement Φ dépend de circonstances complexes dont une théorie générale ne peut tenir compte, notamment des dispositions particulières de la machine considérée.

En supposant que cette forme soit celle d'une sinusoïde, nous faisons une hypothèse simple mais d'ailleurs

concevable, au moins à titre d'approximation. Nous demeurons, d'autre part, obligés de considérer comme réalisées avec une approximation suffisante les hypothèses qui donnent au circuit de l'armature un coefficient de self-induction L déterminé et constant. Le fonctionnement réel se rapprochera d'autant plus de la théorie que ces hypothèses seront plus près d'être réalisées.

Sous le bénéfice de ces remarques, revenons à la formule (13), en y faisant $p\omega = m$. On a en même temps, d'après les formules (11), $t_2 = t_1$. En intégrant du temps zéro au temps t, pour un nombre entier de périodes, on obtient comme valeur moyenne du travail par unité de temps en régime durable

$$(14)\qquad \frac{w}{t} = \frac{m\Phi_1}{2\sqrt{R^2 + L^2m^2}}\left[E_1 \sin m(\theta - t_1) - m\Phi_1 \cos m t_1\right].$$

Pour qu'il y ait travail produit, on doit avoir

$$(15)\qquad \sin m(\theta - t_1) > \frac{m\Phi_1}{E_1}\cos m t_1.$$

Il est donc tout d'abord nécessaire que l'on ait

$$(16)\qquad \frac{m\Phi_1}{E_1}\cos m t_1 < 1, \quad \text{ou} \quad \frac{m\Phi_1 R}{\sqrt{R^2 + L^2m^2}} < E_1.$$

Supposant cette condition remplie, il faut en second lieu que θ soit compris entre les limites définies par les deux inégalités

$$(17)\qquad \psi < m(\theta - t_1) < \pi - \psi,$$

ψ étant l'arc du premier quadrant défini par

$$\sin\psi = \frac{m\Phi_1}{E_1}\cos m t_1.$$

On remarquera que, θ étant d'après (7) et (8) l'avance

de phase de E par rapport à Φ, et t_1 étant d'après (10) et (11) le retard de phase que présenterait le courant de l'armature par rapport à E si le champ n'exerçait pas de réaction sur l'armature, $\theta - t_1$ est l'avance de phase que le courant de l'armature présenterait par rapport à Φ dans cette même hypothèse.

La condition (15) peut aussi s'écrire, eu égard à la valeur de mt_1,

$$(18)\qquad E_1\left(\sin m\theta - \frac{Lm}{R}\cos m\theta\right) > m\Phi_1.$$

Le maximum du travail produit aurait lieu pour la valeur de θ qui satisferait à l'égalité

$$(19)\qquad \sin m(\theta - t_1) = 1, \quad \text{ou} \quad m(\theta - t_1) = \frac{\pi}{2}.$$

On aurait dans ce cas

$$(20)\qquad \frac{w_1}{t} = \frac{m\Phi_1}{2\sqrt{R^2 + L^2m^2}}\left(E_1 - \frac{m\Phi_1 R}{\sqrt{R^2 + L^2m^2}}\right).$$

Revenons à l'équation (13) pour voir comment varient, au cours de la rotation synchrone, le couple moteur et le travail. En raison de l'uniformité supposée de la rotation, les deux questions n'en font qu'une, puisqu'on a à tout instant

$$(21)\qquad c\,d\alpha = \frac{dw}{dt}\,dt, \quad \text{ou} \quad c = \frac{p}{m}\frac{dw}{dt_1}.$$

L'équation (13) donne, avec $p\omega = m$,

$$(22)\qquad c = \frac{p\Phi_1}{2\sqrt{R^2+L^2m^2}}\left[\begin{array}{l} E_1 \sin m(\theta - t_1) - m\Phi_1 \cos m t_1 \\ + E_1 \sin m(2t - t_1 + \theta) - m\Phi_1 \cos m(2t - t_1)\end{array}\right].$$

Posons

$$(23)\qquad \frac{E_1 \sin m\theta - m\Phi_1}{E_1 \cos m\theta} = \operatorname{tg} m\theta',$$

$m\theta'$ étant un arc compris entre zéro et π.

La formule (22) peut dès lors s'écrire

$$(24)\quad c = \frac{p\Phi_1}{2\sqrt{R^2+L^2m^2}} \frac{E_1 \cos m\theta}{\cos m\theta'} \left[\begin{matrix}\sin m(\theta' - t_1) \\ + \sin m(2t + \theta' - t_1)\end{matrix}\right].$$

La quantité entre crochets représente une sinusoïde de période $\frac{2\pi}{2m}$ ou $\frac{T}{2}$, dont l'ordonnée moyenne est exhaussée au-dessus de l'axe des abscisses de la quantité positive $\sin m(\theta' - t_1)$. Cette sinusoïde a néanmoins, pendant une fraction de chaque période, ses ordonnées au-dessous de l'axe des abscisses. En d'autres termes le travail, moteur pendant la plus grande partie du temps, est alternativement moteur et résistant. Les fractions de période pendant lesquelles le couple est négatif ne se réduisent à zéro que dans le cas particulier où l'on a

$$(25)\quad \sin m(\theta' - t_1) = 1, \quad \text{ou} \quad m(\theta' - t_1) = \frac{\pi}{2}.$$

Pour comprendre cette condition, remarquons que (9) peut s'écrire, en y faisant $p\omega = m$ et tenant compte de (23),

$$R + L\frac{di}{dt} = \frac{E_1 \cos m\theta}{\cos m\theta'} \sin m(t + \theta'),$$

d'où

$$(26)\quad i = \frac{E_1}{\sqrt{R^2+L^2m^2}} \frac{\cos m\theta}{\cos m\theta'} \sin m(t + \theta' - t_1).$$

Par conséquent i peut être considéré comme produit par une *f. é. m.* unique (self-induction non comprise), de période $\frac{2\pi}{m}$, ayant pour valeur maximum $\frac{E_1 \cos m\theta}{\cos m\theta'}$, et présentant par rapport à Φ une avance de phase θ'. On voit en même temps que $\theta' - t_1$ est l'avance de phase de i par rapport à Φ.

Quand cette avance de phase est égale à $\frac{\pi}{2}$, conformément à l'égalité (26), le couple moteur s'abaisse périodiquement jusqu'à zéro, mais il ne devient jamais négatif,

ce qui est évident *a priori*, le produit $i\frac{d\Phi}{dt}$ ayant dans ce cas toujours le même signe.

§ 2. — *Moteurs à champ tournant.*

Soit un système inducteur composé de q séries semblables de p bobines, les p bobines d'une même série étant symétriquement réparties autour de la circonférence, et les q séries se succédant ou se chevauchant de manière que d'un point d'une bobine au point homologue de la bobine suivante la distance angulaire soit $\frac{2\pi}{pq}$. Supposons les q séries respectivement parcourues par q courants périodiques de période Θ, ne différant entre eux que par une différence de phase égale à $\frac{\Theta}{q}$ d'une série à la suivante, savoir :

$$(1)\quad \begin{cases} i_1 = f(t), \\ i_2 = f\left(t + \frac{\Theta}{q}\right), \\ i_3 = f\left(t + \frac{2\Theta}{q}\right), \\ \cdots\cdots\cdots \\ i_q = f\left[t + \frac{(q-1)\Theta}{q}\right]. \end{cases}$$

Ces courants constituent un système de courants *polyphasés*. Nous allons voir qu'un pareil inducteur crée un champ magnétique tournant.

En pratique, comme on a toujours intérêt à réaliser un système donné avec le plus petit nombre possible de courants distincts, on choisit pour q un nombre pair, $q = 2q'$, et les séries prises deux à deux, la première avec la $(q'+1)^e$, la deuxième avec la $(q'+2)^e$, etc., n'en forment en réalité qu'une seule, recevant un même courant, mais où les bobines sont bobinées alternativement

dextrorsum et sinistrorsum. La succession des courants dans q bobines consécutives est alors

$$(1\ bis)\qquad \begin{cases} i_1 = f(t), \\ i_2 = f\left(t + \dfrac{\Theta}{2q'}\right), \\ \cdots\cdots\cdots\cdots \\ i_{q'} = f\left[t + \dfrac{(q'-1)\Theta}{2q'}\right], \\ i_{q'+1} = -f(t), \\ \cdots\cdots\cdots\cdots \\ i_{2q'} = -f\left(t + \dfrac{(q'-1)\Theta}{2q'}\right). \end{cases}$$

Elle est la même que la précédente, à la condition que la fonction f soit telle qu'on ait

$$f\left(t + \frac{\Theta}{2}\right) = -f(t).$$

Avant d'aborder le cas général, donnons une première notion de la rotation d'un champ, en considérant le champ créé au centre O d'un système rectangulaire de deux bobines assimilables à des solénoïdes, croisées à angle droit, et parcourues par des courants alternatifs différant l'un de l'autre par un retard de phase de $\frac{1}{4}$ de période, ou, comme on dit, *diphasés*. Un pareil système est celui qui a servi aux démonstrations du professeur Ferraris, en 1888 (*).

Le champ créé par un solénoïde en son centre, dans un milieu homogène de perméabilité constante, est dirigé suivant son axe et proportionnel à l'intensité du courant. Si donc les deux courants sont

$$i = \mathrm{I}\sin\frac{2\pi t}{\Theta},$$

$$i' = \mathrm{I}\sin\frac{2\pi\left(t + \frac{\Theta}{4}\right)}{\Theta} = \mathrm{I}\cos\frac{2\pi t}{\Theta},$$

(*) *Atti della R. Acad. delle scienze di Torino*, t. XXIII.

les forces magnétiques créées au point O respectivement par les deux courants sont dirigées suivant des directions fixes rectangulaires Ox, Oy, et ont pour valeurs :

$$h = \mathrm{H}\sin\frac{2\pi t}{\Theta}, \qquad h' = \mathrm{H}\cos\frac{2\pi t}{\Theta}.$$

Il est manifeste qu'elles se composent en une seule, de grandeur invariable H, tournant autour du point O avec une vitesse angulaire $\dfrac{2\pi}{\Theta}$.

D'une manière plus générale, supposons que l'on ait en répartition symétrique autour d'une circonférence q solénoïdes dont les axes convergent tous au centre de cette circonférence, et où circulent q courants, de la forme

$$(2)\qquad \begin{cases} i_1 = \mathrm{I}\sin\dfrac{2\pi t}{\Theta}, \quad i_2 = \mathrm{I}\sin\dfrac{2\pi\left(t + \frac{\Theta}{q}\right)}{\Theta} = \mathrm{I}\sin\left(\dfrac{2\pi t}{\Theta} + \dfrac{2\pi}{q}\right), \\ \cdots\cdots\cdots \quad i_q = \mathrm{I}\sin\left[\dfrac{2\pi t}{\Theta} + (q-1)\dfrac{2\pi}{q}\right]. \end{cases}$$

Cherchons quel sera, dans un milieu de perméabilité constante et uniforme, le champ au centre O du système. Chaque bobine donne lieu au point O à une force magnétique dirigée suivant son axe, et proportionnelle, toutes choses égales d'ailleurs, au courant qui la parcourt. Soit donc

$$\mathrm{A}\sin\frac{2\pi t}{\Theta}$$

la composante du champ due au courant i_1. Nous allons projeter toutes les composantes du champ sur un axe fixe Ox. La composante ci-dessus donne lieu à une projection

$$\mathrm{A}\sin\frac{2\pi t}{\Theta}\cos\alpha,$$

α étant l'angle que fait l'axe du solénoïde correspondant

avec Ox. Le solénoïde suivant donne comme projection

$$A \sin\left(\frac{2\pi t}{\Theta} + \frac{2\pi}{q}\right) \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{q}\right),$$

et ainsi de suite; de sorte que la projection de la résultante cherchée est

$$\begin{aligned} X &= A \sum_{i=0}^{i=q-1} \sin\left(\frac{2\pi t}{\Theta} + \frac{2i\pi}{q}\right) \cos\left(\alpha + \frac{2i\pi}{q}\right) \\ &= \frac{qA}{2} \sin\left(\frac{2\pi t}{\Theta} - \alpha\right) + \frac{A}{2} \sum_{i=0}^{i=q-1} \sin\left(\frac{2\pi t}{\Theta} + \alpha + \frac{2i\pi}{q}\right) \\ &= \frac{qA}{2} \sin\left(\frac{2\pi t}{\Theta} - \alpha\right). \end{aligned}$$

Sur un axe fixe Oy perpendiculaire à Ox, la projection de la même résultante est

$$Y = \frac{qA}{2} \cos\left(\frac{2\pi t}{\Theta} - \alpha\right).$$

Donc cette résultante est un vecteur de longueur constante $\frac{qA}{2}$, tournant autour du point O avec une vitesse angulaire uniforme $\frac{2\pi}{\Theta}$.

Dans le cas particulier où l'on a $q = 2$, le système que nous venons de considérer comprend quatre solénoïdes formant deux paires placées à angle droit. Chaque paire se compose de deux solénoïdes angulairement distants de π et parcourus par deux courants égaux et de sens inverses; il revient au même de dire deux solénoïdes de même orientation et parcourus par le même courant. Ces deux solénoïdes peuvent alors, comme cas particulier, être confondus en un solénoïde unique dont le centre coïncide avec le centre du cercle, et l'on retombe ainsi sur la disposition de Ferraris.

Considérons maintenant le cas général. Autour de l'axe et dans un plan perpendiculaire à cet axe, caractérisons la position des pq bobines par l'emplacement d'un certain point déterminé de chacune d'elles, son centre par exemple, ou tout autre; et soient A_1, A_2 ... A_q, B_1, B_2 ... B_q ..., etc., les positions de ces points homologues. Le courant i_1 circule dans les p bobines auxquelles appartiennent A_1, B_1, C_1 ..., le courant i_q dans celles auxquelles appartiennent A_q, B_q, C_q ... (Pl. XI, *fig.* 3).

La disposition géométrique des pq bobines, prise indépendamment des courants qui les parcourent, présente autour de l'axe une symétrie d'ordre pq. Nous supposerons qu'il en est de même de la perméabilité du système et que cette perméabilité est constante en chaque point. Si maintenant on tient compte de la valeur des courants, la symétrie présentée à toute époque par le système est d'ordre p seulement.

Proposons nous d'étudier le champ magnétique le long d'une circonférence HH', tracée autour d'un point O de l'axe, dans un plan perpendiculaire, avec un rayon choisi arbitrairement.

Un point M de cette circonférence est défini par l'angle λ que fait le rayon OM avec une direction fixe, OH par exemple. La force magnétique en M, est définie par trois éléments, sa grandeur h et les angles η et ζ que fait sa direction avec le rayon OM et avec le plan de la figure. Considérons un de ces éléments, la grandeur h par exemple.

h est une fonction de l'angle λ et du temps t. Si l'on considère, pour une même valeur de t, deux positions du rayon OM écartées d'un angle égal à $\frac{2\pi}{p}$, il résulte de la symétrie d'ordre p du système que h aura même valeur en ces deux points. La fonction

$$h = F(\lambda, t)$$

est donc une fonction périodique de λ, de période $\frac{2\pi}{p}$.

D'autre part, en considérant pour un même point de

l'espace deux époques distantes de Θ, période des courants, on voit que F est une fonction périodique de t, de période Θ.

Mais nous savons quelque chose de plus sur cette fonction doublement périodique, eu égard aux relations qui existent entre les valeurs des courants dans les bobines successives. Si le point M se déplace de $\frac{2\pi}{pq}$, angle séparatif de A_1 et A_2, A_2 et A_3..., et si en même temps t croît de $\frac{\Theta}{q}$, M se retrouvera dans les mêmes conditions magnétiques à la fin qu'au commencement : car, au bout du temps $\frac{\Theta}{q}$, le courant de la bobine A_2 est égal à celui qui était au commencement dans la bobine A_1, le courant de la bobine A_3 à celui qui était en A_2, et ainsi de suite. On a donc :

$$F\left(\lambda+\frac{2\pi}{pq}, t+\frac{\Theta}{q}\right)=F(\lambda, t), \tag{3}$$

quels que soient λ et t.

Dès lors, supposons que le rayon OM se déplace avec une vitesse angulaire uniforme $\frac{1}{p}\frac{2\pi}{\Theta}$, et voyons comment variera h en fonction de t à l'extrémité de ce rayon mobile. Toutes les fois que t aura augmenté de $\frac{\Theta}{q}$, λ aura augmenté de $\frac{2\pi}{pq}$ et F reprendra la même valeur : donc, pour l'extrémité du rayon mobile, h est une fonction de t de période $\frac{\Theta}{q}$.

C'est d'ailleurs ce que fait voir l'identité (3), car si l'on y remplace l'angle λ par la valeur

$$\lambda_0+\frac{1}{p}\frac{2\pi}{\Theta}t,$$

qu'il a à toute époque à l'extrémité du rayon mobile, la relation devient

$$F\left[\lambda_0+\frac{1}{p}\frac{2\pi}{\Theta}\left(t+\frac{\Theta}{q}\right), t+\frac{\Theta}{q}\right]=F\left(\lambda_0+\frac{1}{p}\frac{2\pi}{\Theta}t, t\right),$$

et exprime la propriété énoncée.

Ce que nous disons de h, grandeur de la force, nous pourrions le dire exactement de l'angle η que fait la direction de cette force avec le rayon OM, ou de son angle ζ avec le plan de la figure.

Nous aurions pu d'ailleurs choisir autrement le point mobile M sur le rayon OM.

Nous aurions pu enfin choisir d'une autre manière quelconque la position initiale du rayon mobile.

Imaginons dès lors un observateur placé suivant l'axe du système, et ayant la faculté de *voir* le champ magnétique, c'est-à-dire la grandeur et la direction de la force magnétique en chaque point. Appelons *fantôme magnétique* ce qui apparaît aux yeux de cet observateur. Supposons que l'observateur tourne autour de l'axe avec une vitesse uniforme $\frac{1}{p}\frac{2\pi}{\Theta}$. S'il dirige son regard dans une direction fixe par rapport à lui-même, mais quelconque d'ailleurs, le fantôme qu'il voit varie périodiquement, et repasse par les mêmes aspects pour deux instants quelconques à $\frac{\Theta}{q}$ d'intervalle.

On peut donc considérer le champ magnétique comme tournant tout d'une pièce autour de l'axe, avec une vitesse $\frac{1}{p}\frac{2\pi}{\Theta}$, et comme affecté, pendant qu'il tourne, de modifications périodiques de période $\frac{\Theta}{q}$.

Ce champ tournant, qui offre à un instant quelconque une symétrie d'ordre p autour de l'axe, présente pq

cycles de modification pendant la durée d'un tour.

Quant à l'importance des modifications constituant ces cycles, elle dépend des dispositions de chaque système et de la loi de variation des courants qui en parcourent les bobines.

Nous avons, jusqu'à présent, supposé le système inducteur seul dans l'espace. Si, maintenant, nous introduisons une armature mobile autour de l'axe, tout se passe pour notre observateur tournant comme si, le champ n'ayant pas son mouvement de rotation générale, l'armature en avait un de même vitesse en sens inverse, en outre de son mouvement réel. Si donc Ω est la vitesse absolue de l'armature, tout se passe au point de vue des réactions mutuelles des deux systèmes comme si le champ n'avait point de mouvement général de rotation et si l'armature tournait avec la vitesse $\Omega - \frac{1}{p}\frac{2\pi}{\Theta}$. Soit

$$-\gamma = \Omega - \frac{1}{p}\frac{2\pi}{\Theta},$$

cette vitesse relative, γ étant la vitesse, comptée positivement, du *glissement en arrière* de l'armature par rapport au champ.

On serait ainsi ramené dans l'étude du mouvement relatif à une question entièrement analogue à celle qui a fait l'objet du paragraphe 1er de ce chapitre, si le champ ne présentait les modifications périodiques, de période $\frac{\Theta}{q}$, dont il est en général affecté. Nous ne savons rien sur l'importance de ces modifications. Elle dépend des dispositions du système et de la forme des courants inducteurs. Elle serait nulle, comme on l'a vu, au centre du système inducteur de Ferraris à courants sinusoïdaux diphasés, ou au centre du système analogue polyphasé auquel se rapporte la formule (2). MM. Hutin et Leblanc

l'ont considérée comme négligeable par approximation dans leur système de moteur à champ tournant (*).

Nous allons supposer, dans ce qui va suivre, que l'on ait affaire à un système où ces modifications soient effectivement peu accentuées, et d'influence négligeable sur les réactions dont l'armature est le siège. C'est là, en l'état de notre étude, une simple hypothèse, dont le fonctionnement des moteurs réels pourra, suivant leurs dispositions, se rapprocher ou s'écarter plus ou moins.

Dans cette hypothèse, les courants alternatifs du système inducteur doivent être considérés comme ayant pour effet pur et simple de créer un champ qui tourne uniformément tout d'une pièce, sans se modifier. La force magnétique en chaque point de ce champ ne participe plus de la nature alternative des courants inducteurs; la fréquence de ces courants n'intervient plus que comme facteur de la vitesse $\frac{2\pi}{p\Theta}$ de la rotation générale de ce champ. Dans le mouvement relatif de l'armature par rapport au champ, celle-ci doit être dorénavant considérée comme tournant dans un champ inducteur de même nature que celui qui résultait du courant constant i'_1 considéré au paragraphe 1er, c'est-à-dire dans un champ où la force magnétique en chaque point, due au système inducteur, est indépendante du temps; un circuit d'armature, tournant en circuit ouvert dans ce champ fixe, serait pénétré par un flux d'induction qui serait fonction de l'angle décrit, fonction périodique, de période p, à laquelle nous supposerons, comme au paragraphe 1er, la forme d'une sinusoïde.

Nous faisons d'ailleurs dans le présent paragraphe, comme nous l'avons déjà indiqué, l'hypothèse que toutes

(*) *De l'application des courants alternatifs à la transmission du travail.* Lum. électr., t. XLI, p. 123.

les pièces soient de perméabilités magnétiques invariables, de sorte que si nous fermons le circuit d'armature, ces résultats ne seront pas troublés en ce qui touche le flux en provenance du système inducteur.

Dès lors, l'étude du mouvement relatif de l'armature ne diffère pas de l'étude faite au paragraphe 1er. Supposons, pour compléter l'analogie, que l'armature soit la même que celle considérée dans le premier paragraphe; seulement, nous supprimons ici la *f. é. m.* E qui agissait sur le circuit de cette armature; nous fermons simplement ce circuit sur lui-même, avec ou sans intercalation d'une résistance extérieure (rhéostat). La formule (13) du paragraphe 1er est en ce cas immédiatement applicable au mouvement relatif en y faisant $\omega = -\gamma$, $E = o$, et il en résulte pour le travail élémentaire $dw_r = -dw$ *absorbé* par le mouvement relatif de l'armature par rapport au champ

$$(4)\quad dw_r = \frac{p^2\gamma^2\Phi_1^2}{2\sqrt{R^2+L^2p^2\gamma^2}}[\cos p\gamma(2t-t_2)+\cos p\gamma t_2]dt.$$

Cette absorption de travail correspond à un couple qui tend à entraîner l'armature dans le sens de la rotation du champ, et qui a pour valeur

$$c = \frac{dw_r}{\gamma dt} = \frac{p^2\gamma\Phi_1^2}{2\sqrt{R^2+L^2p^2\gamma^2}}[\cos p\gamma(2t-t_2)+\cos p\gamma t_2].$$

Dans le mouvement absolu, de vitesse $\Omega = \frac{2\pi}{p\Theta} - \gamma$, il en résulte un travail élémentaire

$$dw = c\Omega dt = \frac{p^2\Phi_1^2}{2\sqrt{R^2+L^2p^2\gamma^2}}\gamma\left(\frac{2\pi}{p\Theta}-\gamma\right)[\cos p\gamma(2t-t_2)+\cos p\gamma t_2]dt.$$

Ce travail, pour une valeur donnée de γ, est périodique, de période $\frac{2\pi}{2p\gamma}$; il est alternativement moteur et résistant, mais en fonctionnement durable le travail moteur

l'emporte. Sa valeur moyenne par unité de temps, pour un nombre entier des périodes de sa variation, est

$$(5)\quad \left\{\begin{aligned}\frac{w}{t} &= \frac{p^2\Phi_1^2}{2\sqrt{R^2+L^2p^2\gamma^2}}\gamma\left(\frac{2\pi}{p\Theta}-\gamma\right)\cos p\gamma t_2\\ &= \frac{p^2\Phi_1^2}{2}\frac{R}{R^2+L^2p^2\gamma^2}\gamma\left(\frac{2\pi}{p\Theta}-\gamma\right).\end{aligned}\right.$$

Un tel moteur est donc susceptible de fonctionner utilement. A la différence des moteurs considérés dans la première partie de notre étude, il est *asynchrone*, puisque γ est une quantité variable, qui se réglera d'elle-même de manière qu'il y ait équilibre entre la puissance et la résistance. Seulement, l'action est encore pulsatoire, et la rotation continue n'aura lieu que si Ω n'est pas inférieur à une certaine limite, dépendant de l'inertie mécanique du système tournant. On n'a donc pas encore un moteur capable de fonctionner aux petites vitesses ni de démarrer seul.

Il est évident, puisque nous supposons que le champ sans armature tournerait uniformément sans modifier son fantôme, que le caractère pulsatoire provient uniquement du courant induit de l'armature. Si donc, au lieu d'un seul courant, il s'en développe plusieurs dans l'armature, de telle manière que l'ensemble présente dans ses réactions un suffisant degré de symétrie, nous aurons un couple résultant qu'il nous faut étudier, mais dont nous pouvons, dès maintenant, dire qu'il aura perdu le caractère pulsatoire.

Supposons, à cet effet, que nous portions à deux le nombre des courants de l'armature, en adjoignant à ses $2p$ bobines, un second système semblable de $2p$ bobines intercalées entre les premières ou les chevauchant, de manière que l'écart angulaire entre les points homologues de deux bobines successives, l'une du premier, l'autre du deuxième système, soit $\frac{2\pi}{4p}$. Au signe près des

feuillets magnétiques, l'armature est maintenant symétrique par rapport à chacun des $2p$ axes angulairement distants de $\frac{2\pi}{4p}$, qui joignent les centres de deux bobines opposées. Chacun des deux systèmes de bobines correspond à un circuit distinct, et ces deux circuits ont d'ailleurs même résistance et même self-induction. Nous continuons à supposer la carcasse parfaitement feuilletée.

Soient j et j' les deux courants de l'armature. Considérons, à un instant quelconque, le flux d'induction qui pénètre dans le circuit du courant j. Ce flux résulte : 1° du système inducteur; 2° de la self-induction; 3° du courant j'. Mais cette troisième partie est nulle; du moins elle le serait, en raison des symétries supposées, si l'armature et ses courants étaient seuls dans l'espace, ou plongés dans un milieu qui participerait aux mêmes symétries. Dans ce cas, en effet, considérons une bobine B du courant j et l'axe de symétrie OB passant par son centre. Suivant que les bobines ont leurs axes de figure perpendiculaires aux axes de symétrie du système ou confondus avec eux, une rotation de 180° autour de OB inverse le sens des feuillets du courant j et reproduit tel quel le courant j', ou inversement. Dans l'un comme dans l'autre cas, il en résulte que si, dans la position primitive, l'on considère dans la bobine B deux éléments de feuillet symétriques par rapport à OB, ils reçoivent du courant j' deux flux égaux et de signes contraires : donc le flux total est nul.

Ce raisonnement se trouve en défaut, si l'armature est plongée dans un milieu qui n'ait point les mêmes symétries. Mais comme on néglige cette cause perturbatrice en ce qui touche la self-induction des courants j et j', à laquelle on suppose un coefficient constant, on doit aussi la négliger en ce qui touche leur induction mutuelle, et

admettre par conséquent que le coefficient de cette induction mutuelle est constamment nul.

Le flux qui pénètre j n'est plus alors en provenance que de lui-même et du système inducteur, et l'on est ramené au cas précédemment étudié. En appelant Φ le flux en provenance du système inducteur, on a pour travail élémentaire dw_r absorbé par le déplacement du courant j par rapport au champ pendant le temps dt

$$dw_r = -j\frac{d\Phi}{dt}dt.$$

D'autre part :

$$Rj + L\frac{dj}{dt} = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

Mais Φ est une fonction de l'angle β décrit par l'armature dans son mouvement relatif par rapport au champ, que nous supposons définie par

$$\Phi = \Phi_1 \sin p(\beta - \beta_0).$$

Enfin

$$\beta = \beta_0 - \gamma t.$$

En tenant compte de ces différentes relations et supposant j périodique, on retrouve la formule (4), ainsi qu'il était évident *a priori*.

Considérons maintenant le second circuit de l'armature, et rappelons-nous qu'en vertu des hypothèses faites, dans le mouvement relatif de l'armature, le flux Φ que le système inducteur émet dans l'un ou l'autre des deux circuits d'armature ne dépend que de la position occupée par ce circuit. Dès lors, ce qui se passe pour le courant j' au temps t est de tout point ce qui se passait pour le premier courant j quand ce premier courant était à sa place (par rapport au champ), soit à $\frac{2\pi}{4p}$ d'écart angulaire dans le mouvement relatif, c'est-à-dire au temps $t + \frac{1}{\gamma}\frac{2\pi}{4p}$, en conservant au temps la même origine que

ci-dessus. Le travail élémentaire dw'_r, afférent au courant j' et contemporain du travail dw_r, est donc

$$dw'_r = \frac{p^2\gamma^2\Phi_1^2}{2\sqrt{R^2+L^2p^2\gamma^2}}\left[\cos p\gamma\left(2t+\frac{\pi}{p\gamma}-t_2\right)+\cos p\gamma t_2\right]dt.$$

D'où, pour travail élémentaire total du déplacement relatif de l'armature

$$dW_r = dw_r + dw'_r = \frac{p^2\gamma^2\Phi_1^2}{2\sqrt{R^2+L^2p^2\gamma^2}}\cos p\gamma t_2 \times 2 \times dt,$$

ou

$$dW_r = p^2\Phi_1^2\gamma^2\,\frac{R}{R^2+L^2p^2\gamma^2}\,dt,$$

travail proportionnel au temps, d'où résultent pour le couple, et pour le travail par unité de temps produit par la rotation absolue de l'armature

$$c = \frac{R\,p^2\Phi_1^2\gamma}{R^2+L^2p^2\gamma^2}, \tag{6}$$

$$\frac{W}{t} = \frac{R\,p^2\Phi_1^2}{R^2+L^2p^2\gamma^2}\,\gamma\left(\frac{2\pi}{p\Theta}-\gamma\right). \tag{7}$$

Ainsi, il a suffi de l'addition du deuxième circuit de l'armature pour faire disparaître le caractère pulsatoire, et rendre constants, en régime durable, le couple et le travail moteurs.

Il est évident qu'au lieu de mettre deux circuits seulement dans l'armature, nous aurions pu en mettre tout autre nombre compatible avec les symétries nécessaires pour qu'on pût considérer comme nul ou négligeable le flux total envoyé dans l'un des circuits par l'ensemble des autres. Au lieu de deux formules, on aurait eu à additionner une suite d'expression où les termes en t eussent été les cos. d'arcs en progression arithmétique de zéro à 2π, somme qui est nulle.

Lorsqu'on veut, pour les motifs qui seront dits plus bas, rendre variable à volonté la résistance des circuits, en intercalant dans chacun d'eux un rhéostat extérieur, on a intérêt à rendre minimum le nombre de ces circuits, on le fait donc égal à 2. Mais quand on construit l'armature sans bagues ni frotteur, en fermant invariablement sur lui-même chacun des circuits, rien n'empêche d'en multiplier le nombre; nos raisonnements n'étant qu'approximatifs, il peut n'être pas rigoureusement vrai que deux circuits suffisent à rendre constant l'effort moteur, tandis qu'on tendra certainement vers un régime aussi uniforme que possible, toutes choses égales d'ailleurs, en élevant le degré de symétrie du système qui tourne asynchroniquement.

C'est ainsi que l'on peut constituer les parties conductrices de l'armature par une série de barres rectilignes parallèles à l'axe O, régulièrement disposées à la périphérie de la carcasse, qui sera soit cannelée, soit percée (Brown) pour les recevoir. Ces barres devront être reliées entre elles à leurs extrémités d'après un ordre symétrique, de manière à permettre le développement des courants utiles (Dobrowolsky); on peut même se contenter de relier indistinctement, à chaque extrémité, chaque barre à toutes les autres, au moyen d'un plateau de cuivre, comme le fait M. Brown, dans ses armatures en cage d'écureuil.

Revenons aux formules (6) et (7). La vitesse de glissement relatif γ varie en sens inverse de la vitesse absolue du moteur, et pour $\Omega = 0$ elle a sa valeur maximum $\frac{2\pi}{p\Theta}$. Alors W est nul, ce qui était évident *d priori*; mais il n'en est pas de même de c : nous avons maintenant, en d'autres termes, un moteur capable de démarrer seul.

Toutefois, en ce qui concerne l'appréciation du couple de démarrage, il ne faut pas perdre de vue que les hypothèses admises dans ce qui précède, d'après lesquelles les valeurs du flux Φ seraient indépendantes de l'intensité des courants de l'armature, ne sont admissibles,

même à titre d'approximation, que lorsque ces courants n'excèdent pas une limite restreinte. Si cette limite est dépassée, le champ dû à ces courants peut réagir sur Φ dans une proportion importante, et quand bien même la formule (6) s'appliquerait encore, Φ_1 y serait fonction de γ et la fraction pourrait être, si petit que fût L, rapidement décroissante pour γ croissant. Au démarrage, γ est maximum; les courants de l'armature prennent, dans un champ donné, une grande intensité, mais alors leur influence démagnétisante sur le champ des courants polyphasés peut être considérable.

Pour prévenir cet inconvénient, le moyen le plus naturel est de rendre R variable à volonté, de manière à opposer aux courants induits, lors du démarrage, une suffisante résistance pour que leur intensité ne devienne pas excessive. A cet effet, l'armature est à deux circuits, pour chacun desquels les extrémités du bobinage aboutissent à des bagues, munies de frotteurs, en sorte que le circuit présente une partie fixe dans laquelle il est loisible d'intercaler un rhéostat.

Si, comme dans le moteur de 100 chevaux de M. Dobrowolsky à l'exposition de Francfort, c'est l'induit qui est fixe et l'inducteur qui tourne, l'intercalation des rhéostats de démarrage ne souffre aucune difficulté, mais ce sont en ce cas les courants polyphasés qui doivent passer par des frotteurs et des bagues.

On a donc, dans les deux cas, une partie mobile à contacts frottants; mais ce sont de simples contacts sur bagues qui sont loin d'entraîner les mêmes sujétions que des commutateurs.

En faveur de l'interposition de rhéostats dans les courants induits, il faut remarquer que lors du démarrage, tout le travail du mouvement relatif de l'armature, travail dont dépend le couple moteur, se convertit en chaleur dans les circuits induits : il est avantageux, pour la conservation de l'armature, de reporter dans des rhéostats la plus grande part possible de cet effet calorifique.

Pendant le fonctionnement, le couple c est déterminé (soit d'une manière absolue, soit quelquefois en fonction de Ω, c'est-à-dire de γ) par la résistance appliquée au moteur; R et γ dépendent alors l'un de l'autre d'après la relation (6) dans les limites où cette relation s'applique. Tant que Φ_1 n'est pas trop influencé par le champ des courants de l'armature, on voit que, pour c constant, $\frac{\gamma}{R}$ est constant, et l'on rendra Ω et W maximum en donnant à R la plus petite valeur possible.

Sous les mêmes réserves relativement à Φ_1, l'on voit encore que, pour une vitesse donnée de l'armature, c et W sont maximum lorsqu'on a

$$R = Lp\gamma.$$

Le rendement électrique a pour valeur

$$\frac{W}{W + 2R\frac{J^2}{2} + Q},$$

J étant l'intensité maximum de chacun des courants induits de l'armature (au nombre de deux), et Q désignant la puissance équivalente à la chaleur dégagée par les courants inducteurs et les pertes par hystérésis et courants de Foucault. On a

$$J = \frac{p\gamma\Phi_1}{\sqrt{R^2 + L^2p^2\gamma^2}},$$

et il en résulte pour valeur du rendement

$$\frac{\frac{2\pi}{p\Theta} - \gamma}{\frac{2\pi}{p\Theta} + Q\frac{R^2 + L^2p^2\gamma^2}{p^2\Phi_1^2R\gamma}} = \frac{\frac{2\pi}{p\Theta} - \gamma}{\frac{2\pi}{p\Theta} + \frac{Q}{c}}. \qquad (8)$$

On voit qu'au démarrage $\left(\gamma = \frac{2\pi}{p\Theta}\right)$ le rendement est nul, ce qui est évident *a priori*, et que, si la valeur de Q est suffisamment petite, il croît avec la vitesse absolue de l'armature jusqu'à ce que cette vitesse soit plus ou moins voisine du synchronisme.

CHAPITRE II.

DISTRIBUTION PAR COURANTS DIPHASÉS DES MINES DE DECIZE.

L'installation de Decize, tout entière au jour, doit comporter, lorsqu'elle sera complète, le réseau représenté Pl. XI, *fig.* 4. La station génératrice est placée à La Machine, et l'ensemble des appareils récepteurs sera le suivant :

EMPLACEMENT	DISTANCE de la station génératrice	APPAREILS ÉLECTRIQUES récepteurs	USAGE
1° *A l'ouest :*	mètres		
Puits des Chagnats. . . .	4.100	Moteur de 30 chevaux. . . .	Ventilateur.
Fendue des Lacets. . . .	3.200	Id.	Id.
Puits des Coupes.	1.900	Id.	Id.
Puits des Zagots	1.000	Treuil de 15 chevaux. . . .	Plan incliné.
2° *A La Machine :*			
Installations diverses . .	»	5 ou 6 lampes à arc. . . . 20 lampes à incandescence.	Éclairage.
3° *A l'est :*			
Fendue des Marizy . . .	1.200	Moteur de 30 chevaux . . .	Ventilateur.
Ateliers de triage et lavage du Pré-Charpin. .	2.300	24 lampes à arc de 500 w. 50 l. à incand. de 16 bougies.	Éclairage.
Champvert	3.000	Moteur de 12 chevaux . . .	Pompes.

La station génératrice comprendra deux ou trois groupes semblables de dynamos, disposés comme le montrent les *fig.* 5 et 6, Pl. XI. Deux groupes seront appelés à fonctionner ensemble et pourront être à cet effet associés

en quantité ; le troisième groupe a été prévu comme rechange.

Chacun de ces groupes générateurs est destiné à fournir deux courants alternatifs de 42 périodes par seconde, décalés d'un quart de phase, et valant ensemble 50 ampères efficaces sous un potentiel efficace de 2.000 volts, soit une puissance de 100 kilowatts. Distribuée sous le même potentiel, cette puissance doit être recueillie :

1° Sous forme de travail mécanique, par des moteurs à champ tournant directement attelés sur les trois fils de ligne sans réduction de potentiel (*) ;

2° Accessoirement, sous forme de lumière, après réduction du potentiel de 2.000 à 100 volts par des transformateurs greffés soit sur l'un, soit sur l'autre des deux circuits de ligne.

Machines génératrices. — Chacun des groupes générateurs, représenté Pl. XII, *fig.* 1 et 2, se compose de deux dynamos jumelles, placées côte à côte, et dont les inducteurs tournants, montés sur un arbre unique (ou sur deux arbres placés dans le prolongement l'un de l'autre et mécaniquement accouplés), sont menés par une même courroie. Chacune de ces dynamos produit un courant alternatif ordinaire, et il a suffi de caler les inducteurs sur leur arbre commun avec un écart angulaire d'un demi-intervalle de pôles, pour que les différences de potentiel aux bornes des deux dynamos présentent une différence de phase d'un quart de période, au moins quand le fonctionnement est, par ailleurs, identique aux deux machines.

Rien ne s'oppose à ce qu'on produise deux ou plusieurs courants polyphasés au moyen d'un seul alternateur, en

(*) Ou fonctionnant sous voltage réduit par l'intermédiaire de transformateurs, comme on le verra plus loin.

réunissant sur le même induit un nombre égal de bobinages distincts sous des intervalles angulaires convenables, et excitant le tout au moyen d'un même inducteur. Mais sous cette forme, les forces électromotrices développées aux bornes des divers circuits induits, parfaitement réglées comme différences de phases, sont nécessairement égales en grandeur. Or, dans le cas où le réseau doit distribuer de la lumière en même temps que de la force, si l'un des circuits se trouve plus chargé qu'un autre, il faut rétablir l'équilibre en faisant varier le rapport des forces électromotrices. C'est ce que permet très simplement la disposition adoptée, puisque chacun des deux circuits ayant son inducteur distinct, il suffit de faire varier le rapport des courants excitateurs à l'aide d'un rhéostat.

Au point de vue de l'établissement des appareils, la production des courants polyphasés par une dynamo unique réalise évidemment une économie de matière; d'autre part, il peut ne pas être indifférent de n'avoir à employer que des alternateurs de construction simple et courante, qu'il suffit d'associer mécaniquement au nombre de deux pour obtenir un système diphasé.

Chacune des dynamos individuelles est ici un alternateur Zipernowsky à dix pôles. L'inducteur tournant, dont la circonférence extérieure mesure $0^m,84$ de diamètre, est du type à bras polaires rayonnants, dit pignon. Son noyau est lamellé; chacun des feuillets métalliques est constitué par la juxtaposition de cinq tôles dont chacune comprend deux bras polaires voisins; les cinq tôles analogues du feuillet suivant chevauchent les premières de manière à en recouvrir les jonctions, et ainsi de suite; l'empilement une fois assujetti par des boulons parallèles à l'axe constitue un tout indéformable, que deux flasques latérales en fonte fixent sur l'arbre de rotation.

On a ainsi dix noyaux d'électro-aimants à section

rectangulaire, sur lesquels, pour cette dimension de machine, le bobinage est fait à la main. Les dix bobines sont en tension et reçoivent le courant de deux bagues métalliques portées par un prolongement de l'arbre du côté opposé à la poulie de commande.

Sur ces bagues s'appuient deux frotteurs ordinaires (lames de laiton), auxquels le courant est fourni par une dynamo à courant continu du type Δ. Cette dynamo, placée et commandée ainsi que l'indiquent les *fig.* 5 et 6, Pl. XI, sert à la fois d'excitatrice aux deux alternateurs jumeaux; sa vitesse est 900 tours; elle donne 110 volts, et environ 25 à 30 ampères pour l'ensemble des deux excitations.

Chaque bras inducteur porte en régime normal environ 4.000 ampères-tours, et l'induction dans son noyau atteint environ 9.000 unités.

L'induit fixe est formé de dix bobines de peu de hauteur, entourant des noyaux qui forment autant de saillies à la circonférence intérieure d'un tambour en fer. Ce tambour est toutefois sectionné en dix parties dont chacune porte une bobine induite et qui sont simplement juxtaposées. Tambour et noyaux sont feuilletés; chaque section du tambour et le noyau correspondant sont formés d'un empilement de feuillets, compris entre deux flasques de bronze et serrés par un boulon.

De même que les bobines inductrices, les bobines induites sont toutes en tension. La grosseur de leur fil est calculée pour une densité de courant de 3 ampères efficaces; chacune correspond à environ 1.930 ampères-tours. Ces bobines sont bobinées à part et enfilées après coup sur les noyaux, où elles sont assujetties par des arrêtoirs à vis. On peut retirer et remettre chacune d'elles en place sans toucher au reste de l'induit ni démonter l'inducteur.

La prise de courant se fait très simplement, puisque

l'induit est fixe. Elle a lieu par des bornes placées au sommet du tambour, sous une boîte fermée. L'une des bornes de chaque alternateur est reliée au fil commun de la ligne ternaire.

Les autres dispositions générales de l'appareil se comprennent à l'inspection des Pl. XI, *fig.* 5 et 6 et Pl. XII, *fig.* 1 et 2. L'arbre commun des deux inducteurs est porté par des paliers à rotule, avec graissage à bagues. Il reçoit le mouvement d'une machine à vapeur appropriée, par l'intermédiaire d'une courroie. La vitesse des inducteurs doit être de 500 tours pour donner aux courants produits 5.000 alternances par minute (42 périodes par seconde.)

Tableau de distribution. — On trouvera, Pl. XIII, le schéma du tableau de distribution prévu pour deux groupes d'alternateurs, n° 1 et n° 2.

On voit, à partir de l'un de ces groupes, des alternateurs Z_1 et Z_1' par exemple, les trois fils A_1, B_1, A_1', qui transportent les deux courants ; le fil commun B_1 est figuré au milieu des deux autres. Si on les suit, l'on voit les deux fils A_1, A_1' traverser respectivement les ampèremètres M_1, M_1', puis aboutir, le fil A_1 aux commutateurs à mercure et à mouvement rapide C_1 et c_1, le fil A_1' aux commutateurs semblables C_1' et c_1'. De son côté le fil B_1 aboutit également à ces quatre mêmes commutateurs, qui sont bipolaires.

Si l'on ferme le commutateur C_1, on met le fil A_1 en communication avec la barre AA et en même temps le fil B_1 en communication avec la barre BB. Si l'on ferme C_1', A_1' se trouve en communication avec la barre A′A′, en même temps que B_1 est mis, comme par l'autre commutateur, en communication avec la barre médiane BB.

On relie ainsi les trois fils du groupe n° 1 avec le système des barres AA, BB, A′A′.

On verrait de même que la fermeture des deux commutateurs c_1 et c_1' relie ces trois mêmes fils avec le système des barres aa, bb, $a'a'$.

Les trois fils A_2, B_2, A_2', issus du groupe d'alternateurs n° 2, donneraient lieu à une description semblable. La paire de commutateurs bipolaires C_2 et C_2' permet de relier ces trois fils au système des barres supérieures AA, BB, A′A′, et la paire c_2 et c_2' au système des barres inférieures aa, bb, $a'a'$.

En marche courante, le groupe ou les groupes d'alternateurs en fonctionnement sont mis en relation avec le système des barres supérieures. Celles-ci se continuent par les trois fils de ligne, après interposition des ampèremètres T et T′ sur les barres extrêmes. Quand il y a fonctionnement simultané des deux groupes, les courants fournis par l'un et par l'autre sont de la sorte associés en quantité. Les ampèremètres T et T′ totalisent les courants résultants.

Si au contraire, pour l'un des groupes, les commutateurs C sont ouverts et les c fermés, ce groupe est en communication avec le système des barres inférieures aa, bb, $a'a'$, et par elles avec les rhéostats de charge α et α'.

Ces rhéostats servent, lorsqu'on a à mettre un groupe en marche alors que l'autre fonctionne déjà, à en absorber le travail, jusqu'au moment où l'accouplement en parallèle peut avoir lieu. Les barres aa et $a'a'$ sont en relation avec les collecteurs supérieurs des résistances, et la barre bb avec un commutateur à clavier, commandé à la main, qui permet de faire varier la résistance résultante.

Il faut maintenant revenir aux alternateurs, pour dire comment se règle leur excitation.

A l'ensemble des quatre alternateurs correspondent, pour les courants d'excitation, cinq fils, attendu qu'ils ont tous un fil commun rr, en relation directe avec la barre RR. Les autres fils, u_1, u_1', u_2, u_2', proviennent tous de la barre SS et du fil ss ; mais ce fil se ramifie avec

interposition, sur chacune des branches, de résistances variables destinées à régler les rapports des courants partiels. A cet effet s'opère d'abord en t_0 une bifurcation en deux branches t et t', dont la première correspond aux alternateurs Z_1 et Z_2 qui concourent à donner l'un des courants diphasés, l'autre aux alternateurs Z'_1 et Z'_2 producteurs de la seconde phase. Sur ces deux branches t et t' se trouvent respectivement interposés des régulateurs automatiques à flotteur, F et F', dont les bobines inductrices f et f' sont reliées à des transformateurs D, D', actionnés par des dérivations δ, δ' des courants de ligne correspondants.

A la suite de cette régulation automatique, l'une ou l'autre des deux branches, la branche t par exemple, se bifurque en deux courants individuels u_1 et u_2, qui après avoir passé par des interrupteurs V_1 et V_2, rencontrent des rhéostats à main à 26 touches, U_1 et U_2, au moyen desquels on peut régler, alternateur par alternateur, les courants d'excitation.

Ceux-ci, quoi qu'il en soit, sont donc issus d'un même courant en provenance des barres R et S. Ces barres le reçoivent elles-mêmes des deux dynamos excitatrices n° 1 et n° 2, qui peuvent être accouplées en quantité et reliées à ces barres, comme le dessin le montre, par les interrupteurs à main G_1 et G_2.

Ces dynamos sont excitées en dérivation. Les deux courants d'excitation l_1 et l_2, qui leur correspondent respectivement, sont les bifurcations d'une même dérivation h greffée sur la barre S. Le courant h traverse un régulateur à flotteur automatique H, qui est du même type que les régulateurs F et F' interposés sur les branches t et t' du courant d'excitation des alternateurs, et dont la bobine inductrice K reçoit le courant d'une dérivation ii greffée sur les fils extrêmes des secondaires des transformateurs D et D'.

Enfin, comme les courants individuels u_1, u_2 ... d'excitation des alternateurs, les courants d'excitation l_1 et l_2 rencontrent chacun un interrupteur et un rhéostat à main (interrupteurs J_1, J_2; rhéostats L_1, L_2).

En outre des appareils qui viennent d'être passés en revue, on voit encore sur le schéma du tableau de distribution deux paires de transformateurs E, E', e, e'. La première paire reçoit des courants primaires pris en dérivation sur les barres AA, BB, A'A', et la seconde paire a les siens pris sur les barres aa, bb, $a'a'$. Ces transformateurs servent à un indicateur de phases, destiné à faciliter la mise en parallèle des deux groupes d'alternateurs. L'un des groupes étant en fonctionnement, lorsqu'après avoir mis tout d'abord l'excitatrice du second groupe en parallèle avec celle du premier, puis le second groupe lui-même en marche sur les rhéostats de charge, on est arrivé à réaliser entre les deux groupes l'égalité des potentiels et des intensités, il reste à saisir une époque où il y ait concordance des phases pour relier le second groupe à la ligne. A cet effet, les secondaires des deux paires de transformateurs E, E' et e, e' sont mis en opposition à travers des lampes à incandescence, et l'on peut apprécier la concordance des phases par l'extinction de ces lampes.

Ligne. — La ligne, ainsi qu'on le voit *fig.* 4, Pl. XI, a été projetée comme devant être en majeure partie aérienne. Les poteaux ont 12 mètres de hauteur, dont $1^m,50$ de partie enterrée ; chacun est entouré d'une spirale de ronce métallique, pour empêcher les imprudents d'y grimper. Les fils, supportés sur des porcelaines à double cloche, sont en bronze siliceux; les diamètres adoptés sont 6 millimètres pour la ligne principale dirigée vers l'ouest, 4 millimètres pour la ligne allant vers l'est et les dérivations. Tous les 500 mètres on réalise une permutation

entre les trois fils, afin d'annuler les effets d'induction sur la ligne téléphonique placée à mi-hauteur des mêmes poteaux.

Une ligne à aussi haut voltage ne peut évidemment être aérienne que si elle est établie, maintenue et exploitée dans des conditions de sécurité absolues, tant comme tracé que comme solidité surabondante, et mise hors de la portée des personnes en toute circonstance.

L'extrémité de la ligne principale vers le puits des Chagnats devra être souterraine; on emploiera un câble sous plomb de $12^{mm^2},50$, placé dans un caniveau de bois goudronné. Enfin, à l'autre extrémité du réseau, l'on a prévu une section en fils aériens protégés par un isolement léger en plomb, en raison d'émanations sulfureuses à craindre dans cette région.

De puissants parafoudres sont intercalés aux stations entre la ligne et les appareils.

A la fin de juillet, époque de notre visite aux mines de Decize, la section de ligne posée était celle de 3.200 mètres allant de la station centrale à la fendue des Lacets.

En ce point était placé un moteur actionnant le ventilateur de la fendue. Ce moteur n'était autre qu'un alternateur Zipernowsky à huit pôles, dont il avait suffi de modifier le bobinage pour le faire fonctionner comme réceptrice à champ tournant. Cette solution était toutefois provisoire; on y avait eu recours parce que les circonstances avaient mis l'installation de Decize en avance sur la fabrication de la réceptrice définitive par les usines du Creusot. Pour la facilité de l'exposé, c'est cette réceptrice définitive que nous allons d'abord décrire; nous indiquerons ensuite la manière dont on avait transformé une dynamo du type courant en réceptrice provisoire.

Machine réceptrice. — Dans sa constitution définitive,

la réceptrice est représentée Pl. XII, *fig.* 3 et 4. Sa partie fixe est du même type que la partie fixe d'une machine génératrice, mais avec un nombre de pôles double de celui que présenterait la machine génératrice d'un courant alternatif simple tournant à la même vitesse, puisqu'il y a ici une suite alternée de deux séries de pôles correspondant aux deux courants. Dans le cas présent, les pôles sont au nombre de 16, soit pour chaque courant huit électro-aimants excités en série et bobinés alternativement dextrorsum et sinistrorsum. Le nombre d'ampères-tours de chaque pôle est en régime normal 1.350 et l'induction correspondante dans les noyaux vaut 4.500 unités.

Ces courants donnent un champ tournant dont la vitesse de rotation est $\frac{5.000}{8}$ ou 630 tours par minute environ.

L'armature mobile dans ce champ a pour carcasse un cylindre dont la paroi extérieure est creusée de rainures comme un induit de Pacinotti; ce cylindre offre, en dehors des rainures, un diamètre de 554 millimètres, ne laissant en regard des pôles fixes qu'un entrefer de 3 millimètres. Sa longueur suivant l'axe est $0^m,30$. Les rainures sont au nombre de 96, c'est-à-dire de six pour chaque intervalle de pôles; leur largeur est égale au plein qui les sépare, soit 9 millimètres, et leur profondeur est 30 millimètres.

Cette armature est feuilletée, surtout afin que, lors des démarrages, les courants de Foucault s'ajoutant à ceux induits dans les bobines ne viennent pas compromettre le *self-starting*. Elle est évidée dans sa partie centrale à la manière d'un anneau, non pour les besoins du bobinage, mais en vue de la légèreté.

Le bobinage est en effet placé uniquement à la partie extérieure du cylindre, le fil passant d'une rainure à une autre de manière à constituer des bobines plates en

forme de spirales, embrassant chacune deux intervalles de pôles par ses spires les plus étendues. La constitution de chaque bobine est la suivante : quatre spires superposées logées dans deux mêmes rainures distantes l'une de l'autre de deux intervalles de pôles; quatre autres spires logées dans les deux rainures contiguës aux premières, en se rapprochant de part et d'autre du milieu de l'intervalle; et ainsi de suite, de sorte que chaque bobine comprend quatre fois six spires décroissantes.

Huit bobines semblables, se suivant en série et enroulées alternativement dextrorsum et sinistrorsum, font le tour de l'armature : c'est un premier bobinage. Un second lui est adjoint, identique au premier, mais chevauchant sur lui à demi intervalle de bobines, c'est-à-dire à un intervalle des pôles de la partie fixe.

N'était la question du démarrage, chacune des deux séries de bobines pourrait être fermée sur elle-même, et l'on aurait une armature sans aucun frotteur. Mais il est nécessaire, comme on l'a vu au chapitre Ier, que les fortes vitesses relatives du champ et de l'armature ne puissent induire dans cette dernière des courants trop intenses relativement à l'intensité des courants de ligne. Dans le moteur qui nous occupe, quand l'armature est immobile, tandis que le champ tourne à raison de 630 tours par minute, la différence de potentiel aux extrémités de chacun des bobinages de l'armature peut valoir 130 volts : la fermeture de ces bobinages sur eux-mêmes donnerait des courants tels que le démarrage, ainsi que l'expérience l'a prouvé, ne se produirait pas, même à vide.

Le préventif employé consiste à intercaler un rhéostat, de résistance variable, dans chacun des deux circuits de l'armature. Parmi les quatre extrémités libres des deux bobinages, deux sont réunies en une seule, ce qui donne trois fils libres, dont un commun. Ces trois fils

aboutissent à trois bagues, munies de frotteurs ordinaires, et ceux-ci sont en relation avec les pôles de deux rhéostats liquides. Chacun de ces rhéostats se compose d'une cuve à sulfate de cuivre, dans laquelle plongent verticalement deux plaques métalliques que l'on peut, au moyen d'une vis à manivelle, éloigner l'une de l'autre ou rapprocher jusqu'au contact.

Pour la mise en route, ces rhéostats, d'abord disposés au maximum de résistance, sont modifiés progressivement jusqu'à ce que le démarrage se produise; ce départ a lieu à une petite vitesse, corrélative de la résistance des circuits; on continue de rapprocher les lames des rhéostats, la vitesse s'accélère, et quand les lames viennent au contact le régime est atteint.

Les expériences exécutées par MM. Schneider aux usines du Creusot, avant l'expédition du moteur aux mines de Decize, leur ont montré qu'à vide, ou avec une faible charge, le démarrage se produit presque dès le début de cette manœuvre des rhéostats. Muni d'un frein de Prony dont le serrage a été, au préalable, réglé en marche de manière à correspondre pour la vitesse de régime au travail maximum (30 ou même 35 chevaux), le moteur démarre, paraît-il, quand les plaques arrivent à quelques centimètres l'une de l'autre.

D'après les mêmes expériences, la vitesse de régime, qui à vide diffère de moins de 1. p. 100 de celle du synchronisme, lui est inférieure de 2,5 p. 100 à demi charge, et à pleine charge de 5 p. 100 environ, ou 6 p. 100 au maximum.

Les courants induits dans les circuits de l'armature, représentent presque entièrement le travail correspondant à cette perte de vitesse, soit 5 p. 100 du travail fourni par le moteur. Si ce dernier représente 20.000 watts, ces courants absorbent donc 1.000 watts, soit 500 watts pour chacun des circuits mobiles; si l'impédance du bobi-

nage fermé sur lui-même est 5/100 d'ohm, le courant de basse périodicité qui y circule vaut par suite environ 100 ampères efficaces.

MM. Schneider ont trouvé que dans le travail à charge maxima, au bout de 5 ou 6 heures de marche, la température atteinte dépassait d'environ 40° la température extérieure.

En mesurant la puissance électrique fournie au moteur à l'aide d'un wattmètre placé successivement dans les deux circuits diphasés, et la puissance mécanique du moteur au moyen du frein de Prony, ils accusent avoir obtenu, pour valeurs du rendement, 0,80 à demi charge, et à pleine charge, disent-ils, 0,88.

Nous avons dit qu'en attendant l'installation de ce moteur définitif, on avait utilisé comme moteur un alternateur Zipernowsky de modèle courant. C'était une dynamo à huit pôles inducteurs fixes et à induit tournant; il avait suffi, pour en faire un moteur, de modifier les bobinages. On avait affecté quatre enroulements de la partie fixe à chacun des deux courants de ligne. La partie tournante avait été munie de deux bobinages plats, chevauchés l'un par rapport à l'autre. Mais la machine ayant été construite pour fournir un courant alternatif simple, ne possédait que deux bagues à frotteurs. On avait en conséquence relié à ces deux bagues une des extrémités de chacun des deux bobinages; l'autre extrémité avait été simplement reliée *à la masse*, c'est-à-dire tout d'abord à l'une des flasques latérales de l'armature. Entre l'arbre sur lequel était montée cette flasque et le bâti de l'appareil, la conductibilité naturelle avait été renforcée par un frotteur logé dans l'un des paliers. Enfin c'est sur le bâti que se faisait la prise *milieu* de la communication à trois fils allant aux deux rhéostats de démarrage.

Ce moteur, installé à la fendue des Lacets, démarrait

seul, en entraînant un ventilateur sur lequel il était attelé au moyen d'une courroie. Par nature, un ventilateur n'oppose au début du mouvement que son inertie et les frottements de son axe, l'effort résistant dû à l'air ne se développant qu'avec la vitesse. Toutefois, le moteur atteint déjà ainsi sa vitesse de régime sous charge croissante. Il est vrai que, dans ces débuts de l'application, la mise en marche du moteur se faisait en mettant en mouvement la paire de dynamos génératrices elle-même : ce procédé facilite les commencements de la rotation, puisque, la vitesse angulaire du champ $\frac{2\pi}{p\Theta}$ et celle de l'armature Ω croissant ensemble, leur différence γ peut se tenir constamment voisine de la valeur qui correspond au couple le plus énergique.

Mais le moteur définitif a été, depuis lors, installé à la fendue des Lacets, et MM. Schneider et Cie nous informent que son démarrage peut s'effectuer soit par le procédé précédent, soit, lorsque le courant est sur la ligne, par la manœuvre des appareils du tableau de la station réceptrice.

La paire de dynamos génératrices alimente, outre l'électromoteur, 24 lampes à arc de 10 ampères installées au Pré-Charpin et 50 lampes à incandescence placées en différents points. Lorsque cet éclairage fonctionne, c'est la seconde méthode qui est employée pour mettre en mouvement le moteur électrique. Ce dernier démarre, non seulement lorsqu'il est simplement relié au ventilateur, mais encore lorsqu'il est muni d'un frein de Prony dont le serrage a été réglé, comme dans les essais du Creusot, pour le travail maximum en marche normale.

Ce moteur est ainsi directement attelé sur les courants de ligne à 2.000 volts. Il est évident que le haut voltage exige, en tous les points de l'installation, des précautions spéciales et très sévères en vue de la sécurité.

A la station réceptrice, l'intensité des courants est peu considérable, en rapport qu'elle est avec la puissance de la machine réceptrice, pourvu que l'on ait soin de faire convenablement les manœuvres de mise en marche et d'arrêt. Des coupe-circuits doivent être disposés en conséquence; les précautions à prendre comprennent évidemment l'interdiction de l'accès de la station aux personnes inexpérimentées, toutes les mesures d'isolation et de protection particulières à l'emploi des hauts voltages, l'usage méthodique et prudent des appareils, et, en particulier, des commutateurs à mercure, bipolaires et à action rapide, qu'il faut manœuvrer sans lenteur ni précipitation. Il conviendra d'ailleurs de disposer de résistances progressives à introduire dans les circuits, pour n'avoir à les fermer et surtout à les ouvrir qu'après avoir annulé l'intensité des courants.

Maintenant, il est clair que rien ne s'oppose à l'emploi du même système sous de moindres voltages, par exemple, par l'emploi de transformateurs. A puissance égale des machines, les courants auront de moindres écarts de potentiel, plus d'intensité, et les précautions à prendre seront celles afférentes à ce nouveau cas (*).

Dans un cas comme dans l'autre, il est à noter que l'on peut abaisser à volonté la vitesse du moteur dans une proportion quelconque au-dessous de sa vitesse maximum, en donnant telle ou telle valeur à la résistance des rhéostats intercalés sur les circuits d'armature. Il va de soi qu'en ce cas le rendement tombe, le travail utile diminuant de toute chaleur absorbée par ces rhéostats. Néanmoins, cette latitude relative à la vitesse peut avoir

(*) Dans l'appréciation des voltages, il ne faut pas perdre de vue qu'il ne suffit pas ici de considérer le nombre de volts efficaces de chaque circuit ; il y a à tenir compte des maxima à prévoir pour les différences de potentiel des divers conducteurs entre eux et avec la terre.

son utilité pratique en certain cas. Au ventilateur de la fendue des Lacets, on a trouvé commode de l'utiliser pour amener le ventilateur à la meilleure vitesse relativement à l'aérage de la mine. Les rhéostats liquides ne convenant pas à un fonctionnement prolongé, parce que leur contenu se vaporise et que leur conductibilité varie avec la température, on a adjoint, pour cet usage, aux rhéostats de démarrage, un rhéostat métallique formé de 40 mètres de fil de fer de 4 millimètres.

Dans le cas du moteur du treuil, on se propose de même de produire les arrêts et les mises en route répétés du système, sans toucher au tableau, en agissant sur l'induit mobile par l'ouverture et la fermeture des circuits à travers des résistances métalliques à manœuvre rapide.

BULLETIN
DES ACCIDENTS ARRIVÉS DANS L'EMPLOI DES APPAREILS A VAPEUR
PENDANT L'ANNÉE 1892.

(Résumé résultant de l'étude des dossiers administratifs.)

DATE de l'accident	NATURE et situation de l'établissement où l'appareil était placé	NATURE forme et destination de l'appareil — Détails divers	CIRCONSTANCES de l'accident	CONSÉQUENCES de l'accident	CAUSE PRÉSUMÉE de l'accident
14 janv.	Préparation mécanique de combustible, à Nœux (Pas-de-Calais).	Chaudière horizontale, chauffée par des flammes perdues de fours à coke, composée de deux corps cylindriques superposés, le corps supérieur servant de réservoir de vapeur. Chacun de ces deux corps était terminé à l'avant par un fond plat en fonte, assemblé à la virole adjacente par une rivure simple. Capacité, 28 m. c. Timbre, 6^{kg},5. En juin 1890, remplacement des tôles de coup de feu du corps inférieur et épreuve à la suite.	Projection du fond plat du corps inférieur, qui se détache avec cisaillement de la plupart des rivets, en même temps que ce corps lui-même s'ouvre latéralement suivant une large déchirure.	Dégâts matériels (démolition du fourneau et avaries de toiture).	La cause de l'accident n'a pu être définie avec précision : il paraît toutefois vraisemblable qu'elle réside dans la mauvaise constitution ou le mauvais état de l'assemblage de tôle sur fonte réunissant le fond plat à la virole cylindrique.
30 janv.	Bateau à marchandises, dans le port de Nantes (Loire-Inférieure).	Chaudière placée sur le pont du bateau, à l'air libre, et servant à actionner les treuils de chargement et de déchargement. Type vertical à foyer intérieur et bouilleurs croisés traversant le foyer. Celui-ci mesurait 1^{m},35 de diamètre et 1^{m},80 de hauteur. Capacité, 3^{mc},025. Timbre, 3 kg. Le foyer et les bouilleurs avaient été remplacés en 1886. Depuis lors, pour aveugler des fuites, deux petites contre-pièces avaient été mises à la partie inférieure du bouilleur le plus rapproché de la grille, et une troisième (en 1889) sur la paroi interne cylindrique du foyer. Cette dernière arrivait jusqu'au cadre du gueulard et présentait ainsi la forme d'une sorte de croissant de 0^{m},35 de hauteur sur 0^{m},15 de largeur maximum. Ici était brûlée, [illegible] et remplacée en dernier lieu, le 6 février 1891.	Deux heures après l'allumage, à six heures du matin, la chaudière saute et va retomber tout entière de l'autre côté de la Loire, à une distance de 180 m. Il s'était produit dans la partie basse du foyer, à proximité de la grille, une déchirure d'une longueur développée de 2 m., commençant et finissant en pleine tôle, et passant par trois rivets consécutifs du cadre du gueulard. Une autre déchirure coupait en croix la première. Ces déchirures passaient par une zone d'amincissement où la tôle, d'une épaisseur primitive de 11 millim., était réduite par la corrosion jusqu'à 1^{mm} à peine en un point (corrosion attribuable à ce que le tuyau [illegible] ; la déchirure principale passait en outre par la région de la contre-pièce du gueulard, qui était brûlée, dédoublée, réduite à une épaisseur de 5^{mm}, tandis que la tôle primitive était fissurée d'ancienne date.	Le chauffeur a disparu, et l'on présume qu'il a péri, lancé dans la Loire par l'explosion.	Mauvais entretien de l'appareil. Le foyer présentait deux régions particulièrement affaiblies, l'une en pleine tôle, en face du débouché du tuyau d'alimentation, par suite de corrosions intérieures : l'autre au droit du gueulard de chargement, par suite d'une réparation mal faite ayant consisté dans l'application d'une pièce pour aveugler une fuite, sans enlèvement du morceau de tôle situé au-dessous, ce qui a permis à cette pièce de se surchauffer et de perdre rapidement de son [illegible] immédiat.
1er févr.	Papeterie, à Tullins (Isère).	Récipient cylindrique en tôle, de 2^{m},06 de diamètre et 5^{m},60 de longueur y compris les fonds emboutis ; la partie cylindrique était formée de trois viroles, comprenant chacune trois tôles de 12 millim. d'épaisseur ; les deux viroles extrêmes portaient, pour le chargement et le déchargement des matières à élaborer, des ouvertures de 0^{m},85 de longueur dans le sens de l'axe du cylindre et 0^{m},53 de largeur dans le sens perpendiculaire, avec cadres en fonte de 0^{m},05 d'épaisseur rivés à la tôle du cylindre, et tampons autoclaves. Capac., 18 m. c. Timbre, 4 kg. A chaque extrémité, sur les tuyaux d'arrivée et de sortie de vapeur, soupapes de 0^{m},04 de diamètre chargées pour 4 kg. L'appareil portait un manomètre. Il recevait la vapeur d'une chaudière timbrée à 7 kg. avec interposition d'un détendeur réglé pour 4^{kg},5. Construction, 1883. Épreuve, 12 mai 1883. Elaborait la pâte à papier.	Le récipient fonctionnait depuis deux heures, et, au dire du chauffeur, la pression dans la chaudière était de 6 kg. à 6^{kg},25, lorsque le récipient s'est violemment fragmenté. L'une des extrémités comprenant le fond correspondant, la virole contiguë et une portion de la virole centrale, a été lancée d'un côté sans se dérouler ; l'autre fond a été projeté dans la direction opposée ; le complément de la virole centrale et l'autre virole extrême se sont déroulés et divisés en cinq fragments. Le cadre en fonte placé dans cette moitié de l'appareil, et correspondant à l'ouverture de chargement et de déchargement habituellement utilisée, s'est rompu dans ses quatre angles ; on a remarqué dans un de ses angles une trace de fissure ancienne, triangulaire, de 32^{mm} de hauteur et 9^{mm} de base.	Un ouvrier tué sur le coup. Importants dégâts matériels.	La cause de l'explosion n'a pu être déterminée avec précision. Toutefois, il y a probablement lieu de la rechercher dans la rupture du cadre en fonte de l'orifice de chargement, les cadres de ce métal étant peu propres à supporter les efforts auxquels ils sont soumis dans le travail courant de ce genre d'appareils, surtout lorsque, comme dans l'espèce, leur épaisseur est faible par rapport à leurs dimensions et qu'en même temps leur forme laisse à désirer au point de vue de la résistance.
15 févr.	Scierie de bois, à Saint-Denis (Seine).	Chaudière horizontale à bouilleurs, de 6 m. c. de capacité, 38 m. q. de surface de chauffe. Timbre, 5 kg. Possédait deux tubes de verre indicateurs du niveau de l'eau, reliés vers le haut à un piètement placé sur le corps cylindrique, et vers le bas aux bouilleurs, au moyen de tuyaux ayant 10 millim. de diamètre, et pour longueurs respectives 2^{m},10 (tuyaux de vapeur) et 1^{m},05 (tuyaux d'eau). Il y avait en outre un sifflet d'alarme. Alimentation par la pompe de la machine, puisant l'eau dans des réservoirs que l'on emplissait chaque jour. En raison de circonstances spéciales, il est possible que la pompe ait marché à vide par suite de manque d'eau à ces réservoirs. D'autre part, la fourche alimentaire était fortement entartrée.	Déchirure du bouilleur de gauche, au coup de feu, sur 0^{m},45 de longueur, avec bâillement de 0^{m},067 ; ouverture occupant la partie la plus saillante d'une bosse de 0^{m},75 de longueur. Ce bouilleur présentait extérieurement une coloration bleue (oxyde des battitures), et intérieurement le tartre qui le tapissait montrait des différences de coloration par bandes horizontales. Le bouilleur de droite fut trouvé en majeure partie vide d'eau, et extérieurement il portait une légère bosse et la coloration bleue fortement accusée. Avant l'accident, le chauffeur avait peine à tenir la pression.	Néant.	Surchauffe consécutive à un défaut d'alimentation.

DATE de l'accident	NATURE et situation de l'établissement où l'appareil était placé	NATURE forme et destination de l'appareil — Détails divers	CIRCONSTANCES de l'accident	CONSÉQUENCES de l'accident	CAUSE PRÉSUMÉE de l'accident
10 mars.	Fabrique de papier à cigarettes, à Cassagne (Haute-Garonne).	Réchauffeur commun à deux chaudières, composé de deux corps cylindriques horizontaux de 0m,65 de diamètre, superposés et reliés l'un à l'autre par deux jambettes. Capacité, 2mc,7. Timbre, 7 kg. Chacun de ces corps était terminé à l'avant par une tête en fonte avec trou d'homme. Alimentation par pompe. Dispositions qui permettaient d'isoler ce réchauffeur de l'une et l'autre chaudières, bien qu'il ne possédât en propre ni soupapes ni manomètre.	Rupture de la tête en fonte du corps supérieur, au ras du raccordement de sa partie plane terminale avec sa partie cylindrique. Projection de la partie plane à 4 mètres de distance. Le chauffeur a reçu dans le dos un jet d'eau chaude sans être blessé.	Néant.	La rupture paraît avoir eu pour cause un excès de pression hydraulique, consécutif à une fausse manœuvre, le chauffeur ayant vraisemblablement fermé à la fois les communications du réchauffeur avec l'une et l'autre chaudières, alors que la pompe alimentaire continuait de fonctionner.
15 mars.	Exploitation agricole, à Saint-Christophe-à-Berry (Aisne).	Chaudière cylindrique horizontale avec dôme, munie d'un bouilleur de 0m,55 de diamètre, relié au corps principal par deux communications basses. Capacité, 2mc,165. Timbre, 4 kg. Le bouilleur datait de 1873. Epreuves en 1886 et 1887, la dernière fois à la suite du remplacement de la tôle de coup de feu du bouilleur.	Alors que la chaudière était abandonnée à elle-même avec son feu couvert, le fond embouti postérieur du bouilleur se déchire circulairement suivant son congé de raccordement avec la virole cylindrique; ce fond est rejeté en arrière, et le reste du générateur projeté en avant à 5 mètres hors du bâtiment. La face extérieure du fond détaché était fortement corrodée : au pourtour rompu, épaisseurs descendant à 2mm,5.	Démolition presque complète du local de la chaudière. Les ouvriers se trouvant tous absents, il n'y a pas eu d'accident de personne.	Conséquence de l'amincissement du fond du bouilleur, produit par des corrosions extérieures profondes, dues elles-mêmes à l'humidité habituelle de la maçonnerie.
1er avril.	Mine de houille, à Montjean (Maine-et-Loire).	Chaudière à tubes bouilleurs du système Oriolle, timbrée à 10 kg., à laquelle était adjoint un réservoir de vapeur relié à la partie supérieure de la chaudière par quatre tuyaux, et à la partie inférieure par un tuyau en cuivre de 0m,066 de diamètre. Ce réservoir avait été substitué, en 1890, à un réservoir de dimensions moindres; cette opération, qui avait constitué une modification essentielle [illegible] Le tuyau de communication inférieur, d'une épaisseur primitive de 2 millim., était profondément corrodé et piqué par places.	Le tuyau de communication inférieur s'ouvre sur 0m,20 de longueur, la chaudière se vide par cette ouverture, et un jeune manœuvre qui se trouvait à proximité est brûlé mortellement.	Un jeune ouvrier brûlé mortellement. Aucun dégât matériel.	Corrosions qui avaient, par places, profondément aminci la tôle du tuyau.
8 avril.	Station centrale d'électricité, à Paris.	Chaudière à tubes bouilleurs, du système Babcock et Wilcox, comprenant douze éléments, dont chacun est composé de 9 tubes bouilleurs de 100 millim. de diamètre, reliés à l'avant et à l'arrière par des collecteurs ondulés. Les collecteurs ondulés d'arrière sont mis en communication avec les réservoirs supérieurs d'eau et de vapeur par l'intermédiaire de tubes en fer assemblés : d'une part, dans les abouts supérieurs des collecteurs ondulés; d'autre part, dans des boîtes de connexion en acier moulé solidaires des réservoirs. Ces assemblages sont obtenus par sertissage des tubes au dudgeon. Capacité, 14 m. c. Timbre, 12 kg. Mise en service vers le commencement de 1891. — Quatre jours avant l'accident ici relaté, un coup de feu causé par les dépôts était survenu à l'une des autres chaudières de la même usine, sans occasionner d'accident de personne.	L'un des tubes de communication, réunissant les collecteurs ondulés d'arrière aux réservoirs supérieurs d'eau et de vapeur, s'est déchiré, est sorti de ses emmanchements terminaux et a été projeté sur la rangée supérieure des tubes bouilleurs, sans sortir de l'intérieur du fourneau. La bouffée des fluides chauds refluant au dehors est venue atteindre le chauffeur devant l'appareil. Le tube rompu était profondément gravé et creusé de corrosions extérieures, engendrées évidemment par une fuite qui était vraisemblablement venue de l'assemblage de l'extrémité supérieure du tube. Ces corrosions, hâtées par le contact des produits de la combustion, avaient réduit l'épaisseur du tube, primitivement égale à 3mm,5, presque jusqu'à néant en certains points. La chaudière n'avait eu encore que 200 jours environ de fonctionnement depuis son installation.	Le chauffeur brûlé grièvement.	Corrosion extérieure profonde qui avait aminci le tube à l'excès. Cette corrosion avait elle-même été causée par une fuite qui avait mouillé le tube au contact des gaz du foyer.
9 avril.	Mine de houille, à Grand-Croix (Loire).	Chaudière horizontale à bouilleurs. Capacité, 10 m. c. Surface de chauffe, 19 m. q. Timbre, 4 kg. Cette chaudière fournissant la vapeur à un service d'exhaure urgent et intensif, était, depuis le 16 mars, alimentée avec des eaux ayant séjourné de longues années dans de vieux travaux souterrains; elle était, depuis la même date, fortement poussée jour et nuit. Son dernier nettoyage remontait au 7 février; dans les autres chaudières de la même batterie, dont le nettoyage était cependant moins ancien, on a constaté un dépôt de boues d'une hauteur de 0m,07.	La deuxième virole à partir du fond avant (virole de coup de feu) s'est déchirée suivant une génératrice très voisine de la génératrice inférieure, et suivant deux sections droites passant par les rivures circulaires qui reliaient cette virole aux viroles voisines. Le fond avant et la première virole ont été projetés contre le chevalement et sont tombés dans le puits à 235 mètres de profondeur. La partie arrière a été rejetée de plusieurs mètres, en démolissant le massif de maçonnerie.	Cinq ouvriers blessés, dont un grièvement. — Dégâts matériels importants.	L'explosion paraît devoir être attribuée à un coup de feu résultant de l'accumulation des boues au fond de la chaudière, dont, par suite de circonstances spéciales, l'alimentation avait lieu depuis quelque temps avec des eaux impures, et le nettoyage n'avait pas été effectué depuis deux mois.

DATE de l'accident	NATURE et situation de l'établissement où l'appareil était placé	NATURE forme et destination de l'appareil — Détails divers	CIRCONSTANCES de l'accident	CONSÉQUENCES de l'accident	CAUSE PRÉSUMÉE de l'accident
24 avril.	Fabrication de levures et alcools de grains, à Argenteuil (Seine-et-Oise).	Récipient cylindrique en tôle de 1m,60 de diamètre et 4 mètres de longueur, terminé par des fonds bombés offrant une flèche de 0m,30. Ces fonds étaient faits d'une tôle de 7 millim. d'épaisseur primitive, ayant une résistance à la rupture de 37kg,3 dans un sens et 30kg,8 dans le sens perpendiculaire, avec allongements respectifs de 10 p. 100 et 9,2 p. 100. Capacité, 8mc,7. Timbre, 2 kg. Ce récipient, servant à cuire la drèche, était vidé tous les mois, mais non nettoyé ni à plus forte raison inspecté à l'intérieur. Une contre-pièce en tôle, de 3 millim. d'épaisseur, mesurant 320 × 150 millim., avait été fixée intérieurement, le 14 avril, au moyen de boulons, dans la région périphérique du fond avant, en remplacement d'une autre pièce ancienne plus petite, de manière à recouvrir de petites cassures longues de 15 millim. dont on avait aperçu la présence.	Déchirure circulaire du fond avant suivant le congé périphérique; ce fond est violemment projeté contre un mur qu'il démolit; le reste de l'appareil est arraché de ses socles et recule de 0m,20. La tôle du fond était fortement amincie, dans la région supérieure, par des corrosions intérieures; le long de la ligne de rupture, l'épaisseur s'abaisse en un point jusqu'à 1mm,25.	Un ouvrier tué sur le coup, son corps projeté à 20 m. et aplati contre un mur. Un autre ouvrier mortellement brûlé par le jet issu du récipient. — Dégâts matériels importants.	Mauvais état d'entretien, le fond qui a cédé présentant à sa partie supérieure des corrosions intérieures profondes.
26 avril.	Charronnage, à Verneuil (Eure).	Chaudière horizontale tubulaire, à foyer intérieur et flamme directe. Capacité, 669 litres. Timbre, 7 kg. Le faisceau tubulaire se composait de 20 tubes de 0m,05 de diamètre et 0m,0025 d'épaisseur. Neuf de ces tubes avaient été récemment remplacés; ils étaient bagués.	Un des nouveaux tubes donnant lieu à une fuite à son insertion dans la plaque tubulaire du foyer, deux ouvriers voulurent en remplacer la bague pendant que la chaudière était en pression. Pour faire sortir de sa position la bague existante, un long refouloir fut introduit dans le tube par la boite à fumée; mais la poussée exercée fit glisser le tube lui-même et un jet de vapeur fit irruption dans cette boite.	Un ouvrier grièvement brûlé.	L'accident a eu pour cause directe une manœuvre imprudente, consistant à enlever, pendant le fonctionnement de la chaudière, la bague d'un tube à fumée dont le joint perdait.
27 avril.	Filature de ramie, à Entraigues (Vaucluse).	Deux récipients cylindriques verticaux, avec couvercles maintenus par des boulons [illegible] diamètre et [illegible] à son [illegible] en fer avec gorge pour joint en caoutchouc; sur cette collerette, le couvercle reposait par un bord plat, renforcé par un cercle en fer de 20 millim. d'épaisseur et 60 millim. de largeur. Épaisseur de la tôle du couvercle, 9 millim.; flèche au centre, 80 millim. Assemblage par quatorze boulons à charnière, agissant sur des pattes rivées au couvercle. Construction, 1888. Timbre, 3 kg. — L'autre, de 1m,35 de diamètre et 2mc,277 de capacité, construit en 1884, offrait des dispositions analogues; sa collerette n'avait pas de gorge, mais un rebord extérieur saillant. — Servaient à lessiver la ramie; étaient chauffés par des serpentins non percés de trous et où circulait la vapeur d'une chaudière à 4 kg.; portaient soupape et manomètre. Au plus grand des deux, antérieurement à l'accident, cinq pattes avaient dû être remplacées, s'étant brisées en travers, et une contre-pièce de 0m,12 × 0m,37 avait été mise au couvercle à la suite d'une fissuration entre les rivets d'une patte.	Vers la fin d'une opération, peu de temps après que la pression habituelle de [illegible] avait été établie dans les [illegible] récipients. Les couvercles furent trouvés bombés et déformés; tous les boulons à charnière rabattus sans brisure. Une seule patte détachée au plus grand des couvercles; une écornée à chacun d'eux; toutes les autres intactes. Le serpentin du grand récipient, brisé à un bout, mais demeuré dans la cuve; celui du petit récipient, qui était primitivement formé de deux parties réunies par brasure, entièrement détaché et projeté en deux tronçons; le joint brasé défait.	Sept personnes blessées légèrement [illegible] 30 m. de [illegible] du bâtiment démoli sur 40 m. q.	Détachement des couvercles qui étaient reliés à ces récipients au moyen de boulons [illegible] l'extérieur. C'est un nouvel et double exemple d'un genre d'accidents dont ce système d'attache des obturateurs amovibles avait déjà donné sept cas en France depuis octobre 1888. L'explosion de l'un des deux récipients s'est vraisemblablement produite sous la seule action des mêmes causes que les précédents accidents de pareille nature. Quant à la cause occasionnelle qui a déterminé l'explosion simultanée de l'autre récipient, elle n'a pu être déterminée avec certitude.
10 mai.	Fabrique de chaussures, à Nantes (Loire-Inférieure).	Chaudière tubulaire à foyer intérieur et flamme directe, de la forme dite à T. Capacité, 1mc,5. Timbre, 5 kg. Le faisceau tubulaire se composait de dix-huit tubes en cuivre de 0m.06 de diamètre, 2m,60 de longueur et 0m.0035 d'épaisseur primitive. Construction, 1868. A une époque inconnue, raboutage de tous les tubes à l'arrière. En 1884, lors d'une épreuve, cinq tubes s'écrasent; ils sont remplacés, et l'épreuve est faite avec succès, puis renouvelée en 1886.	Aplatissement et rupture de deux tubes anciens situés l'un près de l'autre à la partie inférieure du faisceau. La machine avait été arrêtée depuis dix minutes, alors que le manomètre marquait 4kg,5, et la porte du foyer avait été ouverte pour empêcher la pression de monter pendant cet arrêt; les soupapes, réglées pour se lever un peu avant 5 kg., n'ont pas soufflé avant l'accident. Il a été constaté que l'épaisseur des tubes se trouvait presque partout réduite à 2 millim. ou 2mm,5. De plus, leur surface intérieure présentait de nombreuses corrosions en forme de capsules circulaires, dont la profondeur semblait atteindre souvent près de 1 millim.	Un ouvrier brûlé grièvement.	Affaiblissement des tubes à la suite d'un long usage, notamment par des corrosions en cupules sur leur face non baignée par l'eau.

DATE de l'accident	NATURE et situation de l'établissement où l'appareil était placé	NATURE forme et destination de l'appareil — Détails divers	CIRCONSTANCES de l'accident	CONSÉQUENCES de l'accident	CAUSE PRÉSUMÉE de l'accident
10 mai.	Brasserie, à Bellevue (Loire).	Chaudière horizontale à bouilleurs. Capacité, 4mc,435. Timbre. 5 kg. Cette chaudière avait pour seul appareil indicateur du niveau de l'eau un tube de verre placé sur le devant du corps cylindrique; un flotteur à sifflet d'alarme, dont elle avait été pourvue, avait été supprimé.	Le chauffeur venait de constater que l'on voyait 2 ou 3 centimèt. d'eau dans le tube de verre, quand le bouilleur de droite se déchira au coup de feu; il n'y eut que peu ou point d'eau projetée; le bouilleur déchiré offrait les colorations bleues et rouges caractéristiques de la surchauffe; l'autre bouilleur portait à l'extérieur des marques de surchauffe, et à l'intérieur le tartre qui le tapissait montrait des traces blanches en bandes horizontales. — L'enquête a révélé que le tube indicateur de verre était à peu près complètement obstrué à sa partie inférieure par le caoutchouc de la garniture, qui avait débordé au-dessous de lui; de sorte que le tube avait montré un niveau d'eau trompeur dû à l'eau de condensation.	Néant, sauf la démolition du fourneau de la chaudière.	Surchauffe consécutive à un défaut d'alimentation.
17 mai.	Brasserie, à Tourcoing (Nord).	Chaudière composée de trois paires de bouilleurs horizontaux, superposés deux à deux, et d'un réservoir de vapeur cylindrique surmontant le tout, ces différents corps étant reliés dans le sens vertical par des cuissards. Résistance de la tôle à la rupture, 33 kg. en long et 30 kg. en travers; allongement, 14 p. 100 (?) en long et 3,5 à 4,5 environ en travers. Bouilleurs terminés à l'avant par des têtes en fonte. Capacité, 12mc,655. Timbre, 15 kg. Alimentation par un ballon recevant l'eau d'une bâche. Le clapet de retenue et la valve d'alimentation n'étaient pas étanches.	Déchirure du bouilleur inférieur de droite suivant une génératrice latérale, côté gauche, sur presque toute la longueur de la tôle de coup de feu; en même temps, détachement de la tête en fonte; le générateur est déplacé, à l'avant, de 1 mètre vers la droite; démolition du fourneau et de deux murs du local. Projection importante d'eau, de boue et de débris de maçonnerie. Apparences de surchauffe sur la tôle déchirée du bouilleur inférieur de droite, sur la tôle correspondant du bouilleur situé au-dessus, et avec moins de netteté sur le bouilleur de gauche en regard de la déchirure.	Dégâts matériels.	Coup de feu dont les causes n'ont pu être déterminées avec une entière certitude. Les dispositions compliquées de la chaudière, la mauvaise qualité de la tôle, l'état de la valve et du clapet d'alimentation, la présence dans la chaudière des boues qui ont été projetées au dehors, ont pu jouer dans ces causes un rôle plus ou moins important.
17 juin.	Station centrale d'électricité, à Capestang (Hérault).	Chaudière à tubes bouilleurs du système Torrey et Delarbre, comportant un faisceau de 82 tubes en fer de 0m,06 de diamètre et 2m,30 de longueur, reliés à l'avant de trois en trois et de deux en deux par des boîtes en fonte, et débouchant à l'arrière dans trois collecteurs verticaux. Capacité, 1mc,888. Timbre, 10 kg. Construction, 1889. Chacune des extrémités des tubes était renforcée par une bague soudée à surface extérieure conique, qui était amenée en serre dans l'orifice alésé correspondant de la boîte ou du collecteur par la traction d'un boulon à ancre, dont l'écrou portait d'autre part sur un bouchon de trou de nettoyage situé sur la face opposée de la boîte ou du collecteur. Le bouchon, non autoclave, était tenu en place par cet écrou.	Au moment où l'on procédait au serrage de l'écrou des boulons à ancre pendant que la chaudière était en pression. Au cours d'une opération de cette nature, le boulon à ancre se sépara du tube, le bouchon cessa d'être maintenu, et l'eau à haute température se fit jour avec violence par l'ouverture devenue libre. Une ablation de la bague conique de l'extrémité du tube, sur la moitié environ de la circonférence, a été constatée après l'accident.		l'un des boulons à ancre pendant que la chaudière était sous pression. L'assemblage de ce boulon avec le tube bouilleur correspondant pouvait d'ailleurs être affaibli par un état défectueux de la bague de renforcement de l'extrémité du tube.
26 juin.	Filature, à Petit-Quevilly (Seine-Inférieure).	Chaudière à tubes bouilleurs, du système Backock et Wilcox, comportant un faisceau de 63 tubes de 0m,09 de diamètre et 5m,40 de longueur. Capac., 6mc,045. Timbre, 7 kg. Installation et épreuve, 1886. Dans cette chaudière, les sept tubes qui réunissent l'arrière du faisceau tubulaire à l'arrière du réservoir supérieur d'eau et de vapeur s'emmanchent à leur partie supérieure dans un collecteur prismatique en fonte, dont la face supérieure est percée d'autant de trous de nettoyage, de 0m,11 de diamètre, à bouchons non autoclaves. Chaque bouchon est appliqué sur son siège par un boulon à étrier coiffé d'un écrou à chapeau.	On venait de nettoyer la chaudière, et à cet effet l'on avait enlevé, puis remis en place les bouchons des trous de nettoyage. La chaudière avait ensuite été mise en feu afin de vérifier l'étanchéité des joints refaits. La pression venait, paraît-il, d'atteindre 4 kg., quand un des bouchons se détacha, et deux ouvriers du nettoyage, qui ramassaient leurs outils, furent atteints par le jet violent d'eau et de vapeur. On a retrouvé après l'accident un boulon à filets usés.	Deux ouvriers brûlés mortellement.	Projection violente d'un obturateur de trou de poing d'une chaudière à petits éléments. Il est vraisemblable que l'écrou à chapeau qui maintenait cet obturateur s'est arraché de son boulon par suite de l'état d'usure des filets de celui-ci. Les dispositions de la fermeture du trou de poing rendaient dangereuses les conséquences d'une éventualité de ce genre.
18 juill.	Entrepôt, à Bordeaux (Gironde).	Chaudière de grue, du type vertical à tubes Field. Corps cylindriques de 0m,95 de diamètre et 2m,32 de hauteur, foyer de 0m,75 de diamètre et 1m,20 de hauteur. 36 tubes bouilleurs pendantifs de 0m,06 de diamètre. Capacité, 1mc,998. Timbre, 6kg,5. Tôles du foyer de 10 millim. d'épaisseur, offrant environ 17 kg. de résistance élastique et 30 à 33 kg. de résistance à la rupture, avec des allongements qui ont été respectivement, sur 4 éprouvettes, 11 p. 100 en long, 17,5 dans un sens oblique, 16,8 et 3,1 p. 100 perpendiculai-	Après un arrêt d'un quart d'heure, pendant lequel une pression de 8 kg. avait été vue au manomètre, la machine venait d'être remise en route et le robinet d'alimentation ouvert; un mécanicien chargé de l'entretien se rendait à l'appel de l'aide-mécanicien chauffeur qui éprouvait quelque difficulté dans la manœuvre du robinet de prise de vapeur. A ce moment, le foyer s'est déchiré violemment dans sa partie inférieure, au niveau et de chaque côté du ro-	Le chauffeur et un autre homme, tués; un troisième blessé grièvement.	Déchirure du foyer, dont les renseignements recueillis ne permettent pas de préciser suffisamment les causes. Il peut y avoir lieu de faire intervenir la qualité de la tôle, la préexistence d'avaries, l'excès de pression, peut-être la nature boueuse des eaux.

DATE de l'accident	NATURE et situation de l'établissement où l'appareil était placé	NATURE forme et destination de l'appareil — Détails divers	CIRCONSTANCES de l'accident	CONSÉQUENCES de l'accident	CAUSE PRÉSUMÉE de l'accident
18 juill. (*suite*).	Entrepôt, à Bordeaux (Gironde) (*suite*).	rement au laminage. Construction, 1866. Alimentation en eau de la Garonne, au moyen d'une pompe mue par la machine. — L'appareil était conduit par un jeune aide-mécanicien.	binet d'alimentation, sur une longueur développée de 0m,95; la ligne de rupture a contourné le gueulard en suivant la ligne de rivets du cadre sur 0m,20 de longueur. La tôle ainsi découpée s'est rabattue sur la paroi opposée en entraînant les tubes qui ont été ployés en faisceau. Le ciel du foyer s'est légèrement déversé et une déchirure de 0m,45 de longueur s'est faite le long de son assemblage avec la virole du foyer. La chaudière, projetée en l'air, est retombée à 28 mètres en défonçant une estacade: la toiture et autres pièces ont été lancées à 27 mètres.		
5 sept.	Battage des grains dans une exploitation agricole, à Oizé (Sarthe).	Locomobile horizontale, tubulaire, à flamme directe; corps cylindrique de 0m,60 de diamètre et 1m,70 de longueur, entamé à sa partie inférieure, sur 0m,80 de longueur, par un foyer horizontal dont le ciel était rivé, d'une part, sur une tôle de devanture en forme de croissant; d'autre part, sur une plaque tubulaire de forme ovale (0m,49 horiz., 0m,32 vert.), d'où partaient seize tubes à fumée de 55 millim. de diamètre. La tôle de devanture, de 11 millim. d'épaisseur, était découpée par un orifice à fermeture autoclave de 0m,20 sur 0m,15. Capacité, 0mc,310. Construction, 1879. Le timbre primitif, 6 kg., avait été porté, en 1886, à 7 kg., après épreuve.	Pendant un arrêt de la machine, au cours duquel des bouffées horizontales de vapeur sortant par les soupapes de sûreté avaient été remarquées, la chaudière vole en éclats. Tôle de devanture fendue en deux, foyer et corps cylindrique fragmentés; la moitié du corps cylindrique opposée au foyer, avec la boîte à fumée et les tubes, lancée à 130 mètres avec trois ricochets successifs; projections diverses des autres fragments. — Sur l'une des balances (l'autre avait été brisée par l'explosion), il a été constaté que le manchon était encrassé et s'opposait à la levée de la soupape; toutefois, le manomètre, dont l'aiguille pouvait aller à 9 kg., a été retrouvé en état de fonctionner encore et son aiguille [illegible] la plaque de devanture avec le foyer.	Un tué et trois blessés, dont un grièvement. En outre, un vieillard, saisi de peur à la vue de l'explosion, est mort subitement.	L'explosion est due avant tout à l'affaissement de la tôle de devanture, qui, soumise à des causes spéciales de fatigue par suite des formes extrêmement défectueuses de la chaudière, était insuffisamment soutenue. Cette cause a été aggravée par l'élévation du timbre après plusieurs années de service.
7 sept.	Tissage de coton, à Flers (Orne).	Bouilleur réchauffeur de 0m,60 de diamètre et 8 mètres de longueur, appartenant à une chaudière cylindrique à trois bouilleurs extérieurs et deux tubes intérieurs de retour de flamme. Timbre, 6kg,5. Construction, 1867. Dernière épreuve, août 1891. La tôle du réchauffeur, d'une épaisseur primitive de 10 millim., portait des corrosions intérieures.	Déchirure de la tôle supérieure du bouilleur réchauffeur le long de la rivure longitudinale, sur 0m,55 de longueur. Ce bouilleur s'est vidé dans les carneaux vers l'arrière; un clapet de retenue, interposé entre lui et la chaudière proprement dite, a empêché celle-ci de se vider.	Néant.	Déchirure, près d'une rivure longitudinale, d'un bouilleur réchauffeur corrodé intérieurement à la suite d'un long usage.
22 sept.	Atelier ambulant pour le sciage des bois, à Châteaulin (Finistère).	Locomotive horizontale, tubulaire, à flamme directe, dont le foyer intérieur offrait une section elliptique. Capacité, 0mc,812. Timbre, 6 kg. Construction, 1873. Dernière épreuve, 1889. Chaudière soumise à de fréquents chômages. Le tube indicateur du niveau de l'eau était bouché à sa base par de l'étoupe; les soupapes étaient collées sur leurs sièges par du mastic formant obstruction au-dessous d'elles. La tôle du foyer, d'une épaisseur primitive de 10 millim., était amincie dans la région de la génératrice supérieure jusqu'à 2 millim., et même un peu moins au centre.	Pendant un arrêt de la machine, la partie supérieure du foyer s'écrase en se déchirant suivant ses deux sections droites extrêmes. La locomobile est projetée tout d'une pièce, en se retournant bout pour bout, à une distance de 7m,50; quelques fragments de la porte du foyer et de son cadre sont seuls lancés dans une direction différente.	Trois tués et cinq blessés, dont quatre grièvement.	L'explosion doit être principalement attribuée à l'affaiblissement de la partie supérieure du foyer, qui était d'une forme défectueuse (section elliptique) et dont le ciel présentait une plage de corrosion profonde. Cette corrosion doit être vraisemblablement rapportée à des manques d'eau demeurés inaperçus à cause de l'obstruction complète du tube indicateur. Les soupapes étaient, de leur côté, entièrement paralysées.
3 octob.	Tissage de coton, au Valdoie (Territoire de Belfort).	Tambour d'une machine à parer; diamètre, 1m,50. Longueur, 1m,90 Virole cylindrique en cuivre formée de quatre panneaux de tôle assemblés entre eux suivant des génératrices par des brasures, et rivés aux extrémités du cylindre sur des cornières portées par des fonds en fer que des tirants relient l'un à l'autre à l'intérieur du tambour. Timbre, 1kg,5. Construction, 1875. Réépreuve, 1891. La tôle de cuivre (27 à 28 kg. de résistance à la rupture, 19 à 27 p. 100 d'allongement) avait eu une épaisseur primitive de 2 millim., mais l'usure l'avait réduite à 1mm,6 et même 1mm,2 en certains points. La vapeur, fournie par une conduite générale à 4kg,5, traversait un ballon porteur d'une soupape réglée à moins de 1kg,5.	La machine n'avait pas fonctionné depuis quarante-six heures. Une demi-heure après l'introduction de la vapeur pour la reprise du travail, déchirure suivant une génératrice d'assemblage des panneaux et déroulement du cylindre. La génératrice déchirée étant au sommet de l'appareil, écoulement de la vapeur par la hotte placée au-dessus, qui a été en partie brisée. (A rapprocher de l'explosion d'appareil analogue, survenue à Giromagny le 13 septembre 1886.)	Néant; quelques dégâts matériels.	L'explosion paraît avoir eu pour cause essentielle le défaut de résistance de la virole cylindrique du récipient, en raison de la minceur des tôles, exagérée par l'usure, et de leur mode d'assemblage (brasure).

DATE de l'accident	NATURE et situation de l'établissement où l'appareil était placé	NATURE forme et destination de l'appareil — Détails divers	CIRCONSTANCES de l'accident	CONSÉQUENCES de l'accident.	CAUSE PRÉSUMÉE de l'accident
31 octob.	Fonderie et fabrique de roues en fer à Cousances-aux-Forges (Meuse).	Chaudière cylindrique de 0m,63 de diamètre et 1m,95 de longueur, avec foyer intérieur cylindrique de 0m,93 de longueur prolongé par un faisceau de 29 tubes à fumée de 0m,05 de diamètre. Construction, 1880. Depuis 1881, dans l'intention de faciliter le nettoyage, le tube central avait été supprimé et remplacé par deux disques en fonte formant obturateurs et reliés l'un à l'autre par un tirant en fer de 19 millim. de diamètre taraudé à ses bouts (diamètre au fond des filets, 16 millim.); du côté du foyer, le disque était vissé à demeure sur le tirant; dans la boîte à fumée, le disque était amovible et appliqué sur la plaque tubulaire par un écrou que l'on vissait sur le tirant à l'aide d'un tourne-à-gauche à deux bras dont chaque bras avait 0m,50 de long. En supposant au métal du tirant une résistance élastique de 18 kg., il suffisait d'un moment de torsion de 14 kg. × 1 m. pour dépasser la limite d'élasticité à la périphérie.	Après un nettoyage de la chaudière, le tirant à obturateurs avait été remis en place, le 30 octobre, dans les conditions habituelles; le lendemain matin, un quart d'heure après la mise en feu et alors que le manomètre marquait 4 kg., le tirant se rompt dans le filetage au ras de la face intérieure de l'obturateur, côté du foyer. Jet violent d'eau et de vapeur à travers le foyer. Le fer du tirant était de qualité offrant 39 kg. de résistance à la rupture et 19 p. 100 d'allongement, mais l'examen de la cassure montrait que la partie centrale (1/5 de la section) avait seule cédé sous un effort de traction; tout le reste de la rupture (4/5) provenait d'efforts de torsion.	Chauffeur brûlé très grièvement.	Rupture d'un tirant qui reliait entre eux deux disques de fonte faisant office de tampons de nettoyage non autoclaves sur les plaques tubulaires de la chaudière. Ce tirant s'est rompu dans un de ses filetages terminaux, après s'être fissuré sous l'action du tourne-à-gauche à grand bras de levier qui servait à serrer les joints de ces tampons.
1er nov.	Chemin de fer funiculaire au Havre (Seine-Inférieure).	Chaudière du système Belleville, comprenant six éléments de 16 tubes bouilleurs (diamètre, 0m,072; longueur, 1m,50) et un épurateur supérieur de 0m,35 de diamètre et 1m,455 de longueur. Capacité, 0mc,735. Timbre, 15 kg. Construction, 1890. En juillet 1892, on avait adapté aux tubulures par lesquelles les éléments débouchent dans l'épurateur, des rehausses de 35 millim., en vue de diminuer les entraînements d'eau. Depuis lors, les tubulures des deux premiers éléments à droite avaient tendance à s'entartrer.	Les deux tubes inférieurs de l'élément de droite se sont avariés, l'un en se gonflant et s'ouvrant sur 0m,11 de longueur avec bâillement de 20 millim. (dans la région arrière), l'autre, en se fissurant sur une partie seulement de l'épaisseur du métal, suivant une ligne de 0m,05 de long. Les tubes étaient propres; mais la tubulure par laquelle cet élément débouche dans l'épurateur a été trouvée complètement obstruée par les dépôts calcaires. Les portes de foyer et de boîte à tubes étaient [illegible]	Néant.	Manque d'eau dans l'élément de droite, par suite de l'obstruction, par un dépôt calcaire, de la tubulure supérieure qui pénètre dans l'épurateur.
2 nov.	Atelier de construction mécanique à Oran (Algérie).	Appareil de [illegible] horizontale à foyer à T tubulaire à flamme [illegible] dont le corps horizontal avait [illegible] de diamètre. Capacité, 500 litres. Surface de chauffe, 5m,65. Timbre, 5 kg. Troisième catégorie. Âge et origine inconnus; appareil acheté d'occasion en 1891. Des éprouvettes découpées après l'explosion dans les tôles rompues ont donné de 14k,8 à 18k,4 de résistance élastique; de 27k,4 à 35k,2 de résistance à la rupture; de 1,4 à 6,6 p. 100 d'allongement; métal feuilleté par endroits. D'autre part, la tôle portait des corrosions en cupules, et son épaisseur (primitivement 7 millim.) était réduite à 5,4 et même 3mm,5.	[illegible] machine [illegible] foyer [illegible] neuf heures et demie, lut, vers dix heures et demie, 2 kg. au manomètre, et renonçant à mettre la machine en marche à ce moment, parce qu'il n'avait pas de provision de combustible, quitta l'atelier vers onze heures, en abandonnant la chaudière à elle-même, après avoir, dit-il, jeté quelques pelletées de cendre sur le foyer. Une heure après, violente explosion; la virole du corps cylindrique contiguë à la boîte à fumée se divise en six lambeaux par des déchirures en pleine tôle. Projection des débris et déplacement du reste de la chaudière d'un côté à l'autre de l'atelier.	[illegible] le mot [illegible] étant désert.	[illegible] donné à lui-même avec du feu sur la grille pendant une heure ou davantage, peuvent suffire à expliquer l'accident.
9 nov.	Bateau à vapeur, près Ste-Catherine (Morbihan).	Chaudière type Oriolle, comportant 16 rangées horizontales de tubes bouilleurs, de 48 millim. de diamètre intérieur et 3 millim. d'épaisseur primitive. L'eau s'élevait normalement jusqu'à couvrir la treizième rangée. Rapport de la surface de grille à la surface de chauffe mouillée, 1/53. La machine était munie d'un condenseur par surface. On avait nettoyé le collecteur deux mois avant l'accident, mais le dernier nettoyage des tubes bouilleurs remontait à dix-huit mois.	Déchirure d'un tube de la quatorzième rangée (la plus chauffée parmi celles qui étaient normalement hors de l'eau) sur 0m,14 de longueur, avec bâillement de 0m,07, au moment où le mécanicien, voyant la chaudière en pleine pression, venait d'ouvrir les portes du foyer; irruption des fluides brûlants par cette issue toute prête. Le tube crevé présentait une région d'amincissement tel, que sur les bords de la plaie l'épaisseur n'était que 1/10 de millimètre; ce tube et ses voisins, très amincis aussi, étaient tapissés d'une couche de graisse dont l'épaisseur maximum a été évaluée à 2 millim.	Le mécanicien et le chauffeur brûlés, dont l'un grièvement.	Surchauffe du métal d'un tube bouilleur placé immédiatement au-dessus du niveau normal de l'eau. Cette surchauffe était le résultat des dispositions de la chaudière et de la présence d'un dépôt graisseux qui s'était formé à l'intérieur du tube, non nettoyé depuis dix-huit mois. Elle avait amené progressivement une usure qui avait aminci ce tube et ses voisins au point de rendre imminente la rupture qui s'est produite.
18 nov.	Chemin de fer à Courbessac (Gard).	Chaudière de locomotive, de 1mc,2 de capacité et de 10mq,27 de surface de chauffe. Construction, 1883. Dernière épreuve, novembre 1891. Présentait au bas de sa plaque tubulaire de boîte à fumée un orifice de vidange elliptique, de 78 × 55 millim., fermé par un bouchon métallique de 90 × 68 millim., non point autoclave, mais appliqué sur la face extérieure de la plaque par un boulon à ancre dont le diamètre en dehors du filetage était de 25 millim.	Le mécanicien, nettoyant sa machine, donnait de légers coups de marteau sur la boîte à fumée pour faire tomber de la suie, quand le boulon se rompit dans le filetage, au ras de la rondelle d'appui de l'écrou. La section était affectée d'une fissure antérieure s'étendant sur un peu plus d'un tiers de la section. Jet violent d'eau et de vapeur dans la boîte à fumée.	Le mécanicien brûlé assez grièvement.	Fissure préexistante qui s'était développée dans la partie filetée du boulon à ancre servant à maintenir le bouchon sur son siège (inconvénient de la fermeture non autoclave).

DATE de l'accident	NATURE et situation de l'établissement où l'appareil était placé	NATURE forme et destination de l'appareil — Détails divers	CIRCONSTANCES de l'accident	CONSÉQUENCES de l'accident	CAUSE PRÉSUMÉE de l'accident
23 nov.	Atelier de construction mécanique à Marseille (Bouches-du-Rhône).	Chaudière horizontale à foyer extérieur, semi-tubulaire. Corps cylindrique de 1m,30 de diamètre, portant à sa partie supérieure un dôme vertical et un trou d'homme à cadre en fonte. Capacité, 3mc,200. Timbre, 7 kg. Construction en 1890; mise en service au milieu de 1891. Il a été constaté après l'explosion que les tôles du corps cylindrique offraient, avec des résistances à la rupture variant de 28kg,2 à 33kg,6, des allongements très faibles : 6 et 2,25 p. 100 (en long et en travers) pour la tôle inférieure, 5 et 1,5 pour la tôle supérieure d'avant, 1,5 et 0,5 pour celle d'arrière. Clouures longitudinales simples, à trous de 0m,023, espacés d'axe en axe de 0m,055.	Une fuite s'étant produite à la clouure longitudinale droite du corps cylindrique, 8 rivets y avaient été remplacés en septembre 1892; une nouvelle fuite s'était ensuite déclarée à cette clouure, près d'autres rivets. Le feu de la chaudière avait été activé en vue de l'essai d'une machine, mais une pression de 6 kg. venait d'être lue au manomètre, quand la clouure ci-dessus se déchira tout entière le long de la ligne des rivets. Déroulement du corps de chaudière et ruptures diverses par les lignes de moindre résistance. La chaudière a été projetée à 2m,50; un tube à fumée et les débris du fourneau ont été dispersés au loin, jusqu'à 150 mètres de distance.	Cinq personnes blessées, dont une grièvement. Importants dégâts matériels.	Déchirure du corps cylindrique de la chaudière le long de la rivure longitudinale de droite, conséquence de de la qualité défectueuse de la tôle et peut-être aussi de l'imperfection de la rivure.
25 nov.	Teinturerie à Clichy (Seine).	Tambour à apprêter les étoffes, de 0m,80 de diamètre et 1m,40 de longueur. Virole cylindrique en cuivre formée d'une tôle de 2mm,5 réunie à elle-même par brasure le long d'une génératrice et comprise entre deux plateaux terminaux en fonte, que des tirants reliaient l'un à l'autre à l'intérieur du tambour. Timbre, 2 kg. Construction suivie d'épreuve, le 9 septembre 1892. Vapeur fournie par une chaudière timbrée à 6 kg., qui fonctionnait à 3kg,5 lors de l'accident; aucune soupape interposée.	Déroulement d'une partie de la tôle cylindrique; l'ouverture initiale s'est faite suivant l'assemblage brasé, qui paraît avoir présenté une fissure préexistante; elle a suivi cette ligne sur 0m,50, puis s'est bifurquée et propagée en pleine tôle.	Néant.	La pression à laquelle l'appareil a été soumis a excédé la résistance du cylindre, qui était simplement brasé, au lieu d'être rivé comme la résistance l'eût exigé, et qui, en outre, dans l'espèce, était affaibli vraisemblablement par une fissure préexistante ayant peut-être son origine dans un défaut datant de la construction.
4 déc.	Fabrique de colles et engrais, à Ivry (Seine).	Récipient cylindrique vertical en tôle de fer, de 1m,75 de diamètre et 2m,60 de hauteur. Cet appareil, timbré à 2 kg., avait été constitué en 1891 en réunissant les parties les moins usées de deux [illegible]	Une cuisson de matières devait avoir lieu vers 3 heures du matin; les deux ouvriers du poste de nuit chargés de ce travail, pour avancer leur service, chargèrent le récipient [illegible]	Un ouvrier brûlé grièvement.	L'explosion a été vraisemblablement provoquée par un excès de pression, s'exerçant d'ailleurs sur un appa[illegible]

[illegible] d'une batterie de générateurs timbrés à 8 kg. Il portait une soupape de 0m,04 et un manomètre, et servait à cuire des matières animales sous une pression de 1kg,5. Ses tôles étaient, par rapport à leur épaisseur primitive de 12 millim., fortement corrodées et amincies; le long de la ligne la plus affaiblie mise à jour par l'explosion, l'épaisseur *moyenne* était 3mm,6. La soupape était sujette à se coller sur son siège par suite de la nature des matières traitées.

[illegible] l'explosion. Il suivait la conduite d'une batterie de 65 mètres de longueur, [illegible] terrompit avant la fermeture du récipient. Le chargement terminé, les deux ouvriers abandonnèrent l'appareil à lui-même, pensant qu'il ne recevrait aucune vapeur. Soit qu'ils eussent imparfaitement fermé la vanne avant de clore le récipient, soit que la vanne fût mal étanche, l'appareil, vers 2 heures du matin, fit explosion en se déchirant en plusieurs fragments. La pression aux chaudières devait être environ 6kg,5.

12 déc.	Station centrale d'électricité à Paris.	Chaudière type Babcock et Wilcox, comprenant douze éléments de chacun neuf tubes bouilleurs de 100 millim. de diamètre et 5m,486 de longueur, avec deux réservoirs supérieurs d'eau et de vapeur juxtaposés. Capacité, 14 mètres cubes. Timbre, 12 kg. L'appareil possède deux tubes indicateurs du niveau de l'eau et un flotteur à cadran système Chaudré. Ce dernier appareil ne fonctionnait pas. Les tubes de verre avaient des montures métalliques qui ne tenaient pas les garnitures suffisamment à l'écart des extrémités du tube, et les garnitures étaient des bagues de caoutchouc sujettes à se ramollir par la chaleur.	Déchirure d'un des tubes de la rangée inférieure sur 0m,30 de longueur, avec 0m,20 de bâillement maximum, du côté regardant le feu. Vaste coup de feu au bas du générateur: colorations bleues aux tubes inférieurs, rouges au-dessus. Le démontage des tubes de verre a montré que l'un et l'autre étaient bouchés à leur partie inférieure par le caoutchouc de la garniture.	Un chauffeur, brûlé, sans grande gravité.	Surchauffe par suite d'un défaut d'alimentation, consécutif au mauvais état de tous les appareils indicateurs du niveau de l'eau. En particulier, les tubes indicateurs en verre étaient l'un et l'autre bouchés à la base, le caoutchouc de la garniture, trop altérable par la chaleur et insuffisamment isolé de l'extrémité du tube par la monture métallique, ayant fait expansion au-dessous de cette extrémité.
30 déc.	Blanchisserie à Darnétal (Seine-Inférieure).	Récipient cylindrique vertical (citadelle) en tôle de fer, de 2m,20 de diamètre, 3 mètres de hauteur, 12mc,585 de capacité, ayant un fond inférieur entièrement plat, sauf l'embouti du pourtour. Ce fond était composé de plusieurs panneaux assemblés par rivures, en tôles dont les épaisseurs variaient de 8 à 12 millim. et dont la qualité laissait à désirer; il était sans aucune armature. Construction première en 1865; réparation en 1891. Timbre, 2 kg. Le bain des tissus à blanchir y était chauffé par un serpentin percé de trous recevant la vapeur de chaudières timbrées à 6 kg. Pression de fonctionnement normal, 0kg,75 à 1 kg. Sur l'appareil, une soupape chargée pour 1kg,6.	Explosion survenue pendant le poste de nuit. L'ouvrier préposé déclare que, dix minutes auparavant, le manomètre marquait 0kg,75. Fragmentation du fond plat qui se divisa en trois morceaux : partie suivant les rivures, partie par déchirure en pleine tôle. Projections à des distances diverses, jusqu'à 56 mètres. (A rapprocher de l'explosion d'appareil analogue, survenue le 27 février 1889). (*Annales des mines*, 8e s., t. XVIII, p. 609).	Dégâts matériels importants.	Cette explosion a sa cause essentielle dans la forme et la constitution vicieuses de l'appareil.

RÉSUMÉ

RÉPARTITION DES ACCIDENTS

DÉSIGNATION	NOMBRE	TUÉS	BLESSÉS (*)
I. — Par nature d'établissements :			
1° Établissements placés à terre :			
Mines. — Mines de houille	3	1	1
Usines métallurgiques. — Fonderie et forges	1	»	1
Usines métallurgiques. — Construction mécanique	2	»	1
Agriculture. — Battages et préparation des grains	2	2 (**)	1
Industries alimentaires. — Brasserie	2	»	»
Industries alimentaires. — Fabrique de levures et d'alcool de grains	1	2	»
Industrie chimique. — Fabrique de colles et engrais	1	»	1
Tissus et vêtements. — Tissage de coton	2	»	»
Tissus et vêtements. — Filature de ramie	1	»	»
Tissus et vêtements. — Filature	1	2	»
Tissus et vêtements. — Blanchisserie, teinturerie	2	»	»
Papeterie, objets mobiliers, instruments. — Confection de chaussures	1	»	1
Papeterie, objets mobiliers, instruments. — Papeterie	2	1	»
Papeterie, objets mobiliers, instruments. — Charronnerie	1	»	1
Entreprises de travaux et diverses. — Entrepôt	1	2	1
Entreprises de travaux et diverses. — Scierie et préparation des bois	2	3	4
Entreprises de travaux et diverses. — Usines d'électricité	3	»	2
Chemins de fer. — Installation fixe (traction funiculaire)	1	»	»
Chemins de fer. — Locomotive	1	»	1
2° Bateaux et installations flottantes :			
Bateaux. — Chaudière motrice	1	»	1
Bateaux. — Chaudière de treuils	1	1	»
Totaux	32	14	16
II. — Par espèces d'appareils :			
1° Chaudières chauffées en tout ou en partie à l'extérieur :			
Horizontales non tubulaires (à foyer extérieur)	6	»	1
Horizontales semi-tubulaires (à foyer extérieur)	1	»	1
A petits tubes bouilleurs (***)	7	3	3
2° Chaudières non chauffées à l'extérieur :			
Locomobiles. — horizontales à flamme directe	3	5 (**)	6
Locomobiles. — verticales	2	3	1
Locomotive	1	»	1
Etablies à demeure (horizontales à flamme directe)	3	»	2
3° Annexes des chaudières :			
Réchauffeurs	2	»	»
4° Récipients	7	3	1
Totaux	32	14	16

(*) Ayant eu plus de vingt jours d'incapacité de travail. Pour les blessures moins graves, voir le bulletin détaillé, qui mentionne tous les blessés signalés par l'enquête administrative.

(**) Dont un vieillard qui, saisi de peur à la vue d'une explosion, est mort subitement.

(***) Pour l'une d'elles (1er avril) la partie rompue a été un tuyau de communication extérieure entre la chaudière et son réservoir de vapeur.

III. — D'après les causes présumées résultant de l'étude des dossiers administratifs.

1° Conditions défectueuses d'établissement :

Dispositions vicieuses.	Récipients de solidité insuffisante	3	12
	Cadre en fonte offrant de mauvaises conditions de résistance	1	
	Couvercle de récipient insuffisamment stable (boulons à rotation)	1	
	Bouchons ou tampons non autoclaves	3	
	Formes vicieuses (foyers elliptiques, etc.)	2	
	Dispositions favorisant la surchauffe	1	
	Réchauffeur non garanti contre l'excès de pression hydraulique	1	
Matériaux mauvais ou mauvaise fabrication. — Mauvaise tôle et peut-être rivure imparfaite		1	
Total			13

2° Conditions défectueuses d'entretien :

Corrosions	extérieures	2	8
	intérieures	3	
	d'un ciel de foyer	1	
	d'un tube à fumée	1	
	d'un tuyau de communication extérieur	1	
Surchauffe par l'effet des dépôts	agissant directement	2	3
	produisant une obstruction, d'où manque d'eau local	1	
Affaiblissement d'une face plane aggravé par une élévation de timbre		1	
Usure extérieure d'un récipient		1	
Usure du filetage d'un boulon (tampon non autoclave)		1	
Réparation mal faite favorisant la surchauffe		1	
Total			15

3° Mauvais emploi des appareils :

Manque d'eau	provenant de l'obstruction des tubes de verre à leur base par le caoutchouc de la garniture	2	3
	provenant d'autres causes	1	
Excès de pression		2	
Serrages exagérés d'un écrou de tirant (tampon non autoclave)		1	
Manœuvres dangereuses		2	
Total			8

4° Causes non précisées :

Mauvaise constitution ou mauvais état d'un assemblage de tôle sur fonte	1	
Coups de feu dont les causes sont imparfaitement définies	2	
Peut-être usure, mauvaise qualité de la tôle d'une chaudière, et abandon de l'appareil sous pression	1	
Total	4	

Total général : 40

REMARQUES. — Le nombre total des causes présumées est ainsi égal à 40 pour 32 accidents, parce que, dans 8 cas, l'accident a paru provenir de deux causes, savoir : 1° corrosion intérieure et réparation mal faite favorisant la surchauffe (30 janvier); 2° réchauffeur non garanti contre l'excès de la pression hydraulique et fausse manœuvre ayant amené cet excès de pression (10 mars); 3° bouchon non autoclave et usure du filetage du boulon destiné à le tenir sur son siège (26 juin); 4° formes vicieuses et affaiblissement d'une face plane aggravé par une élévation de timbre (5 septembre); 5° forme vicieuse et corrosion d'un ciel de foyer (22 septembre); 6° récipient de solidité insuffisante et usure de sa surface extérieure (3 octobre); 7° tampon non autoclave et serrage exagéré de l'écrou de son tirant (31 octobre); 8° dispositions d'appareil et dépôt graisseux amenant la surchauffe et par suite l'usure d'un tube de chaudière à petits éléments (9 novembre).

En dehors des accidents de chaudières à vapeur et de récipients de vapeur soumis à l'obligation de l'épreuve, il convient de mentionner un grave accident de machine survenu le 24 juin 1892 à bord d'un paquebot, où la rupture d'un conduit coudé en fonte à section rectangulaire, par où la vapeur passait du cylindre moyen (exceptionnellement devenu cylindre de haute pression) au grand cylindre, a fait quatre morts et plusieurs blessés dont un grièvement (tous brûlés).

BULLETIN.

ACTES DE COURAGE ET DE DÉVOUEMENT.

ACCIDENTS ARRIVÉS DANS LES MINES ET CARRIÈRES.

Extrait des rapports du ministre de l'intérieur, approuvés par le Président de la République en 1893 (*).

NOMS, prénoms et qualités.	LIEUX et dates.	ANALYSE des faits.	RÉCOMPENSES décernées. MÉDAILLES en or.	MÉDAILLES en argent.	MENTIONS honorables.
27 février 1893.					
		GARD.		classes.	
AUDOYER (Louis), maître mineur.	Mines de houille des Salles-de-Gagnières. (11 août 1892.)	Se sont tout particulièrement distingués en portant secours aux victimes d'un accident survenu aux mines de houille des Salles-de-Gagnières. Le chef de poste Cazenave est déjà titulaire de la médaille en argent de 2e classe.		2e	Mention honorable.
GALDIN (Léon), ouvrier mineur.				1re	Id.
RÉDARÈS (Léopold), ouvrier mineur.					Id.
MATHIEU (Ambroise), id.					Lettre de félicitations.
MEYSSONNIER (Etienne), receveur.					Id.
CAZENAVE (Martial), chef de poste.					Id.
CHALLIER (Félix), ouvrier mineur.					Id.
JOSSEAU (Eugène), id.					Id.
CHANTEY (Benoît), id.					Id.

(*) Cet état fait suite à celui qui a été publié dans le 2e volume de 1892, p. 712.

NOMS, prénoms et qualités.	LIEUX et dates.	ANALYSE des faits.	RÉCOMPENSES décernées. MÉDAILLES en or.	MÉDAILLES en argent.	MENTIONS honorables.
29 mai 1893.					
		LOIRE.		classes.	
DE CURIÈRES DE CASTELNAU, Ingénieur en chef des mines.	Mines du Treuil. (Puits de la Manufacture.) (6 décembre 1891.)	Ont fait preuve d'un courage et d'un dévouement exceptionnels en portant secours aux victimes de la catastrophe du puits de la Manufacture, survenue le 6 décembre 1891. L'agent Cote est déjà titulaire d'une médaille en argent de 2e classe.			Citation à l'ordre du Corps national des Mines (*).
TAUZIN, Ingén. des mines.					Id.
COSTE, id.					Id.
TERMIER, Ingén. des mines.					Lettre de félicitations.
SOULAGES, contr. des mines.					Id.
LAVILLE, id.					Id.
PORTAL, id.					Id.
VINCENT, id.					Id.
CABASSUT, élève à l'École des mines de St-Étienne.					Id.
MORCHOINE, id.					Id.
PETIT (Emile), id.					Id.
ROUCHON, id.					Id.
LÉPINE, préfet de la Loire.				2e	
COTE (Jean-Baptiste), réparationnaire au puits de la Manufacture.				1re	
RAVON (Mathieu), gouverneur au puits de la Pompe.				2	
GIDROL (Jean), id.				2e	
CELLE (Pierre), piqueur au puits de la Pompe.				2e	
FOUILLOUX (Pierre), id.				2e	
BEURET (Edouard), id.				2e	
BORNE (Jean-Marie), id.				2e	Mention honorable.
BLANC (Jean-Marie), sous-gouverneur au puits de la Pompe.					Id.
VILLON (Pierre), id.					Id.
FRAPPA (Jean), id.					Id.
BESSENET (Pierre), piqueur au même puits.					Id.
MANEVAL (Pierre), clocheur de nuit aux Mottetières.					Id.
TEYSSIER (Jean-Marie), ouvrier à la manufacture d'armes.					Id.
ARGAND (J.-D.), boiseur.					Id.
JOLY (Mathieu), boiseur.					Id.
DURAND (Jean), fréiuteur.					Id.

(*) V. *Annales des mines, partie administrative*, vol. de 1893, p. 351.

NOMS, prénoms et qualités.	LIEUX et dates.	ANALYSE des faits.	RÉCOMPENSES décernées. MÉDAILLES en or.	MÉDAILLES en argent.	MENTIONS honorables.
24 juin 1893.					
EURE-ET-LOIR.					
JANET, Ingénieur des mines.	Châtillon-en-Dunois. (26 janvier 1893.)	Se sont particulièrement signalés en coopérant au sauvetage de six ouvriers bloqués dans une marnière, à 22 mètres de profondeur.			Citation à l'ordre du Corps national des Mines (*). Lettre de félicitations.
KELLER, Ingénieur en chef des mines.				1re	
LEGUAY (Jacques-Louis), ancien marneron.				1re	
CHARRIER (Désiré-Alexandre), puisatier.				2e	
HAMON, contrôleur des mines.				2e	
BRETON (François-Désiré), ancien marneron.					Mention honorable.
MARÉ (Léopold-Lucien), puisatier.					Id.
TOUTIN (Charles-François), puisatier.					Id.
LOREAU (Alexandre), puisatier.					Id.
MESLAGE (Joseph-Hippolyte), marneron.					
28 décembre 1893.					
PAS-DE-CALAIS.					
FLEURY (Auguste), porion aux mines de Bully-Grenay.	Mines de Bully-Grenay. (24 juin 1893.)	A fait preuve de courage et de dévouement en sauvant, au péril de sa vie, un ouvrier mineur enseveli sous un éboulement.		2e	

(*) V. *Annales des mines, partie administrative*, vol. de 1893, p. 392.

BIBLIOGRAPHIE

DEUXIÈME SEMESTRE DE 1893 (*).

OUVRAGES FRANÇAIS.

1° *Mathématiques et Mécanique pures.*

AURIC (A.). — Les Équations linéaires et leurs applications (thèse). In-4°, 87 p. Paris, Gauthier-Villars et fils. (7297)

FLEURY (H.). — L'Analyse infinitésimale sans limites ni infiniment petits. In-8°, 40 p. Paris, les librairies scientifiques. (10088)

HATON DE LA GOUPILLIÈRE. — La Géométrie des masses. In-8°, 16 p. Paris, G. Carré. (Extr. de la *Revue générale des sciences pures et appliquées*.) (7600)

HATT (P.). — Des coordonnées rectangulaires et de leur emploi dans les calculs de triangulation. In-4°, VII-190 p. avec fig. Paris, les lib. chargés de la vente des publications du Service hydrographique de a marine. 5 fr. (12211)

JABLONSKI (E.). — Démonstration nouvelle du théorème de d'Alembert. In-8°, 4 p. Angers, imp. Burdin et Cie. (Extr. du *Bulletin scientifique*.) (9037)

KLUMPKE (Mlle D.). — Contribution à l'étude des anneaux de Saturne (thèse). In-4°, 70 p. avec fig. Paris, Gauthier-Villars et fils. (12756)

LAURENT (H.). — Théorie des jeux de hasard. In-16, 176 p. Paris, Gauthier-Villars et fils; G. Masson. 2f,50 (10374)

(*) Les numéros qui figurent à la suite de chaque ouvrage sont ceux sous lesquels ces ouvrages sont respectivement inscrits dans la Bibliographie française et dans les Bibliographies étrangères.

Le Vavasseur (R.). — Sur le système d'équations aux dérivées partielles simultanées auxquelles satisfait la série hypergéométrique à deux variables F $(\alpha, \beta, \beta', \gamma; x, y)$ (thèse). In-4°, 211 p. avec fig. Paris, Gauthier-Villars et fils. (14479)

Méray (C.). — Sur la discussion et la classification des surfaces du deuxième degré. In-8°, 36 p. Paris, imp. Gauthier-Villars et fils. 1f,25. (Extr. des *Nouv. Ann. de mathématiques.*) (11075)

Poirier (A.-L.). — La solution vraie, cherchée sans succès depuis deux mille ans ! donnée à la quadrature du cercle, c'est-à-dire le moyen de trouver au cercle son carré équivalent. In-4°, 12 p. avec fig. Le Havre, imp. Murer. (9155)

Quiquet. — Représentation algébrique des tables de survie. Généralisation des lois de Gompertz, de Makeham, etc. 2e édition. In-8°, 60 p. Paris, Warnier et Ce. 4 fr. (13127)

Rayet (G.). — Note sur l'élimination de l'erreur d'excentricité des cercles gradués. In-8°, 7 p. Bordeaux, imp. Gounouilhou. (Extr. des *Mém. de la Soc. des sciences physiques et naturelles de Bordeaux.*) (13522)

Schœnflies (A.). — La Géométrie du mouvement. Exposé synthétique; par le docteur *Arthur Schœnflies*, professeur à l'Université de Göttingen. Traduit de l'allemand par *Ch. Speckel*, capitaine du génie. Édition revue et augmentée par l'auteur, suivie de Notions géométriques sur les complexes et les congruences de droites, par *G. Fouret*, examinateur d'admission à l'École polytechnique. In-8°, VII-293 p. avec fig. Paris, Gauthier-Villars et fils. 6f,50. (10243)

Duport (H.). — Recherches sur les équations aux dérivées partielles. In-8°, 6 p. Dijon, imp. Darantière. (Extr. de la *Revue bourguignonne de l'enseignement supérieur*). (12984)

Serret (J.-A.). — Cours de calcul différentiel et intégral. 4e édition, augmentée d'une Note sur la théorie des fonctions elliptiques, par M. *Ch. Hermite*. 2 vol. in-8°. T. 1er : Calcul différentiel, XIII-618 p.; t. 2 : Calcul intégral, XIII-904 p. Paris, Gauthier-Villars et fils. 25 fr. (12839)

Tables de logarithmes à cinq décimales pour les nombres de 1 à 10.000 et pour les fonctions trigonométriques de minute en minute; par les Frères des écoles chrétiennes. Edition stéréotype. In-18 jésus, VIII-148 p. Tours, Mame et fils; Paris, Poussielgue. (12587)

Tisserand (F.). — Traité de mécanique céleste. T. 3 : exposé de l'ensemble des théories relatives au mouvement de la lune. In-4°, IX-427 p. Paris, Gauthier-Villars et fils. 22 fr. (12053)

2° Physique et Chimie.

Anthoine (H.). — De l'eucalyptéol ou bichlorhydrate d'eucalyptène (dérivé cristallisé de l'essence d'eucalyptus). In-12, 12 pages. Paris, imp. Hennuyer. (6282)

Bovet (C.). — Appareil et Procédé nouveau pour le dosage de l'acide carbonique dans les eaux minérales gazeuses. In-8°, 7 p. Clermont (Oise), imp. Daix frères. (8555)

Brunot (C.). — Les illusions d'optique. In-8°, 8 pages avec fig. Paris, 111, boulevard Saint-Germain. (Extr. de la *Revue scientifique.*) (10896)

Causse (H.-E.). — Action des aldéhydes sur les phénols polyvalents; Acétals aromatiques (thèse). In-4°, 30 p. Paris, Gauthier-Villars et fils. (11029)

Denigès (G.). — Recherche rapide de l'étain par la solution molybdosulfurique, suivi de : Recherche microchimique de l'iode. In-8°, 7 p. Bordeaux, imp. Gounouilhou. (Extr. du *Bull des travaux de la Soc. de pharmacie de Bordeaux.*) (13274)

—— Recherches chimiques et pharmacologiques sur la salicylamide. In-8°, 18 p. Bordeaux, imp. Gounouilhou. (Extr. du même recueil.) (13275)

Deuxième supplément au Dictionnaire de chimie pure et appliquée d'*Ad. Wurtz*, publié sous la direction de *Ch. Friedel*, professeur à la Faculté des sciences de Paris, avec la collaboration de MM. P. Adam, A. Béhal, G. de Bechi, A. Bigot, L. Bourgeois, L. Bouveault, E. Burcker, C. Chabrié, P.-T. Clève, Ch. Cloëz, A. Combes, C. Combes, A. Etard, Ad. Fauconnier, H. Gall, A. Gautier, H. Gautier, E. Grimaux, G. Griner, etc., etc. Fascicule 17. In-8° à 2 col., p. 1281 à 1360. Paris, Hachette et Ce. (6818)

—— —— Fascicule 18. In-8° à 2 col., p. 1361 à 1440. Paris, Hachette et Ce. 2 fr. (10915)

Duponchel (A.). — La Circulation des vents et de la pluie dans l'atmosphère. In-8°, 115 p. avec fig. Paris, Baudoin. (Extr. de la *Revue maritime et coloniale*). (9297)

Encyclopédie chimique, publiée sous la direction de M. Fremy, de l'Institut. T. 4 : Analyse chimique. Analyse qualitative microchimique; par M. *T.-H. Behrens*, professeur à l'École polytechnique de Delft. Avec la collaboration de M. *Léon Bourgeois*, répétiteur à l'École polytechnique. In-8°, VII-169 p. avec fig. Paris, Ve Dunod. 6f,25. (11203)

FAVREL (G.). — Dosage volumétrique de l'acide pyrophosphorique et des pyrophosphates alcalins. In-8°, 3 p. Bordeaux, imp. Gounouilhou. (Extr. du *Bull. des travaux de la Soc. de pharmacie de Bordeaux.*) (12995)

FONZES (H.). — Recherches sur la solubilité de quelques sels halogènes dans une série de dissolvants neutres (thèse). In-8°, 39 p. et planches. Montpellier, imp. Boëhem. (12434)

GASSELIN (V.). — Action du fluorure de bore sur quelques composés organiques (thèse). In-8°, 84 pages. Gauthier-Villars et fils. (11675)

GAUBE (J.). — Chimie minérale des corps organisés. Sol animal. In-8°, 19 p. Paris, Asselin et Houzeau. (10780)

GUIRAUD (F.). — Le Gaz oxygène, sa préparation industrielle, son mode d'emploi, ses applications médicales. In-8°, 7 p. Bordeaux, imp. Gounouilhou. (Extr. du *Bull. des travaux de la Soc. de pharmacie de Bordeaux.*) (9015)

ISSALY. — Optique géométrique. Cinquième mémoire. Théorie mathématique nouvelle de la polarisation rectiligne des principaux agents physiques et spécialement de la lumière. In-8°, 66 p. Bordeaux, imp. Gounouilhou. (Extr. des *Mém. de la Soc. des sc. physiques et nat. de Bordeaux.*) (13365)

LASSAR COHN. — Méthodes de travail pour les laboratoires de chimie organique; par le docteur *Lassar Cohn*, professeur de chimie à l'Université de Kœnigsberg. Traduit de l'allemand par *E. Ackermann*, ingénieur civil des mines. In-18, x-373 p. Paris, Baudry et Ce. (5866)

LATARCHE (C.). — Pyromètre actinométrique. In-8°, 14 p. Paris, Baudry et Ce. (11971)

LEFÈVRE (J.). — Recherches sur les diélectriques (thèse). In-4°, 83 pages. Nantes, imp. Grimaud. (9581)

LENOBLE. — Considérations théoriques sur la fabrication de l'éther. In-8°, 6 p. Lille, imp. Danel. (*Société industrielle du nord de la France.*) (10381)

LESCŒUR (H.). — Sur la préparation de l'acide chlorhydrique pur. In-8°, 8 p. Lille, imp. Danel. (*Société industrielle du nord de la France.*) (6656)

LUCAS (F.). — Transformation des courants continus en courants alternatifs. In-4°, 12 p. avec fig. Paris, G. Carré. (9904)

MARIE (T.). — Recherches sur le pouvoir rotatoire de la caséine en solutions salines neutres (thèse). In-4°, 68 p. Toulouse, imp. Marquès et Ce. (10164)

MASSOL (G.). — Étude thermique des acides organiques et plus particulièrement des acides de la série oxalique; Influence de l'isomérie; Influence de la fonction alcool (thèse). In-4°, 91 pages. Paris, Gauthier-Villars et fils. (7453)

MESLIN (G.). — Sur de nouvelles franges d'interférence rigoureusement achromatiques. In-8°, 28 p. et planches. Montpellier, imp. Boëhm. (Extr. des *Mém. de l'Acad. des sciences et lettres de Montpellier.*) (13438)

MORIDE (E.). — Étude sur l'aéromètre de Baumé. In-8°, 15 pages. Marseille, imp. Barlatier et Berthelet. (Extr. du *Bull. de la Soc. scient. industrielle de Marseille.*) (9384)

MOULIN (F.). — Recherches sur la solubilité de quelques tartrates et sur les densités de solutions étendues (thèse). In-4°, 50 p. et planches. Montpellier, imp. Boëhm. (7180)

MOUREU (C.). — Contribution à l'étude de l'acide acrylique et de ses dérivés (thèse). In-8°, 73 pages. Paris, Gauthier-Villars et fils. (11078)

MULLER (P.-T.). — Étude de quelques dérivés des éthers cyanacétiques (thèse). In-4°, 92 p. Paris, Gauthier-Villars et fils. (7462)

POINCARÉ (H.). — Théorie des tourbillons. Leçons professées pendant le deuxième semestre 1891-1892 par *H. Poincaré*, membre de l'Institut. Rédigées par M. *Lamotte*, licencié ès sciences. In-8°, 215 p. avec fig. Paris, G. Carré. (7697)

POULENC (C.). — Contribution à l'étude des fluorures anhydres et cristallisés (thèse). In-4°, 75 p. Paris, Gauthier-Villars et fils. (11090)

SAINT-ELLIER (D.-L. DE). — L'Ordre du monde physique et sa cause première, d'après la science moderne. 2e édition, complétée par de nouvelles études. Gr. in-8°, III-455 p. avec fig. et portraits. Paris, 8, rue François Ier. (12721)

VOYER (J.). — Théorie élémentaire des courants alternatifs. In-8°, 91 p. avec figures. Paris, G. Carré. (12873)

WAVELET (C.). — Dosage volumétrique des phosphates. Transformation au point de vue des liqueurs de titrage du procédé Joulie. In-8°, 24 pages. Lille, imp. Danel. (*Société industrielle du nord de la France.*) (9451)

3° *Minéralogie. — Géologie. — Paléontologie.*

AUBERT (F.). — Explication de la carte géologique provisoire de la Tunisie. In-8°, VII-92 pages. Paris, Barrère. (11875)

BABY (P.). — Études géologiques. Les Affouillements de Caraybat (Ariège), avec une carte générale, un plan et une coupe de Caraybat. In-8°, 21 p. Foix, imp. Gadrat aîné. (7998)

Barthélemy (F.). — Sur des molaires de mammouth trouvées à Nancy. In-8°, 3 p. Nancy, imp. Berger-Levrault et Cie. (9472)

Baye (de). — Le Congrès international d'anthropologie et d'archéologie préhistoriques de Moscou en 1892. In-8°, 26 p. Paris, Nilsson. (Extr. des *Mém. de la Soc. nat. des antiquaires de France.*) (8001)

Bel (J.-M.). — La Minéralogie d'après le docteur Th. Sterry Hunt. In-8°, 16 pages. Paris, 6, rue de la Chaussée-d'Antin. (Extr. du journal *le Génie civil.*) (11158)

Bertrand (M.). — Le Môle et les Collines de Faucigny (Haute-Savoie). In-8°, 49 p. avec fig. Paris et Liège, Baudry et Cie. (Extr. du *Bull. des services de la carte géol. de la France et des topographies souterraines.*) (8543)

Boule (M.) et P. Glangeaud. — Le *Callibrachion Gaudryi*, nouveau reptile fossile du permien d'Autun. In-8°, 19 p. avec fig. et planches. Autun, imp. Dejussieu. (Extr. du *Bull. de la Soc. d'hist. nat. d'Autun.*) (12920)

Carte géologique détaillée de la France au 1/80,000. Feuille 45 : Falaise. — Feuille 147 : Charolles. Avec notices explicatives. Paris, imp. Lemercier. (940)

—— Feuille 130 : la Roche-sur-Yon. — Feuille 141 : Fontenay. — Feuille 158 : Roanne. — Feuille 223 : Forcalquier. Avec notices explicatives. Paris, imp. Erhard. (1078)

—— N° 186 : le Puy. Paris, chromolith. Erhard. (1304)

—— Feuille 144 : Aigurande. — Feuille 186 : Le Puy. Avec notices explicatives. Paris, imp. Erhard frères. (1363)

—— Feuille 85 : Épinal. — Feuille 86 : Colmar. Avec notices explicatives. Paris, imp. Lemercier. (1364)

Carte géologique de la France au 1/320.000. N° 13 : Paris. Paris, imp. du ministère des travaux publics. (1303)

Debat (L.). et L. Régneux. — Le Monde avant le déluge. Un chêne géant antédiluvien; le Drysphore. In-8°, 16 p. et grav. Lyon, imp. Jevain. 0f,25. (10316)

Des Cloizeaux (A.). — Manuel de minéralogie. T. 2. 2e fascicule. In-8°, p. liii à lx et 209 à 544. Paris, Ve Dunod. (12416)

Études des gîtes minéraux de la France, publiées sous les auspices de M. le ministre des travaux publics, par le service des topographies souterraines. Bassin houiller et permien d'Autun et d'Épinac. Fascicule 2 : Flore fossile (première partie), par *R. Zeiller*, ingénieur en chef des mines. In-4°, 308 pages et atlas de 28 planches. Paris, Baudry et Cie (1890). (Ministère des travaux publics.) (7369)

Études des gîtes minéraux de la France. Bassin houiller et permien d'Autun et d'Épinac. Fascicule 5 : Poissons fossiles; par H.-E. Sauvage, directeur de la station aquicole de Boulogne-sur-Mer. In-4°, 38 p. et 9 planches. Paris, Imp. nationale. (Ministère des travaux publics.) (12992)

Exploration scientifique de la Tunisie. Description des Brachiopodes, Bryozoaires et autres invertébrés fossiles des terrains crétacés de la région sud des hauts plateaux de la Tunisie recueillis en 1885 et 1886 par M. Philippe Thomas, membre de la mission de l'exploration scientifique de la Tunisie; par *Alphonse Peron.* In-8°, p. 329 à 405 et album in-4° des planches 12 à 31, dessinées d'après nature par M. *F. Gauthier.* Paris, Imp. nationale. (9304)

—— Description de quelques fossiles nouveaux et critiques des terrains tertiaires et secondaires de la Tunisie, recueillis en 1885 et 1886; par M. *Philippe Thomas*, membre de la mission de l'exploration scientifique de la Tunisie. In-8°, 52 p. avec fig. Paris, Imp. nationale. (12426)

Gastine (G.). — Recherches sur la composition des terres de la Crau et des eaux et limons de la Durance. In-8°, 36 p. Marseille, imp. Barlatier et Barthelet. (Extr. du *Bull. du ministère de l'agriculture.*) (6392)

Hedde (P.). — Excursions de la Société géologique de France aux environs du Puy (Haute-Loire) en septembre 1893. In-12, 18 p. Le Puy, imp. Marchessou fils. (13353)

Houssay (F.). — Quelques remarques sur les lois de l'évolution. In-8°, 160 p. Paris, Carré; P. Klincksieck. (Extr. du *Bull. scient. de la France et de la Belgique.*) (8102)

Lacroix (A.). — Le Domaine de la minéralogie, leçon d'ouverture du cours de minéralogie au Muséum d'histoire naturelle. In-8°, 16 p. Paris, 111, boulevard Saint-Germain. (Extr. de la *Revue scientifique.*) (7862)

—— Aperçu des développements de la minéralogie pendant le siècle qui vient de s'écouler et Contribution des professeurs du Muséum à ce progrès. In-4°, 21 pages. Paris, Imp. nationale. (Extr. du *Volume commémoratif du centenaire de la fondation du Muséum d'histoire naturelle.*) (9887)

Meunier (S.). — Notice historique sur la collection de météorites du Muséum d'histoire naturelle. In-4°, 52 p. et 2 planches. Paris, Imp. nationale. (Extr. du même volume.) (9372)

—— Recherches minéralogiques sur les gisements diamantifères de l'Afrique australe. In-8°, 49 p. et planches. Autun, imp.

Dejussieu père et fils. (Extr. du *Bull. de la Soc. d'hist. nat. d'Autun.*) (13440)

PERRIER (E.). — Lamarck et le transformisme actuel. In-4°, 61 p. Paris, Imp. nationale. (Extr. du même volume.) (9642)

POMEL (A.). — Paléontologie. Monographies. *Bubalus antiquus.* In-4°, 94 p. et 10 planches. Alger, imp. Fontana et Cie. (*Carte géologique de l'Algérie.*) (11089)

—— Paléontologie. Monographies. *Caméliens et Cervidés.* In-4°, 52 p. et 8 planches. Alger, imp. Fontana et Cie. (*Carte géologique de l'Algérie.*) (11769)

PRIEM (F.). — La Terre avant l'apparition de l'homme. Périodes géologiques; Faunes et Flores fossiles; Géologie régionale de la France. Séries 1 à 5. In-4° à 2 col., p. 1 à 160 avec gravures. Paris, J.-B. Baillière et fils. (L'ouvrage sera publié en 24 séries à 50 cent.) (13122)

RENAULT (B.). — Note sur un nouveau genre de gymnosperme fossile du terrain permo-carbonifère d'Autun. In-8°, 7 p. et pl. Autun, imp. Dejussieu. (Extr. du *Bull. de la Soc. d'hist. nat. d'Autun.*) (6929)

RICHE (A.). — Étude stratigraphique sur le jurassique inférieur du Jura méridional. In-8°, 400 p. avec fig. et planches. Paris, G. Masson. 12 francs. (Extr. des *Annales de l'Université de Lyon.*) (8453)

TARDY (C. et F.). — Esquisse géologique de la Bresse et des régions circonvoisines. Abrégé de géologie à l'usage des Bressans. In-8°, 120 p. Bourg, imp. du *Courrier de l'Ain.* (7947)

THOMAS-MARANCOURT (E.). — Foyer de la pointe des Brosses, à Montigny-sur-Loing (station magdalénienne). In-8°, 12 p. avec figures. Fontainebleau, imp. Bourges. (10703)

VASSEUR. — Au sujet de la fondation de l'Institut botanico-géologique de Marseille. Réponse de M. Vasseur, professeur à la Faculté des sciences de Marseille, à M. le professeur Heckel. In-8°, 18 p. Marseille, imp. Moullot fils aîné. (10266)

4° *Mécanique appliquée et Machines.*

BERTHOT (P.). — Traité de l'élévation des eaux : calculs et enseignements pratiques, pompes à main, emploi des moteurs à vent et à eau, pompes centrifuges, emploi des moteurs à vapeur, à gaz, électriques, pompes d'alimentation, appareils hydrauliques, ascenseurs, emploi de l'air et des gaz comprimés, pulsomètres, injecteurs, éjecteurs, hélices hydrauliques. In-8°, x-390 p. Paris, Baudry et Cie. (9767)

BOULET (O.). — Machines à vapeur (système Blondel) avec alternateur-volant (système O. Patin), pour usines productrices d'énergie électrique. In-8°, 22 p. Paris, Chaix. (Extr. du *Bull. technol. de la Soc. des anciens élèves des écoles nat. d'arts et métiers.*) (8551)

BOULVIN (J.). — Cours de mécanique appliquée aux machines, professé à l'École spéciale du génie civil de Gand. 3e fascicule : Théorie des machines thermiques. In-8°, IV-347 p. avec 130 fig. et planche. Paris, Bernard et Cie. (7315)

COMPÈRE (C.). — Recherches sur les causes des accidents des chaudières multitubulaires. In-8°, 31 p. Paris, cité Rougemont. (Extr. des *Mém. de la Soc. des ingénieurs civils de France.*) (12688)

CORNUT (E.). — Essais de consommation d'une machine à quatre tiroirs Farcot. In-8°, 18 p. avec annexe. Paris, Chaix. (*Association des propriétaires d'appareils à vapeur du nord de la France.*) (8590)

HAMON (F.). — Manuel à l'usage des chauffeurs de locomobiles employées au battage des céréales et autres travaux nécessitant des déplacements. In-18, 68 p. Orléans, tous les libraires. (13352)

HONORÉ. — Voici des tambours qui vont faire du bruit dans le monde. Tambours moteurs soit à la vapeur, soit à l'électricité, soit à l'air comprimé, soit à l'acide carbonique, etc. Mémoire descriptif par *Chouet* (*J.-C.-L.*), dit *Honoré*, professeur à Paris. In-8°, 24 p. Paris, 2, quai des Célestins. (9325)

Instructions concernant les précautions à prendre dans l'emploi des meules en grès et des meules artificielles. 4e édition. In-8°, 35 pages avec fig. Paris, 3, rue de Lutèce. (*Association des industriels de France contre les accidents du travail.*) (11216)

JAUNEZ (A.). — Manuel du chauffeur. Guide pratique à l'usage des mécaniciens, chauffeurs et propriétaires de machines à vapeur, exposé des connaissances qui leur sont nécessaires, et suivi de conseils afin d'éviter les explosions des chaudières à vapeur. 5e édition. In-18 jésus, 220 p. avec 40 fig. Paris, Hetzel et Cie. 2 francs. (10948)

LAVERGNE (G.). — Les Turbines. In-16, 236 pages avec fig. Paris, Gauthier-Villars et fils; G. Masson. 2^f^,50. (7649)

MASLIN (E.). — Les Ascenseurs de Notre-Dame-de-la-Garde, à Marseille. In-8°, 30 p. avec grav. et fig. Marseille, imp. Barlatier et Barthelet. (9367)

PIERRE-BEY. — Les Effets de la combustion lente dans les chau-

dières. In-8°, 6 p. et planches. Marseille, imp. Barlatier et Barthelet. (Extr. du *Bull. de la Soc. scient. industrielle de Marseille.*) (13111)

Richard (G.). — Les Moteurs à gaz et à pétrole en 1892. In-8°, XII-292 p. avec fig. Paris, Ve Dunod. (7473)

Sinigaglia (F.). — Accidents de chaudières. In-16, 192 p. avec fig. Paris, Gauthier-Villars et fils; G. Masson. 2^f^,50. (10433)

Stapfer (D.). — Moteurs rapides. In-8°, 12 p. Marseille, imp. Barlatier et Barthelet. (Extr. du *Bull. de la Soc. scient. industrielle de Marseille.*) (12584)

Vermand (P.). — Les Moteurs à gaz et à pétrole. In-16, 176 pages avec figures. Paris, Gauthier-Villars et fils; G. Masson. 2^f^,50. (11816)

Visite des ateliers de la Compagnie du chemin de fer du Nord à Hellemmes-Lille. Excursion du 11 avril 1893. In-8°, 8 pages et plan. Lille, imp. Danel. (Extr. du *Bull. de la Soc. de géographie de Lille.*) (10448)

Widmann (E.). — Principes de la machine à vapeur. Petit in-8°, 156 p. Paris, Gauthier-Villars et fils; G. Masson. 2^f^,50. (7260)

Witz (A.). — Du rôle et de l'efficacité des enveloppes de vapeur dans les machines Compound. In-8°, 41 p. et planches. Lille, imp. Danel. (*Société industrielle du nord de la France.*) (8784)

Zdziarski (A.). — Nouvel excavateur à chevaux *New Era* de M. Austin. In-8°, 14 p. et planche. Paris, 10, cité Rougemont. (Extr. des *Mém. de la Soc. des ingénieurs civils de France.*) (11304)

5° *Applications industrielles de la physique et de la chimie. — Métallurgie.*

Bécret (L.). — Contribution à l'étude de la chimie sucrière. Influence des oxydes de fer et d'alumine en sucrerie. In-8°, 9 p. Mayenne, Poirier-Beau. (12907)

Bouquet (R.-P.). — Notes et Formules d'électricité industrielle. In-18 jésus, x-412 p. avec fig. Paris, Bernard et Cie. (7316)

Bussy (A.). — Leçons d'électricité industrielle, professées à la Société d'enseignement professionnel du Rhône. In-8°, 75 p. Lyon, imp. Rey. (8282)

Delhotel (E.). — Traité de l'épuration des eaux naturelles et industrielles. In-8°, VIII-442 p. avec 147 figures. Paris, Baudry et Cie. 15 francs. (6355)

Houel (P.). — Éclairage d'ateliers par l'électricité. Courants continus. In-8°, 166 p. avec fig. Paris, Bernard et Cie. (Extr. de l'ouvrage *La Filature du coton par les machines modernes*, de M. Delessard.) (7402)

Kestner (P.) et Blatiner. — Nouveau procédé pour l'extraction du cuivre des pyrites cuivreuses grillées, avec production simultanée de chlore. In-8°, 9 p. Lille, imp. Danel. (*Société industrielle du nord de la France.*) (9054)

Leblond (H.). — Les Moteurs électriques à courant continu. In-8°, VI-494 p. avec figures. Paris et Nancy, Berger-Levrault et Cie. 10 francs. (11469)

Lescœur (H.). — Sur la purification du zinc du commerce. In-8°, 4 pages. Lille, imp. Danel. (*Société industrielle du nord de la France.*) (9074)

Minel (P.). — Introduction à l'électricité industrielle. I : Potentiel; Flux de force; Grandeurs électriques. Pet. in-8°, 228 p. avec figures. Paris, Gauthier-Villars et fils; G. Masson. 2^f^,50. (7170)

—— —— II : Circuit magnétique; Induction; Machines. Petit in-8°, 176 pages avec figures. Paris, Gauthier-Villars et fils; G. Masson. 2^f^,50. (7171)

Rodet (J.) et Busquet. — Les Courants polyphasés. In-8°, 48 p. avec fig. Lyon, imp. Rey. (Ext. de la *Soc. d'agriculture et des sciences industrielles de Lyon.*) (6542)

—— —— Fascicule 2 et 3. In-8° de 75 et de 66 p. avec fig. Lyon, imp. Rey. (Extr. du même recueil.) (12296)

Rousseau (J.). — Applications de l'électricité à la métallurgie. Fabrication de l'alumium. In-8°, 38 pages et plan. Paris et Nancy, Berger-Levrault et Cie. (Extr. de la *Revue d'artillerie.*) (12567)

Russell (S.-A.). — Câbles d'éclairage électrique et Distribution de l'électricité; par *Stuart A. Russell*. Traduit, avec l'autorisation de l'auteur, par *G. Formentin*, ancien sous-chef de bureau au ministère de l'intérieur. In-16, 355 p. avec 107 fig. Paris, Tignol. (7930)

Schubert (M.). — Traité pratique de la fabrication de la cellulose, à l'usage des directeurs techniques ou commerciaux des fabriques de papier et de cellulose, des chefs d'ateliers et des écoles professionnelles; par *Max Schubert*, directeur d'usine. Traduit de l'allemand avec notes et additions par *Ed. Bibas*, ingénieur civil des mines, sous-directeur de la Société anonyme des papeteries du Marais et de Sainte-Marie. In-18 jésus, XII-324 p. avec fig. Paris, Baudry et Cie. (9684)

Sée (P.). — Nouveau matériel électrique, système Bergmann. In-8°, 10 pages avec figures. Lille, imp. Danel. (*Société industrielle du nord de la France.*) (9195)

Thompson (S.-P.). — Traité théorique et pratique des machines dynamo-électriques; par *Silvanus P. Thompson*, directeur du collège technique de Finsbury, à Londres. Traduit et adapté de l'anglais sur la 4e édition par *E. Boistel*, électricien, expert près le tribunal de la Seine. 2e édition française. In-8°, xxx-926 p. avec fig. Paris, Baudry et Cie. (10704)

Tissot (L.). — Notes sur le transport électrique de la force par courants polyphasés (Lauffen-Francfort). In-8°, 14 p. avec fig. Marseille, imp. Barlatier et Barthelet. (Extr. du *Bull. de la Soc. scient. industrielle de Marseille.*) (9218)

Villon (A.-M.). — Dictionnaire de chimie industrielle, contenant les applications de la chimie à l'industrie, à la métallurgie, à l'agriculture, à la pharmacie, à la pyrotechnie et aux arts et métiers. T. 1er. Fascicule 5. In-4° à 2 col., p. 313 à 392. Paris, Tignol. (6259)

Wydts (A.). — La Machine dynamo-électrique : sa théorie, calcul de ses éléments de construction, à l'usage des constructeurs électriciens, contenant 40 figures. In-8°, 78 p. Paris, Michelet. (12333)

6° *Exploitation des mines. — Gîtes minéraux.*

Clavier (A.). — Le Pétrole de Zante (Grèce). In-4°, 24 pages avec 1 carte et 2 plans. Marseille, imp. Barlatier et Barthelet. (7048)

Daniel (J.). — Les explosifs industriels, le grisou et les poussières de houille, envisagés spécialement au point de vue de leurs rapports réciproques dans l'industrie minérale. Gr. in-8°, xii-284 p. Paris, E. Bernard et Cie. 10 francs.

Dorion (C.-J.). — Exploitation des mines. Cours de l'École centrale des arts et manufactures. In-8°, xxiii-668 p. av. fig. Paris, Baudry et Cie. 25 fr. (8618)

Freydier-Dubreuil (G.). — Étude sur le bassin houiller d'Héraclée (mer Noire). In-4°, 32 p. Lyon, imp. Rey. (13316)

Gerards (E.). — Les Catacombes de Paris. Histoire des carrières souterraines de Paris ; Personnes égarées, accidents, etc. ; Anciens et nouveaux règlements relatifs aux carrières ; Travaux de consolidation sous les voies publiques et sous les propriétés privées ; Renseignements pratiques ; Guide du visiteur de l'ossuaire. 2e édition. In-18 jésus, 213 p. avec 6 grav. et 2 plans. Paris, Chamuel. 2 fr. (7087)

Hubert (P.). — Les phosphates de chaux naturels. Recherche des gisements ; Essais chimiques ; Extraction ; Emplois dans l'industrie ; Phosphates industriels ; Superphosphates. In-8°, viii-78 p. av. fig. Paris et Liège, Baudry et Cie. (8666)

Pappa (D.). — Manuel des principales sociétés minières, foncières et d'exploration du Sud-Afrique, avec supplément sur les mines indiennes. 3e édition. In-8°, 88 p. et cartes. Paris, imp. Kugelmann. (11083)

Sarran (E.). — Le Tonkin au point de vue minier. In-8°, 40 p. Marseille, imp. Moullot fils aîné. (Extr. du *Bull. des mines et de l'industrie.*) (13143)

7° *Construction. — Chemins de fer.*

Appy (F.). — Block-system automatique. Solution mécanique. Gr. in-8°, 11 p. Nice, imp. Robaudi frères. (5729)

Blanchard (A.). — Projet de création du huitième réseau de chemins de fer par l'union des lignes d'intérêt local. In-16, 32 p. Paris, M. Riellant, 119, rue Lafayette. 1 fr. (10020)

Candlot (E.). — Note sur l'emploi des matériaux hydrauliques. In-8°, 48 p. Paris, Baudry et Cie. (Extr. des *Nouvelles Annales de la construction*) (10594)

Carpentier (A.) et G. Maury. — Traité des chemins de fer ; 3 vol. in-8°. T. 1er, lxii-636 p. ; t. 2, 551 p. ; t. 3, 811 p. Paris, Larose. Les trois volumes, 30 fr. (10904)

Carte des chemins de fer français, dressée au ministère des travaux publics. Direction des chemins de fer. Échelle de 1/1.250.000. Paris, Delagrave. (1174)

Charpentier (A.). — Tracé des voies de communication et des courbes de raccordement. Méthode très expéditive et facilitée par l'usage de tables présentant : 1° l'angle de deux alignements quelconques ; 2° les tangentes, arcs et sécantes des courbes substituées à des alignements droits faisant un angle de 20 à 180 degrés ; 3° les ordonnées sur la tangente, pour le tracé, par points équidistants, des courbes de 5 à 5.000 mètres de rayon. 2e édition. In-8°, 185 p. et 2 pl. Paris, P. Dupont. (6587)

Denizet (F.). — Note sur le tramway électrique de Marseille et Bases d'une comparaison des différents systèmes de traction mécanique des tramways. In-8°, 64 p. av. fig. Paris, Baudry et Cie. (9516)

Dubreuil (V.). — De l'influence des assemblages sur le prix de

revient et sur la stabilité des planchers métalliques. In-8°, 7 p. et pl. Lille, imp. Danel. (*Société industrielle du nord de la France.*) (8956)

Dubs (H.). — Les Tramways électriques de Marseille. In-8°, 23 p. avec fig. Marseille, imp. Barlatier et Barthelet. (Extr. du *Bull. de la Soc. scient. industrielle de Marseille.*) (8958)

Gisclard (A.). — Sur un nouveau système de pont roulant à entraînement rapide pour docks, ateliers ou arsenaux. In-8°, 8 p. av. fig. et plan. Paris et Nancy, Berger-Levrault et Cie. (Extr. de la *Revue du génie militaire.*) (6407)

Henry (E.). — Théorie et Pratique du mouvement des terres, d'après le procédé Bruckner. In-8°, VI-72 p. av. fig. Paris, Baudry et Cie. 2^f^,50. (10649)

Lalance (A.). — Nouvel essieu radial pour locomotives système Weidknecht. In-8°, 11 p. avec fig. et pl. Paris, 6, rue de la Chaussée d'Antin. (Extr. du journal *le Génie civil.*) (6872)

Neymarck (A.). — La réforme des tarifs de chemins de fer en 1892 et les garanties d'intérêt, communication faite à l'Association française pour l'avancement des sciences (congrès de Besançon, 1893, session du 3 au 10 août). In-8°, 8 p. Paris, imp. Duruy. (12256)

Note au sujet de la largeur de voie à adopter pour les chemins de fer des colonies. In-8°, 19 p. Paris et Nancy, Berger-Levrault et Cie. (Extr. de la *Revue du génie militaire.*) (8729)

Pascal. — Barême des poutres métalliques à âmes pleines et à treillis. In-8° obl., VIII-159 p. av. fig. Paris, Baudry et Cie. (7194)

Relevé des circonstances de la marche des trains. Fourgon dynamométrique de la Compagnie des chemins de fer de l'Ouest. In-8°, 12 p. av. fig. et pl. Paris, 6, rue de la Chaussée-d'Antin. (Extr. du journal *le Génie civil.*) (11287)

Répertoire général et alphabétique des gares, stations ou haltes des chemins de fer français et algériens (intérêt général et intérêt local), avec indication des lignes auxquelles elles se rattachent. In-4°, 249 p. Paris, Imp. nationale. (Ministère des travaux publics.) (9955)

Statistique des chemins de fer français au 31 décembre 1890. Documents divers. Deuxième partie : France ; Intérêt local ; Algérie et Tunisie. In-4°, VI-218 pages. Paris, Imp. nationale. 5 fr. (Ministère des travaux publics.) (6240)

Statistique des chemins de fer français au 31 décembre 1891. Documents divers. Première partie. France : Intérêt général. In-4°, VII-234 p. Paris, Imp. nationale. 5 fr. (Ministère des travaux publics.) (10256)

—— —— Deuxième partie : France (intérêt local), Algérie et Tunisie. In-4°, VI-260 p. Paris, Imp. nationale. 5 fr. (Ministère des travaux publics.) (11539)

Thunimont (L. de). — Ponts roulants mus par l'électricité. Pont roulant de 150 tonnes construit par MM. Schneider et Cie, au Creusot. In-8°, 13 p. et pl. Paris, 6, rue de la Chaussée-d'Antin. (Extr. du journal *le Génie civil.*) (5969)

8° *Législation. — Économie politique et sociale.*

Batteur (E.). — De la réparation en matière d'accidents industriels. In-8°, 10 p. Lille, imp. Danel. (*Société industrielle du nord de la France.*) (10477)

Benoît (F.). — La réglementation du travail. Manuel d'hygiène et de mécanique industrielles, ouvrage rédigé conformément au programme du concours pour l'emploi d'inspecteur ou d'inspectrice du travail dans l'industrie. In-8°, VI-312 p. Paris et Nancy, Berger-Levrault et Cie. 5 fr. (8539)

Bouquet (L.). — La Réglementation du travail. Le Travail des enfants, des filles mineures et des femmes dans l'industrie (commentaire de la loi du 2 novembre 1892). In-8°, VIII-510 p. Paris et Nancy, Berger-Levrault et Cie. (10586)

Branis (V.). — La Société belge d'économie sociale. Rapport sommaire sur les travaux de sa douzième session (1892-1893). In-8°, 4 p. Paris, imp. Levé. (Extr. de *la Réforme sociale.*) (12926)

Cheysson (E.). — L'assurance mixte et les maisons ouvrières. In-8°, 24 p. Paris, G. Masson. (Extr. du *Bull. de la Soc. française des habitations à bon marché.*) (11639)

De la conciliation et de l'arbitrage dans les conflits collectifs entre patrons et ouvriers en France et à l'étranger. In-8°, VI-614 p. Paris, Berger-Levrault et Cie. (Office du travail. Ministère du commerce, de l'industrie et des colonies.) (6596)

Gaure (J.). — Les Droits du voyageur et de l'expéditeur en chemin de fer. In-8°, 50 p. Paris, Chevalier-Maresq et Cie. 0^f^,75. (9545)

Gibon (A.). — La Grève de Carmaux. De l'arbitrage légal et des conditions de l'harmonie dans l'industrie. In-8°, VI-87 p. Paris, Guillaumin et Cie. 3 fr. (Extr. de *la Réforme sociale.*) (6402)

Guide de l'industriel en matière de législation ouvrière. Lois,

Règlements d'administration publique et Circulaires ministérielles sur le travail des enfants, des filles mineures et des femmes dans les établissements industriels ; la Conciliation et l'Arbitrage entre patrons et ouvriers ou employés, etc. Augmenté de la loi sur les marques de fabrique et de commerce. Avec table analytique des matières. In-8°, 60-VIII p. Lille, imp. Lefebvre-Ducrocq. 1f,50. (13338)

LE COUR. — Projet et Propositions de loi concernant les responsabilités des accidents. Discours prononcés aux séances de la Chambre des députés des 3, 6 et 8 juin 1893. In-8°, 47 p. Paris, imp. des journaux officiels. (Extr. du *Journal officiel.*) (6880)

Loi sur le travail des enfants, des filles mineures et des femmes dans les établissements industriels (2 novembre 1892). In-8°, 23 p. Paris et Nancy, Berger-Levrault et Cie. (11741)

MAHILLON (L.). — La Caisse générale d'épargne et de retraite de Belgique et les habitations ouvrières, communication faite à la séance du 7 mai du quatrième congrès des sociétés françaises de crédit populaire. In-8°, 10 p. Angers, Germain et Grassin. (7876)

MERLIN (C.). — Des déchéances en matière de concessions minières. In-8°, 23 p. Paris, imp. Goupy. (11076)

Office du travail. Notices et Comptes rendus. Fascicule 5. Résultats statistiques de l'assurance obligatoire contre la maladie en Allemagne. In-8°, 134 p. Paris, Berger-Levrault et Cie. (Ministère du commerce, de l'industrie et des colonies.) (9630)

—— —— Fascicule 7 : Statistique des grèves survenues en France pendant l'année 1892. In-8°, 186 p. Paris, Berger-Levrault et Cie. (Ministère du commerce, de l'industrie et des colonies.) (12800)

PENET (J.). — L'État et les voies ferrées d'intérêt local en Allemagne. Étude sur la loi prussienne du 28 juillet 1892, avec traduction de cette loi. In-8°, 79 p. Paris, Pichon. (Extr. du *Bull. de la Soc. de législation comparée.*) (12024)

RAMEL (F. de). — Première délibération sur le projet et les propositions de loi concernant les responsabilités des accidents dont les ouvriers sont victimes dans leur travail et l'organisation de l'assurance obligatoire. Discours prononcé par M. *Fernand de Ramel*, député du Gard, à la séance de la Chambre des députés du 18 mai 1893. In-4° à 3 col., 4 p. Paris, imp. des journaux officiels. (Extr. du *Journal officiel.*) (5929)

RENAULT (C.). — Histoire des grèves. In-18 jésus, XII-293 p. Paris, Guillaumin et Cie. 3f,50. (12287)

SAY (L.). — Discussion des projets et propositions de loi concernant les responsabilités des accidents. Discours prononcé par M. *Léon Say*, député, à la séance de la Chambre des députés du 18 mai 1893. In-32, 64 p. Paris, imp. des journaux officiels. (Extr. du *Journal officiel.*) (6518)

9° *Objets divers.*

DEBAUVE (A.). — Les Travaux publics et les Ingénieurs des ponts et chaussées depuis le XVIIe siècle. In-8°, 447 p. av. portraits. Paris, Vve Dunod. 12 fr. (10762)

DIBOS (M.). — Les Signaux à grandes distances à bord des aérostats captifs ou libres. In-8°, 15 p. Paris, Baudoin. (10916)

JANSSEN (J.). — Un observatoire au Mont-Blanc. In-8°, 12 p. Lille, imp. Danel. (*Société industrielle du nord de la France.*) (9041)

JUILLARD (P.). — Étude sur la circulation des éléments et la formation des mondes. In-8°, 18 p. Audincourt, Jacot et Cie. 0f,30. (13372)

LAHARPE (C. de). — Notes et Formules de l'ingénieur et du constructeur mécanicien. 9e édition, revue, corrigée et augmentée par *L.-A. Barré*, *Ch. Vigreux* et *R.-P. Bouquet*, ingénieur des arts et manufactures. In-18, VIII-804 p. av. fig. Paris, Bernard et Cie. (7422)

MANGE (A.). — Les Tarifs anglais et l'application du *railway and canal traffic act* de 1888. In-8°, 16 p. Paris, Guillaumin et Cie. (Extr. du *Journal des économistes.*) (6464)

ORENGO (J.-P.). — Étude pratique sur l'assainissement des villes et habitations. Eaux ménagères, Détritus urbains, la Maison. Projet de canalisation spéciale pour l'évacuation des eaux vannes de la ville de Nice (système Piattini), présenté à l'administration municipale par *J.-P. Orengo*, administrateur-directeur de la Société générale d'engrais, au nom de la Société niçoise d'assainissement. In-8°, 48 p. Nice, imp. Gauthier et Cie. (13478)

SÉBILLOT (A.). — Le Transafricain. Les Grandes Lignes commerciales de la Méditerranée au golfe de Guinée et à l'océan Indien. In-8°, 68 p. et 6 pl. Paris, imp. P. Dupont. (5956)

Table générale des comptes rendus des séances de l'Académie des sciences publiés par MM. les secrétaires perpétuels. T. 62 à 91 : 2 janvier 1866 à 27 décembre 1880. In-4° à 2 col., 1.603 p. Paris, Gauthier-Villars et fils. 15 fr. (6243)

VIDAL (L.). — Traité pratique de photolithographie (Photolitho-

graphie directe et par voie de transfert ; Photozincographie ; Photocoliographie ; Autographie ; Photographie sur bois et sur métal à graver ; Tours de main et Formules diverses). In-18, XVIII-419 p. av. fig. et pl. Paris, Gauthier-Villars et fils. 6f,50. (7757)

OUVRAGES BELGES

COLLETTE (L.). — Exercices de calcul intégral. Liège. In-8°. 3f,75.

GODY (L.). — Traité théorique et pratique des matières explosibles. Namur. In-8°, VIII-180 p. 6f,25.

JOTTRAND (F.). — La Prévention des accidents du travail dans les usines et les manufactures. Liège. In-16, 176 p. 5 fr.

VAN OVERBERGH (C.). — Les Inspecteurs du travail dans les fabriques et les ateliers. Étude d'économie sociale. Louvain. In-8°, VIII-488 p. 9f,40.

SCHOENTJES (H.). — Cours de physique expérimentale. Chaleur, magnétisme, électricité, lumière et chaleur rayonnante. Gr. in-8°, XII-496 p. 12f,50.

OUVRAGES ANGLAIS.

1° *Mathématiques et Mécanique pures.*

BASHFORTH (Rev. F.). — Mathematical Treatise on the Motion of Projectiles, Founded Chiefly on the Results of Experiments made with the Author's Chronograph. With 3 Plates and 192 Tables of Co-Efficients for the Cubic Law of Resistance, with Supplement. In-8°. Asher and C°. 6f,25.

BESANT (W.-H.). — A Treatise on Dynamics. 2nd ed. In-8°, 456 p. Cambridge, Bell; Londres, Deighton, Bell and C°. 13f,15.

CRANDALL (C.-L.). — The Transition Curve, by Offsets and by Deflection Angles. In-12. Gay and Bird. 9f,40.

DODGSON (C.-L.). — Curiosa Mathematica. Part 2 : Pillow Problems Thought Out during Sleepless Nights. In-8°. Macmillan. 2f,50.

HARKNESS (J.) and MORLEY (F.). — A Treatise on the Theory of Functions. In-8°, 510 p. Macmillan. 22f,50.

KLEIN (F.). — On Reimann's Theory of Algebraic Functions and their Integrals. Trans. by *Frances Hardcastle*. In-8°. Macmillan. 5f,65.

LOVE (A.-E.-H.). — A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity. Vol. 2. In-8°, 314 p. Cambridge Warehouse. 15 fr.

PAYNE (J.). — Practical Solid Geometry; or, Orthographic and Isometric Projection. To which is Added Graphic Arithmetic and Statics, by *J.-J. Prince*, in Accordance with the Recent Requirements of the Science and Art Department. New ed. In-8°, VII-206-48 p. Murby. 2f,50.

WELD (L.-G.). — A Short Course of the Theory of Determinants. In-8°, 244 p. Macmillan. 9f,40.

ZIWET (A.). — An Elementary Treatise on Theoretical Mechanics. Part. 2, Kinematics. In-8°. Macmillan. 10f,65.

—— —— Part 2 : Introduction to Dynamics, Statics. In-8°. Macmillan. 10f,65.

2° *Physique et Chimie.*

BARNES (C.-L.). — Sound : An Elementary Treatise. Illust. In-8°, VIII-79 p. Nisbet. 1f,25.

BUCKMASTER (J.-C.). — Sound, Light and Heat. In-8°. Simpkin. 1f,90.

BURCH (G.-J.). — A Manual of Electrical Science. With 39 Illusts. In-8°, XI-260 p. Methuen. 3f,75.

CAVENDISH (H.). — Experiments on Air : Papers Published in the Philosophical Transactions. In-8°, 520 p. Edimbourg; Londres, Simpkin. 1f,90.

DRAPER (C.-H.). — Heat and the Principles of Thermodynamics. With many Illusts and Numerical Examples. In-8°, 340 p. Blackie. 5f,65.

Foundations of the Molecular Theory : Papers and Extracts by John Dalton, Joseph Louis, Gay-Lussac and Amadeo Avogadro, 1808-11. In-8°, 51 p. Edimbourg; Londres, Simpkin. 1f,90.

GARNETT (W.). — An Elementary Treatise on Heat. 6th. ed., Revised and Enlarged. In-8°, 320 p. Bell and Sons. 5f,65.

GLAZEBROOK (R.-T.). — Physical Optics. 3rd ed. In-12, 474 p. Longmans. 7f,50.

Hopkins (G.-M.). — Experimental Science : Elementary, Practical and Experimental Physics. 14th ed., Revised and Enlarged. In-8°, 832 p. Spons. 20 fr.

Letts (E.-A.). — Qualitative Analysis Tables, and the Reactions of Certain Organic Substances. In-4°. Macmillan. 8f,75.

Lovibond (J.-W.). — Measurement of Light and Colour Sensations : A New Method of Investigating the Phenomena of Light and Colour by Means of the Selective Absorption in Coloured Glass Graded into Scales of Equivalent Colour Value. In-8°, 132 p. L.-U. Gill. 9f,40.

Merrifield (J.).— Magnetism and Deviation of the Compass. New and Revised ed. In-18, 142 p. Longmans. 2f,50.

Muir (M.-M. P.).— The Chemistry of Fire. Illust. In-8°, viii-163 p. Methuen. 3f,15.

Pinkerton (R.-H.). — Hydrostatics and Pneumatics : The Mechanics of Fluids. In-8°, 340 p. Blackie. 5f,65.

Stewart (R.-W.). — The Tutorial Physics. Vol. 2. A Text-Book of Heat, with numerous Diagrams and Examples. In-8°, vi-286 p. W.-B. Clive. 4f,40.

Taylor (R.-L.). — Practical Chemistry. Practical Inorganic Chemistry. In-12. Manchester, Scholastic Trading C°; Londres, Simpkin. 0f,65.

Thomson (J.-J.). — Notes on recent Researches in Electricity and Magnetism. In-8°, 586 p. Londres. 27f,50.

Valentin (W.-G.).— A Course of Practical Chemistry ; or, Qualitative Chemical Analysis. Edit. and Revised by *W.-R. Hodgkinson*. 8 th ed. In-8°, 330 p. Churchill. 8f,15.

Watson (H.-W.). — A Treatise on the Kinetic Theory of Gases. 2nd ed. In-8°, 96 p. Clarendon Press. 5f,65.

Weekes (R.-W.). — The Design of Alternate-Current Transformers. Illust. In-8°, 95 p. Biggs and C°. 2f,50.

Wiechmann (F.-G.). — Lecture Notes on Theoretical Chemistry. Illust. In-8°. Gay and Bird. 15f,65.

Wright (M.). — Heat. In-8°, 330 p. Longmans. 5f,65.

3° *Minéralogie. — Géologie. — Paléontologie.*

Aveling (E.).— An Introduction to the Study of Geology. With 132 Illusts. in the Text and a Coloured Map. In-8°, 364 p. Swan Sonnenschein. 7f,50.

Dawson (Sir J.-W.). — Some Salient Points in the Science of the Earth. With 46 Illusts. In-8°, 478 p. Hodder and Stoughton. 9f,40.

Geikie (Sir A.). — Text-Book of Geology. In-8°, 1136 p. Macmillan. 35 fr.

Lessing (F.-L.). — Tables for the Determination of the Rock-forming Minerals. Trans. by *J.-W. Gregory*. With a Chapter on the Petrological Microscope by *G.-A.-J. Cole*. In-8°, 55 p. Macmillan. 5f,65.

Manual (A) of the Geology of India, 2nd ed., Largely Re-written by *R.-D. Oldham* (Calcutta). In-8°. Paul, Trübner and C°. 20 fr.

Memoirs of the Geological Survey of the United Kingdom. — The Jurassic Rocks of Britain. Vol. 3 : The Lias of England and Wales (Yorkshire Excepted). By *Horace B. Woodward*. 9f,40.

—— The Geology of South-Western Norfolk and of Northern Cambridgeshire. Explanation of Sheet 65. By *W. Whitaker*, *S.-B.-I. Skertchly*, and *A.-J. Jukes-Browne*. Partly from Notes by other Officers of the Survey. 3f,75.

Roberts (R.-D.). — An Introduction to modern Geology. In-8°, 288 p. Londres. 7f,50.

Spencer (H.).— The Inadequacy of « Natural Selection » Reprinted from the Contemporary Review. In-8°, 68 p. Williams and Norgate. 1f,25.

4° *Mécanique appliquée et Machines.*

Cryer (T.) and Jordon (H.-G.). — Machine Construction and Mechanical Drawing. 5th ed., Revised and Enlarged. In-4°. Heywood. 3f,75.

Donkin (B.). — A Text-Book on Gas, Oil and Air Engines ; or, Internal Combustion Motors without Boiler. With 136 Illusts. In-8°, 434 p. C. Griffin and C°. 26f,25.

Goodeve (T.-M.). — Texte-Book on the Steam Engine. With a Supplement on Gas Engines, and Part 2 on Heat Engines. 12th ed., Enlarged. In-8°, 408 p. Crosby Lockwood and Son. 7f,50.

Haeder (H.). — A Handbook on the Steam Engine, with Especial Reference to Small and Medium-sized Engines. For the Use of Engine Makers, Mechanical Draughtsmen, Engineering Students and Users of Steam Power. English ed., Re-edited by the Author from the 2nd German ed., and Trans., with considerable Additions and Alterations by *H.-H.-P. Powles*. Illust. In-8°, vii-440 p. Crosby Lockwood and Son. 13f,15.

Haldane (J.-W.-C.). — Steamships and their Machinery : From First to Last. In-8°, 544 p. Spons. 18f,75.

Helical Gears. A Practical Treatise. By a Foreman Pattern Maker. Illust. with 100 Engravings and Frontispiece. In-8°, 120 p. Whittaker. 9f,40.

KENNEDY (A.-B.-W.). — The Mechanism of Machinery. In-8°. With Illust. Londres. 12f,75.

ROBINSON (H.). — Hydraulic Power and Hydraulic Machinery. 2nd ed., Revised and Enlarged, with numerous Woodcuts and 69 Plates. In-8°, 256 p. C. Griffin and C°. 42f,50.

SPENCER (A.). — Roll Turning for Sections in Steel and Iron : 2nd ed. With an Appendix Containing 22 Additional Folding Plates. Vol. 2. In-4°. Spons. 37f,50.

TAYLOR (D.-W.). — Resistance of Ships and Screw Propulsion. In-8°, 250 p. Whittaker. 18f,75.

TODHUNTER (L.). — A History of the Theory of Elasticity and of the Strength of Materials, from Galilei to the Present Time. By *Karl Pearson*. 2 vols. Vol. 2, Parts 1 and 2. In-8°, 1340 p. Cambridge Warehouse. 37f,50.

TURNER (J.-H.-T.) and BRIGHTMORE (A.-W.). — The Principles of Waterworks Engineering. In-8°, 444 p. Spons. 31f,25.

WEISBACH (J.) and HERRMANN (G.). — The Mechanics of Hoisting Machinery, including Accumulators, Excavators and Pile Drivers : A Text-Book for Technical Schools, and a Guide for Practical Engineers, Authorised Translation from the 2nd German ed. Edit. by *Karl-P. Dahlstrom*. With 177 Illusts. In-8°, 340 p. 15f,65.

5° *Applications industrielles de la Physique et de la Chimie.*

BIGGS (C.-H.-W.). — First Principles of Electrical Engineering : Being an Attempt to Provide an Elementary Book for Those who are Intending to Enter the Profession of Electrical Engineering. New ed., Partly Re-written and Extended. Illust. In-8°, XIV-260 p. Biggs and C°. 3f,15.

Electric Light and Power : A Short Treatise on their Advantages and Applications. In-8°. Electrical Installation C°. 1f,25.

GRIFFIN'S Electrical Engineer's Price Book, for the Use of Electrical, Civil, Marine and Borough Engineers, Architects, Railway Contractors, Local Authorities, etc. Edit. by *H.-J. Dowsing*. In-8°, 418 p. C. Griffin and C°. 10f,65.

HAWKINS (C.-C.) and WALLIS (F.). — The Dynamo : Its Theory, Design and Manufacture. With 190 Illusts. In-8°, 520 p. Whittaker. 13f,15.

JAKSON (D.-C.). — A Text-Book on Electro-Magnetism and the Construction of Dynamos. Vol. 1. In-8°, 292 p. Macmillan. 11f,25.

KAPP (G.). — Dynamos, Alternators and Transformers. Illust. In-8°, 483-x p. Biggs and C°. 13f,15.

KILGOUR (M.-H.), SWAN (H.) and BIGGS (C.-H.-W.). — Electrical Distribution : Its Theory and Practice. Illust. In-8°, 426 p. Biggs. 13f,15.

MAYCOCK (W.-P.). — Electric Lighting and Power Distribution. Part 3 (Final). With Original Questions and Ruled Pages for Notes. 70 Illusts and Diagrams. Complete Index to Parts 1, 2 and 3. In-8°, 240 p. Whittaker. 3f,15.

PREECE (W.-H.) and STUBBS (A.-J.). — A Manual of Telephony. Illust. In-8°, 526 p. Whittaker. 18f,75.

RAM (G.-S.). — The Incandescent Lamp and its Manufacture. In-8°, 220 p. « Electrician » Office. 9f,40.

RUSSELL (N.-S.). — Town Councillors' Handbook to Electric Lighting. Illust. In-8°, 44 p. Biggs and C°. 1f,25.

SALOMONS (Sir D.). — Electric Light Installations. Vol. 1 : The Management of Accumulators. 7th ed., Revised and Enlarged, with Illusts. An ed., mostly Re-written, of « *Electric Light Installations and the Management of Accumulators* ». In-8°, 164 p. Whittaker. 6f,25.

SWINTON (A.-A.-C.). — The Elementary Principles of Electric Lighting. With 16 Illusts. 3rd ed. In-8°, 40 p. Crosby Lockwood and Son. 1f,90.

URQUHART (J.-W.). — Electric Light Fitting : A Handbook for Working Electrical Engineers. 2nd ed., Revised, with large Additions. In-8°, 300 p. Crosby Lockwood and Son. 6f,25.

WEYMOUTH (F.-M.). — Drum Armatures and Commutators (Theory and Practice) : A Complete Treatise of the Theory and Construction of Drum Winding and of Commutators for Closed Coil Armatures ; Together with a Full Résumé of some of the Principal Points Involved in their Design, and an Exposition of Armature Reactions and Sparking. In-8°, 302 p. « Electrician » Office. 9f,40.

6° *Exploitation des mines. — Gîtes minéraux.*

CALVERT (A.-F.). — The Mineral Resources of Western Australia. In-8°, XII-179 p. G. Philip and Son. 2f,50.

CHURCHILL (Lord R.). — Men, Mines and Animals in South Africa. 3rd ed. In-8°, 356 p. Low. 7f,50.

COLLINS (J.-H.). — Principles of Metal Mining. With 101 Illusts. In-8°, 152 p. Collins. 1f,90.

DAVIES (E.-H.). — Machinery for Metalliferous Mines : A Practical Treatise for Mining Engineers, Metallurgists and Managers of Mines. With upwards of 300 Illusts. In-8°, 580 p. Crosby Lockwood and Son. 15f,65.

HUGHES (H.-W.). — A Text-Book of Coal Mining for the Use of Colliery Managers and others. 2nd ed. With very numerous Illusts. In-8°, 448 p. C. Griffin. 22f,50.

LUPTON (A.). — Mining : An Elementary Treatise on the Getting of Minerals. In-8°. Longmans. 11f,25.

MILNE (J.). — The Miner's Handbook : A Handy Book of Reference on the Subjects of Mineral Deposits, Mining Operations, Ore Dressing, etc. For the Use of Students and Others Interested in Mining Matters. In-16, 320 p. Crosby Lockwood and Son. 9f,40.

MOORE (C.-W.). — A Practical Guide for Prospectors, Explorers, and Miners : A Manual for all those Engaged or Interested in the Search for or Development of Metallic and other Mineral Deposits. With numerous Illusts. by *C.* and *A.-P. Wilson Moore*. In-8°, 294 p. Paul, Trübner and C°. 15 fr.

PAMELY (C.). — The Colliery Manager's Handbook. 2nd ed., Revised, with Additions. In-8°, 680 p. Crosby Lockwood and Son. 31f,15.

Parliamentary. — Mines. Inspectors' Reports for 1892. No. 6. Manchester and Ireland Districts. 1f,60.

—— —— Inspectors' Reports for 1892. No. 7. Liverpool District. 1f,50.

—— —— Great Western Colliery (Rhondda Valley) Disaster. Report. 0f,85.

—— Mineral Statistics of the United Kingdom for 1892. 1f,80.

PEEL (R.).— An Elementary Text-Book of Coal Mining : A Class Book for Elementary Students Preparing for the Science and Art Department Examination on Principles of Mining, and for Colliery Managers' Examination. In-12, 282 p. Blackie. 3f,15.

7° *Construction. — Chemins de fer.*

COOKE (C.-J.-B.). — Bristish Locomotives : Their History, Construction and Modern Development. With numerous Illusts. From Sketches and Diagrams by *C.-E. Jones* and *R.-A. Mc Lellan*, and Reproductions of Official Drawings and Photographs. In-8°, XVI-381 p. Whittaker and C°. 9f,40.

NEWMAN (J.). — Notes on Cylinder Bridge Piers, and the Well System of Foundations. Especially Written to Assist those Engaged in the Construction of Bidges, Quays, Docks, River Walls, Weirs, etc. In-8°, 136 p. Spons. 7f,50.

Parliamentary. — Railway Returns of the United Kingdom for 1892. 1f,15.

—— Railways. Continuous Brakes. Return. July-Dec., 1892. 1f,25.

—— Railways. Continuous Brakes. Return, Jan. to June, 1893. 1f,25.

—— —— Rates and Charges. Ist Report of Committee, Evidence and Appendix. 5f,35.

—— —— Signal Arrangements. Return for 1892. 1f,05.

—— Railway Accidents. Returns, Jan.-Mar., 1893. 0f,85.

—— Railways. Tralee and Dingle Light Railway. Major General *Hutchinson's* Report on Management, and Major *Mandarin's* Report on Accident at Camp, May 22, 1893. 0f,85.

PARSONS (A.). — The Liability of Railway Companies for Negligence towards Passengers. In-8°, H. Cox. 6f,25.

PATTON (W.-M.). — Practical Treatise on Foundations. Illust. In-8°. Gay and Bird. 31f,15.

PATTINSON (J.-P.). — British Railways : Their Passenger Services, Rolling Stock, Locomotives, Gradients and Express Speeds. With numerous Plates. In-8°, 254 p. Cassell. 15f,65.

PHILLIPS (P.). — The Forth Bridge in its Various Stages of Construction. Cheaper ed. In-f°. Edimbourg, R. Grant. Londres, Simpkin. 26f,25.

Round the Works of Our Great Railways. By various Authors. With Illusts. In-8°, 230 p. Arnold. 4f,40.

8° *Objets divers.*

DELANO (W.-H.). — Twenty Years' Practical Experience of Natural Asphalt and Mineral Bitumen. In-8°. Spons. 2f,65.

HEATH (A.-H.). — A Manual on Lime and Cement. In-8°, 220 p. Londres. 9 fr.

MATHESON (E.). — The Depreciation of Factories, Mines and Industrial Undertakings, and their Valuation. 2nd ed. In-8°, 140 p. Spons. 9f,40.

MOLESWORTH (G.-L.) and BRIDGES (R.). — Pocketbook of Useful Formulæ and Memoranda for Civil and Mechanical Engineers. 23rd ed., Revised and Enlarged. Oblong in-32. Spons. 7f,50.

OUVRAGES AMÉRICAINS.

Allen (W.-W.) and Avery (R.-B.). — California Gold Book. First Nugget : Its Discovery and Discoverer; Account of the Discovery of Gold in 1848-49. In-12, 439 p. Chicago, Donohue, Henneberry and C°. 8f,15.

Barr (W.-M.). — Pumping Machinery. With Illust. In-8°, 447 p. Philadelphie. 37f,50.

Braun (G.-H.). — Zur Lösung der socialen Frage. I. Sociale Fragen des Columbischen Katholiken-Congresses (September 1893). II. Der Anthracitkohlen-Strike in Pennsylvanien 1887/88 im Vergleich mit den Bergarbeiter-Bewegungen in Grossbritannien und Deutschland. Saint-Louis, Mo. In-8°, 88 p.; VIII-174 p.

Day (David-T.). — Mineral Resources of the United States (United States Geological Survey, Department of the Interior). In-8°, 630 p. Washington, Government Printing Office. 3f,15.

Hague (A.). — Geology of the Eureka District, Nevada (*Monographs of the United States Geological Survey*). With an Atlas and 8 Plates. In-4°, XVII-419 p. Washington, Government Printing Office. 33f,15.

Haupt (H.). — Street Railway Motors. In-12, 213 p. Philadelphie. 11f,25.

Kemp (J.-F.). — The Ore Deposits of the United States. In-8°, XV-302 p. New-York, Scientific publishing C°. 22 fr.

Lesquereux (L.). — The Flora of the Dakota Group : A Posthumous Work. Edit. by *F.-H. Knowlton* (*Monographs of the United States Geological Survey*). 66 Plates. In-4°, 400 p. Washington, Government Printing Office. 6f,90.

Mineral Industry (The), its Statistics, Technology and Trade in the United States and other countries from the carliest times to the end of 1892; being the Annual Statistical Supplement of the Engineering and Mining Journal. Edited by *R.-P. Rothwell*. In-8°, XXIV-628-115 p. New-York, Scientific Publishing C°. 11 fr.

Munroe (C.-E.). — Index to the Literature of explosives. Pt. II. In-8°, 43-195 p. Baltimore, Deutsch lithogr. and printing C°.

Powell (J.-W.). — Eleventh Annual Report of the United States Geological Survey to the Secretary of the Interior, 1889-90. Part 1, Geology; Part 2, Irrigation. 2 vols. 96 plates. In-8°. Washington, Government Printing Office.

Whitfield (R.-P.). — Gasteropoda and Cephalopoda of the Raritan Clays and Greensand Marls of New Jersey. (*Monographs of the United States Geological Survey.*) 50 Plates. In-4°, 402 p. Washington, Government Printing Office. 6f,25.

OUVRAGES ALLEMANDS.

1° *Mathématiques et Mécanique pures.*

Chittenden (J. B.). — A Presentation of the Theory of Hermite's Form of Lamé's Equation, with a Determination of the explicit Forms in Terms of the p Function for the Case n equal to three. Leipzig, B. G. Teubner. In-8°, 85 p. 3f,50. (3243)

Delin (C.). — Ueber zwei ebene Punktsysteme, die algebraisch auf einander bezogen sind. Lund, H. Möller. In-8°, 85 p. av 1 pl. 2 fr. (3633)

Gravelius (H.). — Die Anwendung der elliptischen Functionen bei Berechnung absoluter Störungen. Berlin, P. Stankiewicz. In-4°, 20 p. 2f,50. (2519)

—— Lehrbuch der höheren Analysis. Zum Gebrauche bei Vorlesungen an Universitäten und technischen Hochschulen. I. Bd. : Lehrbuch der Differentialrechnung. Berlin, F. Dümmler. In-8°, VIII-323 p. 7f,50. (3252)

Killing (W.). — Einführung in die Grundlagen der Geometrie. I. Bd. Paderborn, F. Schöningh. In-8°, X-357 p. av. 40 fig. 8f,75. (4414)

Lie (S.). — Vorlesungen über continuierliche Gruppen mit geometrischen und andern Anwendungen. Bearbeitet und herausgegeben von *G. Scheffers*. Leipzig, B. G. Teubner. In-8°, XII-810 p. av. fig. 30 fr. (4014)

Rohn (K.) und E. Papperitz. — Lehrbuch der darstellenden Geometrie. I. Bd. Leipzig, Veit und C°. In-8°, XVIII-384 p. av. fig. 13f,75. (Paraîtra en 2 volumes). (3656)

STRAUBEL (R.). — Theorie der Beugungserscheinungen kreisförmig begrenzter, symmetrischer, nicht sphärischer Wellen. (Extr. des *Abhandl. d. k. bayr. Akad. d. Wissenchaften*). Münich, G. Franz. In-4°, 82 p. 3f,75. (2908)

THOMAS (J.). — Die Kegelschnitte in rein projectiver Behandlung. Halle, L. Nebert. In-8°, VIII-181 p. av. fig. et 16 pl. 7f,50. (4023)

WEISS (E.). — Ueber die Bestimmung der Bahn eines Himmelskörpers aus drei Beobachtungen. (Extr. des *Denkschr. d. k. Akad. d. Wissenschaften*). Vienne, F. Tempsky. In-4°, 50 p. 3f,15. (4027)

WOLF (R.). — Handbuch der Astronomie, ihrer Geschichte und Litteratur. IV. Halbbd. Zürich, F. Schulthess. In-8°. II. Bd. p. 323-658, av. fig. (Fin). 10 fr. (2912)

2° *Physique et Chimie.*

BEIJERINCK (N. W.). — Ueber die Butylalkoholgährung und das Butylferment. Amsterdam. In-8°, 51 p. 1f,90. (2510)

BISCHOFF (C. A.). — Handbuch der Stereochemie. Unter Mitwirkung von *P. Walden* herausgegeben. I. Bd. Francfort-s.-Mein, H. Bechhold. In-8°, 448 p. av. 250 fig. et 1 pl. 17f,50. (3999)

BOLTZMANN (L.). — Vorlesungen über Maxwells Theorie der Elektricität und des Lichtes. II. Thl. Verhältniss zur Fernwirkungstheorie; specielle Fälle der Elektrostatik, stationären Strömung und Induction. Leipzig, J. A. Barth. In-8°, VIII-166 p. av. fig. et 2 pl. 6f,25. (4000)

EDER (J. M.) und ED. VALENTA. — Ueber das Emissions-Spectrum des Kohlenstoffes und Siliciums. I. Ueber das Linienspectrum des elementaren Kohlenstoffes im Inductionsfunken und über das ultraviolette Funkenspectrum nasser und trockener Holzkohle. II. Ueber das Emissionsspectrum des elementaren Siliciums und den spectrographischen Nachweis dieses Elementes. (Extr. des *Denkschr. d. k. Akad. d. Wissenchaften*). Vienne, F. Tempsky. In-4°, 23 p. av. 6 fig. et 1 pl. de spectres en héliogr. 2f,50. (2884)

HAILER (R). — Ueber einige amidirte Amidinbasen. Tübingen, F. Pietzcker. In-8°, 47 p. 1f,25. (3253)

Handbuch der Physik, unter Mitwirkung von F. Auerbach, F. Braun, E. Brodhun u. A. herausgegeben von *A. Winkelmann*. III. Bd. Livr. 13 et 14. Breslau, E. Trewendt. In-8°, avec fig. (2521)

—— —— III. Bd. Livr. 15 à 17. Breslau, E. Trewendt. In-8°, av. fig. Chaque livraison 4f,50. (3639)

Handwörterbuch der Chemie, herausgegeben von *A. Ladenburg*. Unter Mitwirkung von Abel, Ahrens, Alexander etc. XI. Bd. Breslau, E. Trewendt. In-8°, 724 p. av. fig. et 2 pl. 22f,50. (3254)

KAHLBAUM (G. W. A.). — Studien über Dampfspannkraftmessungen. In Gemeinschaft mit P. Schroeter und andern Mitarbeitern. Bâle, B. Schwabe. In-8°, XII-315 p. av. 12 pl. 20 fr. (3859)

KÜHLING (O.). — Handbuch der stickstoffhaltigen Orthocondensationsproducte. Berlin, R. Oppenheim. In-8°, VII-628 p. 17f.50. (4416)

LÖWY (E.). — Ueber die Einwirkung der Parawolframate des Natriums, Kaliums und Ammoniums auf die entsprechenden normalen Vanadate. Hambourg, L. Voss. In-8°, 45 p. 1f,25. (3259)

NERNST (W.). — Theoretische Chemie vom Standpunkte der Avogadro'schen Regel und der Thermodynamik. Stuttgart, F. Enke. In-8°, XIV-589 p. av. 26 fig. 16f,25. (2119)

NERNST (W.) und A. HESSE. — Siede- und Schmelzpunkt, ihre Theorie und praktische Verwerthung mit besonderer Berücksichtigung organischer Verbindungen. Brunswick, F. Wieweg und Sohn. In-8°, VII-122 p. av. 11 fig. 2f,50. (4422)

PAULI (R.). — Bestimmung der Empfindlichkeitskonstanten eines Galvanometers mit astatischem Nadelpaar und aperiodischer Dämpfung. Göttingen, Vandenhoeck und Ruprecht. In-4°, V-58 p. av. 5 fig. et 9 tabl. 3f,50. (4424)

SCHEFFLER (H.). — Die Aequivalenz der Naturkräfte und das Energiegesetz als Weltgesetz. Leipzig, F. Foerster. In-8°, IV-XXI-585 p. avec 2 pl. et 2 portr. 11f,25. (4020)

TRAUBE (J.). — Physikalisch-chemische Methoden. Hambourg, L. Voss. In-8°, X-234 p. av. 97 fig. 6f,25. (4025)

VOGEL (J. H.). — Die Wirkung der gasförmigen Zersetzungsprodukte faulender organischer Substanzen auf die Phosphorsäure und ihre Kalksalze. Berlin, P. Parey, In-8°, 66 p. 1f,25. (4026)

3° *Minéralogie. — Géologie. — Paléontologie.*

FELIX (J.) und H. LENK. — Beiträge zur Geologie und Palaeontologie der Republik Mexico. II. Thl. 1 Heft. Leipzig, A. Felix. In-4°, 54 et LV p., av. 5 pl. 15 fr. (2886)

GANDER (M.). — Erdschichten und Erdgeschichte. Ein Wort über die Altersbestimmung der Erdschichten (Extr. de *Natur*

und Offenbarung). Münster, Aschendorff. In-8°, 69 p. 1f,50. (3251)

Groth (P.) und F. Grünling. — Repertorium der mineralogischen und krystallographischen Literatur vom Anfang des Jahres 1885 bis Anfang des Jahres 1891 und Generalregister der *Zeitschrift für Crystallographie und Mineralogie* XI-XX. Bd. II. Thl. (Generalregister von *F. Grünling*). Leipzig, W. Engelmann. In-8°, III-287 p. 15 fr. (2888)

v. Gümbel (K. W.). — Geologie von Bayern. II. Bd. Livr. 6 et 7. Cassel, Fischer. In-8°. Chaque livraison 3f,75. (2520)

Hecht (B.). — Anleitung zur Krystallberechnung. Leipzig, J. A. Barth. In-8°, V-76 p. av. pl. 3f,75. (4008)

Hintze (C.). — Handbuch der Mineralogie. Livr. 7. Leipzig, Veit und C°. In-8°, p. 961-1120, av. fig. 6f,25. (3640)

Koken (E.). — Die Vorwelt und ihre Entwickelungsgeschichte. Leipzig, T. O. Weigel Nachf. In-8°, VII-654 p. av. 117 fig. et 2 cartes. 17f,50. (2891)

Korschelt (E.) und K. Heider. — Lehrbuch der vergleichenden Entwickelungsgeschichte der wirbellosen Thiere. Specieller Thl. 3. Heft. Iéna, G. Fischer. In-8°, p. 909-1509, av. 359 fig. 17f,50. (2892)

Lepsius (R.). — Geologie von Attika. Ein Beitrag zur Lehre vom Metamorphismus der Gesteine. Berlin, D. Reimer. In-4°, VIII-196 p. av. pl. et 1 atlas de 9 cartes géol. 67f,50. (3649)

Löwl (F.). — Die gebirgsbildenden Felsarten. Eine Gesteinskunde für Geographen. Stuttgart, F. Enke. In-8°, 159 p. av. 25 fig. 5 fr. (4016)

Martini und Chemnitz. — Systematisches Conchylien-Cabinet. In Verbindung mit Philippi, L. Pfeiffer, Duncker etc. neu herausgegeben und vervollständigt von *H. C. Küster*, nach dessen Tode fortgesetzt von *W. Kobelt*. Liv. 395-398. Nüremberg, Bauer und Raspe. In-4°, av. pl. color. (2526)

—— —— Liv. 399 et 400. Nüremberg, Bauer und Raspe. In-4°, av. pl. color. Chaque livraison, 11f,25. (3652)

—— —— Sect. 132. Nüremberg, Bauer und Raspe. In-4°, av. pl. color. 33f,75. (3653)

Pohlig (H.). — Eine Elephantenhöhle Siciliens und der erste Nachweis des Cranialdomes von Elephas antiquus. (Extr. des *Abhandl. d. k. bayr. Akad. d. Wissenschaften.*) Munich, G. Franz. In-4°, 37 p. av. 4 fig. et 5 pl. 3f,50. (2121)

v. Rath (G.). — Sach- und Ortsverzeichnis zu den mineralogischen und geologischen Arbeiten von G. vom Rath. Bearbeitet von *W. Bruhns* und *K. Busz*. Leipzig, W. Engelmann. In-8°, V-197 p. 7f,50. (2530)

Reiss (W.) und A. Stübel. — Reisen in Südamerika. Das Hochgebirge der Republik Ecuador. I. Petrographische Untersuchungen. I. West-Cordillere, bearbeitet im mineralogisch-petrographischen Institut der Universität Berlin. Livr. 2. Berlin, A. Asher und C°. In-4°, p. 141-223, av. 3 pl. 10 fr. (4019)

Sterzel (J.-T.). — Die Flora des Rothliegenden im Plauenschen Grunde bei Dresden. (Extr. des *Abhandl. d. k. sächs. Gesellschaft d. Wissenschaften.*) Leipzig, S. Hirzel. In-8°, XI-172 p. avec 13 pl. 15 fr. (2127)

Walther (J.). — Einleitung in die Geologie als historische Wissenschaft. Beobachtungen über die Bildung der Gesteine und ihrer organischen Einschlüsse. I. Thl. Binomie des Meeres. Beobachtungen über die marinen Lebensbezirke und Existenzbedingungen. Iéna, G. Fischer. In-8°, XXX-196 p. 7f,50. (2535)

—— II. Thl. Die Lebensweise der Meeresthiere. Beobachtungen über das Leben der geologisch wichtigen Thiere. Iéna. G. Fischer. In-8°, p. 197-531. 10f,65. (2911)

Zittel (K.-A.). — Handbuch der Palaeontologie. Unter Mitwirkung von *W. Ph. Schimper* und *A. Schenk* herausgegeben. I. Abth. Palaeozoologie. Livr. 15. (IV. Bd. 2. Lfg.) Munich, R. Oldenbourg. In-8°, p. 305-592, av. 250 fig. 13f,15. (3272)

4° *Mécanique appliquée et Machines.*

Gutermuth (M.-F.), E. Reichel, A. Riedler. — Maschinenarbeit und Ausnutzung der Naturkräfte. I. Kraft-, Licht-, Wärme- und Kälteverteilung in Städten, Ausnutzung von Wasserkräften, Seil-Strassenbahnen. (Extr. de la *Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure.*) Berlin, J. Springer. In-4°, III-127 p. av. 169 fig. 8f,75. (3486)

—— —— Maschinenarbeit und Ausnutzung der Naturkräfte in Amerika. II. (Extr. de la *Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure.*) Berlin, J. Springer. In-4°, III-159 p. av. 352 fig. et 1 pl. 8f,75. (4657)

v. Ihering (A.). — Die Gebläse. Bau und Berechnung der Maschinen zur Bewegung, Verdichtung und Verdünnung der Luft. Berlin, J. Springer. In-8°, XI-708 p. av. 464 fig. et 3 pl. 25 fr. (2749)

Klimpert (R.). — Lehrbuch der Bewegung flüssiger Körper (Hydrodynamik). II. Bd. 1. Hälfte : Die Bewegungserscheinun-

gen des Wassers in Kanälen und Flüssen, sowie der dabei ausgeübte Stoss und Widerstand. Stuttgart, J. Maier, In-8°, VIII-228 p. av. fig. 6f,25. (4012)

LUTSCHAUNIG (V.). — Die Definizionen und Fundamentalsätze der Theorie des Gleichgewichtes schwimmender Körper. Eine kritische Besprechung der Stabilitätstheorie der Schiffe. Trieste, F. H. Schimpff. In-8°, VIII-66 p. av. 10 pl. 7f,50. (3129)

POHLHAUSEN (A.). — Die Dampfkessel- und Dampfmaschinenanlagen, deren Berechnung, Konstruktion, Ausführung und Beurteilung. I. Die Dampfkesselanlagen. Livr. 2. Mittweida, Polytechn. Buchh. In-8°, VII p. et p. 125-312, av. fig. et 18 pl. in-fol. 11f,25. (4267)

5° *Construction. — Chemins de fer.*

BRAUN (F.-K.). — Der Eisenbahn-Güter-Abfertigungsdienst. Leitfaden und Handbuch für Dienstanfänger der Eisenbahn-Verwaltung, Eisenbahn-Beamte, Spediteure, Geschäftsleute und sonstige Verkehrs-Interessenten. Elberfelrd, J. Loewenstein und C°. In-8°, 358 p. av. fig. 7f,50. (3204)

HASELER (E.). — Der Brückenbau. Ein Handbuch zum Gebrauche beim Entwerfen von Brücken in Eisen, Holz und Stein, sowie beim Unterrichte an technischen Hochschulen. I. Th. Die eisernen Brücken. Livr. 2. Brunswick, F. Vieweg und Sohn. In-4°, p. 129-240, av. fig. et 20 pl. 20 fr. (4261)

KAUFMANN (W.). — Die mitteleuropäischen Eisenbahnen und das internationale öffentliche Recht. Leipzig, Duncker und Humblot. In-8°, XIV-289 p. 7f,50. (3966)

VAILLOTH (K.). — Die Drahtseilbahnen der Schweiz. Ergebnisse einer auf Veranlassung des kaiserl. Ministeriums für Elsass-Lothringen unternommenen Studienreise. Wiesbaden, C. W. Kreidel. In-4°, V-82 p. av. 10 pl. 13f,75. (3870)

6° *Législation. — Économie politique et sociale.*

EGER (G.). — Handbuch des preussischen Eisenbahnrechts. II. Bd. Livr. 3. Breslau, Kern. In-8°. 2f,50. (2460)

—— Eisenbahnrechtliche Entscheidungen deutscher österreichischer und ungarischer Gerichte. Zusammengestellt, bearbeitet und herausgegeben. X. Bd. 4 Hefte. Berlin, C. Heymann. In-8°, 1. Heft, 96 p. 12f,50. (3947)

—— Das internationale Uebereinkommen über den Eisenbahnfrachtverkehr. Vom 14. Oktober 1890. 3. Heft. Berlin, C. Heymann. In-8°, VII p. et p. 519-700. 5 fr. (3948)

GEBHARD (H.). — Die nach dem Invaliditäts- und Altersversicherungsgesetze versicherten Personen. Handbuch zur Feststellung des der Invaliditäts- und Altersversicherung unterstellten Personenkreises. Berlin, C. Heymann. In-8°, X-328 p. 7f,50. (4360)

GLEIM (W.). — Das Recht der Eisenbahnen in Preussen. Systematisch dargestellt. 1. Bd. Das Eisenbahnbaurecht. Die rechtliche Begründung und der Bau der Eisenbahnen in Preussen. 2. Hälfte. 2. Abth. Berlin, F. Vahlen. In-8°, XIII p. et p. 341-484. 4f,25. (3957)

MENZEL (A.). — Die Arbeiterversicherung nach österreichischem Rechte. Leipzig, Duncker und Humblot. In-8°, XIX-504 p. 12f,50. (2869)

PILOTY (R.). — Das Reichs-Unfallversicherungsrecht, dessen Entstehungsgeschichte und System. III. Bd. Dresde, G. Hertz. In-8°, VII p. et p. 621-811 (Fin.) 5 fr. L'ouvrage complet 19f,40. (3603)

7° *Objets divers.*

v. BAUERNFEIND (C.-M.). — Das Präcisionsnivellement in Bayern rechts des Rheins. Ausgeführt unter Leitung von *C. M. v. B.* Endgültig bearbeitet von *C. Oertel.* Veröffentlichung der königl. bayerischen Commission für die internationale Erdmessung. Munich, G. Franz. In-4°, III-192 p. av. 2 pl. 10 fr. (2509)

CHRISTESCU (S.). — Combustibilii industriali. Cu o introducere asupra energiei universale. Bucharest. In-8°, 74 p. 6f,65. (3482)

KOCH (G.). — Die Lösung des Flugproblems und das Luftschiff der Zukunft. Munich, H. Lukaschik. In-8°, 32 p. av. 3 pl. 2f,50. (4415)

OUVRAGES RUSSES.

CHWOLSON (O.). — Actinometrische Untersuchungen zur Construction eines Pyrheliometers und eines Actinometers. (Extr.

du *Repertorium für Meteorologie*). Saint-Pétersbourg. In-4°, VII-150 p. av. 3 fig. et 1 pl. 6f,60.

Industries of Russia. By the Department of Trade and Manufactures Ministry of Finance for the World's Columbian Exposition at Chicago. Editor of the English Translation J. Mt. Crawford. Vols. I, II and V. Saint-Pétersbourg, C. Ricker. In-8°, XV-LIV-576 p.; XII-256 p., av. fig. 22f,50.

v. KNABBE (W.). — Fraiser und deren Rolle bei dem derzeitigen Stande des Maschinenbaues. Auf theoretisch-praktischer Grundlage bearbitet. II. Thl. Charkow. In-8°, III p. et p. 171-340, avec un atlas de 39 pl. 5 fr.

SCHWATSCHKA (K.). — Collection de remarques mathématiques (en russe). Part. I. Moscou. In-8°, 95 p. 6f,25.

SENIGOFF (N.). — Essai de perfectionnement des éléments des mathématiques (en russe). Fasc. I. Moscou. In 8°, V-167 p. 7f,50.

SOKOLOW (N.). — Die untertertiären Ablagerungen Südrusslands. (Extr. des *Mémoires du Comité géologique*). Saint-Péterbourg, Eggers et C°. In-4°, X-328 p. av. 2 cartes. 16f,90.

TOLSTOPIATOW (M.). — Recherches minéralogiques. Ed. posthume. Moscou. In-8°, XXVIII-136 p. av. 63 fig., portrait et 5 pl. 8f,75.

OUVRAGES ESPAGNOLS.

VILANOVA Y PIERA (J.) y RADA Y DELGADO. — Geologia y protohistoria Iberica. Madrid. In-4°, VIII-652 p. 40 fr.

OUVRAGES ITALIENS.

1° *Mathématiques et Mécanique pures.*

BERZOLARI (L.). — Sull' assonometria ortogonale considerata come metodo di rappresentazione : nota. Pavie, tip. fr. Fusi. In-4°, 24 p. av. 8 pl. (8612)

BIDDEL (AIRY G.). — Gravitazione : spiegazione elementare delle principali perturbazioni nel sistema solare. Traduzione italiana, con note ed aggiunte del prof. *Francesco Porro*. Milan, U. Hoepli. In-16, XXIIIJ-176 p. (6902)

CERRUTI (V.). — Sulla deformazione di un involucro sferico isotrofo per dati spostamenti di punti delle due superficie limiti : nota. Pise, tip. Pieraccini. In-8°, 20 p. (Extr. du *Nuovo Cimento*.) (4748)

CHINI (M.). — Esercizî di calcolo infinitesimale. Livourne, R. Giusti. In-16, VIIJ-263 p. 4 fr. (4749)

ENRIQUES (F.). — Ricerche di geometria sulle superficie algebriche : memoria. Turin, C. Clausen. In-4°, 64 p. (Extr. des *Memorie d. r. accad. d. scienze di Torino.*) (8982)

GREMIGNI (M.). — Ancora a proposito del postulato dell' equivalenza e di altre questioni geometriche : seconda risposta al prof. Lazzeri. Florence, stab. tip. Fiorentino. In-8°, 8 p. (9445)

GUGLIELMI (A.). — Elementi di geometria della stella. Naples, tip. G.-M. Priore. In-8°, 15 p. av. planche. (5235)

MARCIALIS (E.). — Formula per la somma delle n incognite in un sistema di n equazioni di primo grado. Milan, tip. E. Reggiani. In-8°, 7 p. (7854)

MONTESANO (D.). — Su di un complesso di rette terzo grado : nota. Bologne, tip. Gamberini e Parmeggiani. In-4°, 31 p. (Extr. des *Memorie d. r. accad. d. scienze dell' istit. di Bologna.*) (8251)

NACCARI (G.). — Deduzione delle principali formole relative alla curvatura delle superficie in generale e dello sferoide in particolare, con applicazione al meridiano di Venezia. Venise, tip. succ. M. Fontana. In-8°, 45 p. (Extr. de l'*Ateneo veneto.*) (7855)

NEPPI MODONA (A.). — Un' applicazione della trasformazione funzionale di Laplace e della sua inversa : nota. Bologne, tip. Gamberini e Parmeggiani. In-8°, 12 p. (6017)

PAOLONI (P.). — Disegno assonometrico. Milan, U. Hoepli. In-16, 122 p. av. fig. (6914)

PASQUALE (V. DE). — Sul luogo dei punti dell' ellissoide pei quali la curvatura di Gauss è costante : memoria. Messine, A. Trimarchi. In-8°, 30 p. (6020)

PIERI (M.). — Di due proprietà caratteristiche per superficie elicoidali : nota. Lucca, tip. Giusti. In-8°, 7 p. (8253)

PINCHERLE (S.). — Algebra complementare. Parte II (Teoria delle equazioni). Milan, U. Hoepli. In-16, 169 p. av. fig. (4756)

—— Sull' interpolazione : memoria. Bologne, tip. Gamberini e

Parmeggiani. In-4°, 28 p. (Extr. des *Memorie d. r. accad. d. scienze dell' istit. di Bologna.*) (5242)

Pizzetti (P.). — Calcolo grafico delle attrazioni locali dovute alle irregolarità apparenti della crosta terrestre. Gênes, tip. A. Ciminago. In-8°, 9 p. av. planche. (Extr. des *Atti della soc. ligustica di sc. naturali.*) (8627)

Porta (F.). — Discussioni delle equazioni generali delle coniche e delle quadriche in coordinate cartesiane. Turin, tip. G. Candeletti. In-8°, 36 p. (5243)

Re (A. del). — Sulle superficie del 5° ordine con cubica doppia e 2, 3 punti tripli. Modène, tip. della Soc. tipografica. In-4°, 16 p. (Extr. des *Memorie d. r. accad. di scienze, lettere ed arti di Modena.*) (6917)

Ruffini (F.-P.). — Delle linee piane algebriche le pedali delle quali possono essere curve che hanno potenza in ogni punto del loro piano : memoria. Bologne, tip. Gamberini e Parmeggiani. In-4°, 11 p. (Extr. des *Memorie d. r. accad. d. scienze dell' istit. di Bologna.*) (4760)

Vecchi (S.). — Per la diffusione dei disegni axonometrici. Parme, tip. Rossi Ubaldi. In-4°, 18 p. av. planche. (4325)

2° *Physique et Chimie.*

Allara (V.). — Il magnetismo negli animali e nelle piante. Milan, Galli di C. Chiesa e F. Guindani. In-16, 138 p. 2f,50. (6898)

Battelli (A.). — Sullo stato della materia nel punto critico : ricerche. Pise, tip. Pieraccini. In-8°, 27 p. (Extr. du *Nuovo Cimento.*) (4744)

—— Sulle proprietà termiche del vapore : memoria. Parte V (Studio del vapore di alcool rispetto alle leggi di Boyle e di Gay-Lussac). Turin, C. Clausen. In-8°, 34 p. av. 2. pl. (Extr. des *Memorie d. r. accad. d. scienze di Torino.*) (8979)

Baroni (G.). — Sul metodo ebulliometrico di Beckmann per la determinazione dei pesi molecolari : tesi. Bologne, tip. già Compositori. In-8°, 27-44 p. av. planche. (6900)

Bertelli (T.). — Appunti intorno ad una memoria sulla scoperta della declinazione magnetica fatta da Cristoforo Colombo. Rome, tip. Forzani e C. In-8°, 13 p. av. fig. (Extr. de la *Rivista marittima.*) (7401)

Bizzarri (D.). — Tabelle di analisi chimica qualificativa dei principali corpi inorganici, con spiegazioni teorico-pratiche e con

alcuni saggi su materiali da costruzione. Disp. 4. Turin, A.-F. Negro. In-8°, p. 97-128. 1 fr. la livraison. (4317)

—— —— Disp. 5. In-8°, p. 129-160. 1 fr. la livraison. (6008)

—— —— Disp. 6 (ultima). In-8°, p. 161-210. 1f,50. (6903)

Boeris (G.). — Azione dell' acido nitroso sopra l' anetolo : tesi. Bologne, soc. tip. già Compositori. In-8°, 42 p. (6904)

Bonatti (V.). — Moderne vedute intorno ai concetti fondamentali della fisica e della meccanica : cenni. Padoue, tip. L. Crescini e C. In-16, 79 p. 1f,50. (7403)

Canestrini (E.). — A proposito delle esperienze di O. Lodge sulle scariche elettriche : applicazione ai parafulmini. Padoue, tip. Prosperini. In-8°, 39 p. av. fig. (Extr. des *Atti d. soc. veneto-trentina di sc. naturali.*) (8614)

Cavani (F.). — Il cannocchiale anallatico del Porro ad anallatismo centrale : memoria. Bologne, tip. Gamberini e Parmeggiani. In-4°, 24 p. av. planche. (Extr. des *Memorie d. r. accad. d. scienze dell' istit. di Bologna.*) (6010)

Chistoni (C.). — Sulla misura del coefficiente di temperatura dei magneti col magnetometro dei seni. Modène, tip. della Soc. tipografica. In-4°, 33 p. (Extr. des *Memorie d. accad. di scienze, lettere ed arti di Modena.*) (6911)

Ciamician (G.) e P. Silber. — Sul dimetossilchinone simmetrico : nota. Bologne, tip. Gamberini e Parmeggiani. In-4°, 5 p. (Extr. des *Memorie d. r. accad. d. scienze dell' istit. di Bologna.*) (4320)

—— —— Sulla cosidetta Leucotina e sulla Cotogenina : memoria. Bologne, tip. Gamberini e Parmeggiani. In 4°, 16 p. (Extr. du même recueil.) (4750)

Costa (T.). — Sulla spettrochimica dell' azoto : nota. Ferrare, tip. Bresciani. In-8°, 7 p. (6402)

Ferrucci (G.). — Sulla decomposizione elettrolitica del sal marino in soluzione. Naples, tip. F. Raimondi. In-8°, 10 p. (7852)

Franzeri (V.). — Preparazione del protossido di azoto od ossidulo di azoto (Az^2O) per mezzo dello zinco ed acido nitrico diluito convenientemente. Asti, tip. Paglieri e Raspi. In-8°, 2 p. (9443)

Garibaldi (P.-M.). — Stato meteorologico e magnetico di Genova per l'anno 1892 (R. università di Genova : osservatorio meteorologico). Gênes, tip. fr. Pagano. In-4°, 35 p. (9857)

Lupi (A.). — Sulla natura della fosforescenza animale. Gênes, tip. Ciminago. In-8°, 7 p. (8620)

Magnanini. — Lezioni di chimica (Università di Modena). Modène, lit. G. Pizzolotti. In-8°, 389 p. (6016)

Marchi (L. de). — Sulla teoria dei cicloni : ricerche. Milan, U. Hoepli. In-4°, 44 p. av. 15 pl. (8621)

Masini (V.). — Dell' acqua minerale di Luiano : relazione d' analisi chimica. Castelfiorentino, tip. Giovannelli e Carpitelli. In-16, 22 p. (5238)

Nota sul procedimento seguito dai signori Mallard e Le Chatelier per determinare il calore specifico dei gas ad alta temperatura. Turin, Unione tipografico-editrice torinese. In-8°, 16 p. av. fig. (8624)

Plancher (G.). — Sulla preparazione del para-bromotimol : nota. Parme, tip. Battei. In-8°, 7 p. (7410)

Razzaboni (C.). — Sull' altezza dei getti d' acqua di luci scolpite in pareti sottili in rapporto col carico che li produce e col diametro delle luci dell' efflusso : memoria. Bologne, tip. Gamberini e Parmeggiani. In-4°, 8 p. av. pl. (Extr. des *Memorie d. r. accad. d. scienze dell' istit. di Bologna.*) (5244)

Sestini (F.) e D. Martelli. — Analisi chimica dell' acqua acidula ferro-manganesifera della polla di Piersanti presso Nugola (Collesalvetti). Pise, tip. T. Nistri e C. In-8°, 26 p. (6919)

Somigliana (C.). — Intorno ad un problema del signor Voigt : aggiunta alla memoria Ricerche sulla deformazione ed i fenomeni piezoelettrici in un cilindro cristallino. Pavie, tip. fr. Fusi. In-8°, 6 p. (Extr. du *Giornale di mineralogia, cristallografia e petrografia.*) (4323)

Vassallo (D.). — Sullo sdoppiamento dei derivati benzoilici delle α — aldossime. Palerme, tip. Lo Statuto. In-8°, 8 p. (6028)

Ventura (N.). — Sulla teoria della dinamo Palmieri : memoria. Sassari, tip. G. Dessi. In-8°, 42 p. av. planche. (6250)

Venturoli (G.). — Sull' azione dell' idrogeno arsenicale sul jodo in presenza dell' acqua : nota. Bologne, tip. Gamberini e Parmeggiani. In-4°, 8 p. (Extr. des *Memorie d. r. accad. d. scienze dell' istit. di Bologna.*) (7858)

Viola (C.). — Sopra un problema relativo alle lamine sottili anisotrope. Pavie, tip. fr. Fusi. In-8°, 12 p. av. planche. (Extr. du *Giornale di mineralogia, cristallografia e petrografia.* (9447)

Vitali (D.). — Sull' azione dell' idrogeno arsenicale, antimoniale e fosforato sulle soluzioni di nitrato d' argento : memoria. Bologne, tip. Gamberini e Parmeggiani. In-4°, 16 p. (Extr. des

Memorie d. r. accad. d. scienze dell' istit. di Bologna.) (6029

Vitali (V.). — Acustica fisica o fisica del suono. Milan, tip. F. Vallardi. In-16°, vij-144 p. av. fig. 1f,50. (7418)

—— Il calorico : conservazione dell' energia. Milan, tip. F. Vallardi. In-16°, viij-149 p. av. fig. 1f,50. (7419)

Zinno (S.). — Nuovi studî sperimentali sul tricloruro di boro : memoria. Naples, tip. della r. Università. In-4°, 3 p. (Extr. des *Atti dell' accademia pontaniana.*) (4326)

3° *Minéralogie. — Géologie. — Paléontologie.*

Achiardi (G. d').— Le tormaline del granito elbano. Parte I. Pise, tip. T. Nistri e C. In-8°, 95 p. av. planche. (Extr. des *Atti d. soc. toscana di sc. naturali.*) (9852)

Baretti (M.). — Geologia della provincia di Torino : atlante di sette carte e ventisette profili in otto tavole in cromolitografia. Turin, F. Casanova. In-fol., 15 pl. (7398)

Bombicci-Porta (L.). — Rivendicazione della priorità degli studî e delle conclusioni sul sollevamento dell' Appennino emiliano per via di scorrimento e di pressioni laterali, e la diretta azione della gravità : nota. Bologne, tip. Gamberini e Parmeggiani. In-8°, 8 p. (Extr. du *Rendiconto delle sessioni d. r. accad. d. scienze dell' istit. di Bologna.*) (6009)

Bonbicci (L.). — Alla cerca di meraviglie nelle vallate e sui monti del bolognese. — Il monte Gatta et il suo panorama : discorso sulla orografia e geologia del bolognese (A Castiglione de' Pepoli il 12 luglio 1882). Bologne, soc. tip. già Compositori. In-8°, 28 p. av. planche. (6905)

—— Le notevoli particolarità dei cristalli mimetici cubiformi di pirite gialla, scoperti nelle marne grigie terziarie antiche dei monti della Riva (Valle del Dardagna, appennino bolognese) : memoria. Bologne, tip. Gamberini e Parmeggiani. In-4°, 48 p. av. 7 pl. (Extr. des *Memorie d. r. accad. d. scienze dell. istit. di Bologna.*) (6906)

Bonarelli (G.). — *Hecticoceras*, novum genus Ammonidarum. Modène, Soc. tipogr. modenese. In-8°, 32 p. av. fig. (Extr. du *Bull. della soc. malacologica italiana.*) (6907)

Capellini (G.). — Resti di mastodonti nel depositi marini plioceni della provincia di Bologna : memoria. Bologne, tip. Gamberini e Parmeggiani. In-4°, 10 p. av. planche. (Extr. des *Memorie d. r. accad. d. scienze dell' istit. di Bologna.*) (5232)

—— Litossillo, con lavori di insetti già illustrati come fichi

fossili : nota. Bologne, tip. Gamberini e Parmeggiani. In-4°, 6 p. (Extr. du même recueil.) (6910)

Chelussi (I.). — Alcune rocce dell' isola di Samos : studio microscopico. Pavie, tip. fr. Fusi. In-8°, 6 p. (Extr. du *Giornale di mineralogia, cristallografia e petrografia.*) (4319)

Corti (B.). — Sopra due nuove specie di fossili infraliasici : contribuzione alla paleontologia dell' Infralias lombardo. Pavie, tip. succ. Bizzoni. In-8°, 3 p. avec planche. (Extr. du *Bollettino scientifico.*) (5670)

Fittipaldi (E.). — La vallata del Basento : contributo allo studio della geologia, della meteorologia e della flora lucana. Potenza, tip. edit. Garramone e Marchesiello. In-8°, 107 p. (6013)

Foresti (L.). — Enumerazione dei brachiopodi e dei molluschi pliocenici dei dintorni di Bologna. Modène, Soc. tipogr. modenese. In-4°, 18 p. av. planche. (Extr. du *Bull. della soc. malacologica italiana.*) (6912)

Fornasini (C.). — Contributo alla conoscenza della microfauna terziaria italiana ; foraminiferi delle marne messinesi, collezione G. Seguenza (Museo di Bologna) : nota. Bologne, tip. Gamberini e Parmeggiani. In-4°, 16 p. av. pl. (Extr. des *Memorie d. r. accad. d. scienze dell' istit. di Bologna.*) (7853)

Fucini (A.). — Fossili della *Volite inferiore* del Monte Grappa nel Trevisano. Pise, tip. T. Nistri e C. In-8°, 6 p. (Extr. des *Proc. verb. d. soc. toscana di sc. naturali.*) (6403)

Giorgis (G.). — Analisi delle arene di Parghelia in Calabria. Cuneo, tip. Oggero et Brunetti. In-8°, 4 p. (9861)

Gismondi (A.). — Il transformismo e le scienze positive : conferenza tenuta all' associazione letteraria-scientifica Cristoforo Colombo la sera del 14 aprile 1893. Gênes, tip. della Gioventù. In-8°, 28 p. (8983)

Mariani (E.). — Note paleontologiche sul Trias superiore della Carnia occidentale. Udine, tip. Cooperativa. In-8°, 25 p. (Extr. des *Annali del r. istit. tecnico di Udine.*) (5671)

Melzi (G.). — Ricerche geologiche e petrografiche sulla valle del Masino. Pavie, tip. fr. Fusi. In-8°, 48 p. av. 8 pl. (Extr. du *Giornale di mineralogia, cristallografia e petrografia.*) (6408)

Negri (A.). — Nuove osservazioni sopra i. Trionici delle ligniti di Monteviale : nota. Padoue, tip. Prosperini. In-4°, 12 p. (6018)

Pantanelli (D.). — Appunti per servire alla storia dell' istituto di geologia e mineralogia della r. università di Modena, 1882-1892. Modène, tip. G. T. Vincenzi e nipoti. In-8°, 80 p. av. pl. (Extr. des *Atti d. soc. dei naturalisti di Modena.*) (6019)

Pantanelli (D.). — I terreni quadernari e recenti dell' Emilia. Modène, tip. della Soc. tipografica. In-4°, 84 p. (Extr. des *Memorie d. r. accad. di sc., lettere ed arti di Modena.*) (8625)

Peola (P.). — Sopra una Palma fossile del Piemonte : nota. Gênes, tip. A. Ciminago. In-8°, 6 p. (Extr. de la *Malpighia.*) (8252)

Portis (A.). — Contribuzioni alla storia fisica del bacino di Roma e studî sopra l' estensione da darsi al Pliocene superiore : memoria in tre parti. Turin, L. Roux et C. In-8°, 293 p. av. 3 pl. 20 fr. (6412)

Ragazzoni (G.). — Catalogo della raccolta che accompagna il profilo geognostico delle Alpi nella Lombardia orientale. Brescia, tip. F. Apollonio. In-8°, 38 p. (6916)

Reyer (E.). — Cause delle dislocazioni e della formazione delle montagne. Traduzione sulla prima edizione tedesca, per il dott. *Francesco Virgilio.* Turin, tip. Bona. In-8°, 48 p. 2 fr. (4322)

Rodriguez (J.-S.). — Note sulle rocce vulcaniche e principalmente su i tufi dei dintorni immediati di Roma. Rome, tip. della reale accad. dei Lincei. In-4°, 18 p. av. pl. (8255)

Rovereto (G.). — La serie degli scisti e delle serpentine antiche in Liguria. Gênes, tip. A. Ciminago. In-8°, 48 p. av. 3 pl. (Extr. des *Atti d. soc. ligustica di sc. naturali.*) (4759)

Sibilla (G.). — Raccolta di note caratteristiche istruttive scoperte dallo studio teorico-pratico della geologia e mineralogia. Cuneo, tip. Isoardi. In-8°, 89 p. av. fig. 1 fr. (7414)

Simonelli (V.). — Fossili terziari e post-pliocenici dell' isola di Cipro, raccolti dal dott. A. Bergeat : memoria. Bologne, tip. Gamberini e Parmeggiani. In-4°, 12 p. av. fig. (Extr. des *Memorie d. r. accad. d. scienze dell' istit. di Bologna.*) (6920)

Somigliana (C.). — Arthur Schoenflies, Sistemi cristallini e struttura dei cristalli (Krystallsysteme und Krystallstructur), Teubner, Leipzig : (recensione). Pavie, tip. fr. Fusi. In-8°, 13 p. (Extr. du *Giornale di mineralogia, cristallografia e petrografia.*) (6921)

Surdi (D.). — Interruttore elettrico automatico per avvisotari sismici. Trani, tip. V. Vecchi e C. In-4°, 3 p. av. fig. (7417)

Trabucco (G.). — Sulla vera posizione di terreni terziarî del bacino piemontese. Parte I. Pise, tip. Nistri e C. In-8°, 49 p. av. 2 pl. (Extr. des *Atti d. soc. toscana di sc. naturali.*) (7857)

Traverso (S.). — Quarziti e scisti metamorfici del Sarrabus (Sardegna) : studio petrografico. Gênes, tip. A. Ciminago. In-4°, 33 p. (Extr. des *Atti d. soc. ligustica di sc. naturali.*) (5249)

Traverso (S.). — Associazione di minerali di contatto nella miniera di Giovanni Bonu in Sardegna. Gênes, tip. A. Ciminago. In-8°, 10 p. (6925)

Valle (G. La). — Sulla Marcasite rinvenuta al capo Schino presso Giojosa Marea in Sicilia. Padoue, tip. Cooperativa. In-8°, 7 p. av. fig. (Extr. de la *Rivista di mineralogia e cristallografia italiana.*) (6027)

4° *Applications industrielles de la physique et de la chimie.*

Ferrini (R.). — Recenti progressi nelle applicazioni dell' elettricità. Seconda edizione completamente rifatta. Parte II (ultima). Milan, U. Hoepli. In-8°, xij-386 p. av. fig. 9 fr. (8248)

Sartori (G.). — Trasmissione elettrica del lavoro meccanico, con una descrizione dei principali impianti esistenti ed una appendice sulla scelta del sistema di trasmissione. Milan, U. Hoepli. In-4°, xv-411 p. av. fig. 9 fr. (8289)

5° *Exploitation des mines.*

Rivista del servizio minerario nel 1891 (Ministero di agricoltura, industria e commercio: direzione generale dell' agricoltura). Florence, tip. G. Barbèra. In-8°, cviij-342 p. av. pl. 3 fr. (8339)

6° *Construction. — Chemins de fer.*

Castagneris (G.). — Tramvie e ferrovie elettriche. Milan. In-8°, 432 p. av. 170 fig. 5 fr.

Costruttore (Il): trattato pratico delle costruzioni civili, industriali e pubbliche, delle arti ed industrie attinenti, disposto alfabeticamente ad uso dell' ingegnere civile ed industriale, dell' architetto, dell' agronomo, dei capimastri, imprenditori, industriali, ecc. Opera illustrata da oltre 4000 incizioni. Disp. 85-94. Milan, F. Vallardi. In-4°, p. 761-887, p. 1-96, av. fig. et 7 pl. (9498)

Costruzione ed esercizio delle strade ferrate e delle tramvie: norme pratiche dettate da una eletta di ingegneri specialisti. Turin, Unione tipografico editrice. In-4°, av. fig. Disp. 74-77, p. 33-64, 97-147, 1-48, av. 16 pl.; Disp. 78, p. 49-80, av. 4 pl.; Disp. 79, p. 1-72, av. 4 pl.; Disp. 80, p. 65-120, av. 1 pl.; Disp. 81-83, p. 89-180, 33-63, av. 7 pl.; Disp. 84, p. 129-152, av. 6 pl. 2 fr. la livraison. (4808 — 5711 — 6969 — 7469 — 8681 — 9015)

Dozza (G.). — La ferrovia Bologna-Pistoia a Pioppe di Salvaro, dopo la piena nel Reno del 1° ottobre 1893: considerazioni di critica tecnica. Bologne, tip. succ. Monti. In-8°, 15 p. (9016)

Falta (L.). — Nouveau frein continu automatique à air comprimé (Système Falta). Sanremo, tip. G. B. Biancheri. In-8°, 16 p. av. 6 pl. (5290)

Relazione sulle costruzioni e sull' esercizio delle strade ferrate italiane per anni 1888-1889-1890. Vol. I (Esercizio), fasc. 2: Movimento e traffico 1889 (Ministero dei lavori pubblici: r. ispettorato generale delle strade ferrate). Rome, tip. Nazionale di G. Bertero. In-4°, vij-425 p. (5294)

Statistica dell' esercizio, anno 1891. Parte I: statistica generale (Società italiana per le strade ferrate meridionali: esercizio della rete adriatica). Florence, tip. G. Civelli. In-4°, 76 p. (9501)

Viappiani (A.). — La costruzione e l' esercizio delle tramvie. Turin, Camilla e Bertolero. In-8°, xvj-317 p. av. fig. et 10 pl. 10 fr. (9022)

7° *Économie politique et sociale.*

Ippoliti (F.-D.). — Corso di economia sociale: prelegomeni. Naples, N. Jovene e C. In-16, xij-127 p. 2 fr. (7778)

8° *Objets divers.*

Baroni (I.) e G. Rocca. — La riforma oraria, l' ora universale e i fusi orari. Milan, Vita Moderna. In-16, 40 p. av. fig. (Extr. du journal *Vita moderna.*) (6901)

Grandis (S.). — Considerazioni tecniche ed economiche sul traforo delle Alpi: memoria inedita scritta nel 1858 in nome della direzione tecnica del traforo e pubblicata per cura della vedova (con prefazione e note di) *A. Ferrucci* e *V. Crosa.* Turin, tip. G. Guadagnini. In-4°, viij-58 p. (5291)

Istruzione per l' eseguimento dei trasporti internazionali, 11 ottobre 1893 (Ferrovie Nord-Milano). Milan, tip. L. Zanaboni e Gabuzzi. In-8°, 48 p. (9017)

Rizzetti (C.). — Unificazione del tempo: relazione 23 gennaio 1891 alla società promotrice dell' industria nazionale e circolo commerciale in Torino; memoria presentata ai colleghi del Parlemento, e discorso del Feld-Maresciallo dr. conte *Moltke* al Reichstag il 16 marzo 1891. Turin, G. B. Paravia e C. In-8°, 26 p. avec pl. (5674)

LISTE DES ÉCHANGES AUTORISÉS

ENTRE LES ANNALES DES MINES ET LES PUBLICATIONS FRANÇAISES ET ÉTRANGÈRES.

Les *Annales des mines* ont été adressées, à titre d'échange, en 1893, aux Sociétés et publications dont les noms suivent :

1. — The Journal of the Franklin Institute. *Philadelphie.*
2. — The American Journal of science and arts. *New-Haven.*
3. — American philosophical Society. *Philadelphie.*
4. — Royal Society of London.
5. — The quarterly Journal of the Geological Society. *Londres.*
6. — Institution of civil Engineers. *Londres.*
7. — Royal Irish Academy. *Dublin.*
8. — Societa Toscana di Scienze naturali. *Pise.*
9. — L'Industria. Rivista tecnica ed economica illustrata. *Milan.*
10. — Société de physique et d'histoire naturelle de Genève.
11. — Société géologique de France. *Paris.*
12. — Journal de mathématiques pures et appliquées. *Paris.*
13. — Annales de Chimie et de Physique. *Paris.*
14. — Soc. d'encouragement pour l'industrie nationale. *Paris.*
15. — Journal de Pharmacie et de Chimie. *Paris.*
16. — Kaiserlich-Königliche Geologische Reichsanstalt. *Vienne.*
17. — Royal geological Society of Cornwall. *Penzance.*
18. — The Colliery Guardian and Journal of the Coal and Iron Trades. *Londres.*
19. — Royal Society of Edinburgh. *Édimbourg.*
20. — Société de l'industrie minérale. *Saint-Étienne.*
21. — Smithsonian Institution. *Washington.*
22. — Zeitschrift der deutschen geolog. Gesellschaft. *Berlin.*
23. — Jahresbericht über die Fortschritte der Chemie. *Brunswick.*
24. — Zeitschrift des Oesterreichischen Ingenieur-und Architekten-Vereins. *Vienne.*
25. — Sociedad cientifica Argentina. *Buenos-Ayres.*
26. — Zeitschrift des Architekten und Ingenieur-Vereins zu Hannover. *Hanovre.*
27. — Geological Survey of India. *Calcutta.*

28. — Berg-und Hüttenmännische Zeitung. *Leipzig.*
29. — Société industrielle de Mulhouse.
30. — Société Chimique de Paris.
31. — Il Politecnico. Giornale dell' Ingegnere, Architetto civile ed industriale. *Milan.*
32. — Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure. *Berlin.*
33. — Société des Ingénieurs civils. *Paris.*
34. — Observatoire de Paris.
35. — Boston Society of Natural History. *Boston.*
36. — Société linnéenne de Normandie. *Caen.*
37. — Comité géologique de la Russie. *St-Pétersbourg.*
38. — Industries and Iron. *Londres.*
39. — Königliche Ungarische geologische Anstalt. *Bude-Pesth.*
40. — The Journal of the Iron and Steel Institute. *Londres.*
41. — The Engineering and Mining Journal. *New-York.*
42. — North of England Institute of Mining and Mechanical Engineers. *Newcastle-upon-Tyne.*
43. — Literary and Philosophical Society of Manchester.
44. — Berg-und Hüttenmännisches Jahrbuch der K. K. Bergakademien zu Leoben und Przibram und der Kön. Ungar Bergakademie zu Schemnitz. *Vienne.*
45. — Oesterr. Zeitschrift für Berg-und Hüttenwesen. *Vienne.*
46. — Revue universelle des Mines et de la Métallurgie. *Liège.*
47. — American Institute of Mining Engineers. *Easton* (*Pensylvanie*).
48. — Reale Accademia dei Lincei. *Rome.*
49. — American chemical Society. *New-York.*
50. — Academy of natural Sciences of Philadelphia.
51. — Comision del Mapa geologico de Espana. *Madrid.*
52. — Mémorial de l'Artillerie de la Marine. *Paris.*
53. — Midland Institute of mining, civil and mechanical Engineers. *Barnsley* (*Yorkshire*).
54. — L'Électricien, revue générale d'électricité. *Paris.*
55. — Giornale del Genio civile. *Rome.*
56. — Le génie civil. *Paris.*
57. — Revista minera y metalurgica. *Madrid.*
58. — Annales de la Société géologique de Belgique. *Liège.*
59. — United States geological Survey. *Washington.*
60. — Institut royal géologique de Suède. *Stockholm.*
61. — Canadian Institute. *Toronto.*
62. — Revue de la législation des mines. *Paris.*
63. — Section des travaux géologiques du Portugal. *Lisbonne.*

64. — Second geological survey of Pennsylvania. *Philadelphie.*
65. — K.K. Naturhistorischer Hofmuseum. *Vienne.*
66. — College of Science, Imperial University, Japan. *Tokyo.*
67. — Kais. Leopoldinisch-Carolinische deutsche Akademie der Naturforscher. *Halle-sur-Saale.*
68. — Annales de la Faculté des sciences de Toulouse.
69. — New-York Akademy of sciences. *New-York.*
70. — Institution of Mechanical Engineers. *Londres.*
71. — Department of Mines of Victoria. *Melbourne.*
72. — Department of Mines of New South Wales. *Sydney.*
73. — Revue générale des sciences pures et appliquées. *Paris.*
74. — The School of Mines Quarterly. *New-York.*
75. — Geological and Natural History Survey of Canada. *Ottawa.*
76. — La Réforme sociale. *Paris.*
77. — Société internationale des Électriciens. *Paris.*
78. — Bulletin of the Geological Society of America. *Rochester (N. Y.).*
79. — Commission internationale du Congrès des chemins de fer. *Bruxelles.*
80. — Association amicale des élèves de l'École supérieure des mines. *Paris.*
81. — Zeitschrift für praktische Geologie. *Berlin.*

TABLE DES MATIÈRES

DU TOME QUATRIÈME.

MINÉRALOGIE. — GÉOLOGIE.

Pages.

Théories relatives à la coordination des soulèvements : réseau pentagonal et réseau tétraédrique; par M. *Edm. Fuchs.* . 539

EXPLOITATION DES MINES. — GITES MINÉRAUX.

Notice sur la mine d'antimoine de Freycenet; par M. *P.-L. Burthe*. 15
L'exploitation de l'anthracite en Pennsylvanie et ses déchets, d'après le Rapport officiel américain; par M. *Ed. Sauvage*. 213
Note sur l'explosion de grisou survenue au puits de la Manufacture (Loire), le 6 décembre 1891. 235

CHIMIE. — MÉTALLURGIE.

Sur la détermination du phosphore dans les fers, les aciers et les fontes; par M. *Ad. Carnot*. 5
Sur la détermination du phosphore dans les terres végétales; par M. *Ad. Carnot*. 11
Bulletin des travaux de chimie exécutés en 1891 par les ingénieurs des mines dans les laboratoires départementaux. 34
Minerais de manganèse analysés au bureau d'essai de l'École des mines, de 1845 à 1893; par M. *Ad. Carnot*. 189
Procédés d'essai des matériaux hydrauliques; par M. *H. Le Chatelier*. 252
— (*Suite et fin*) 367

MÉCANIQUE. — MACHINES.

Pages.
Sur les moteurs électriques à courants alternatifs; par M. *C. Walckenaer*. 599

CHEMINS DE FER.

Utilité des chemins de fer d'intérêt local. Tarifs. Formule d'exploitation. — Examen des observations formulées par M. Colson ; par M. *Considère*. 45
— (*Suite et fin*). 115
Note sur le système de distribution de vapeur à tiroirs d'admission et d'échappement indépendants appliqué à des locomotives de la Compagnie du chemin de fer de Paris à Orléans; par M. *E. Polonceau*. 525

OBJETS DIVERS.

Note sur les relations entre la pression, le volume et la température de l'acide carbonique; par M. *C. Walckenaer*. 420
Notice nécrologique sur Adolphe Henry, ingénieur en chef des mines, ingénieur en chef du matériel et de la traction des chemins de fer P.-L.-M.; par M. *R. Zeiller*. . . . 499
Bulletin des accidents arrivés dans l'emploi des appareils à vapeur pendant l'année 1892. 650

BULLETIN.

Le Syndicat de vente des houilles de Westphalie. 108
L'industrie minérale en Grèce. 227
Production minérale et métallurgique des Iles-Britanniques pendant l'année 1892. 231
Statistique de l'industrie minérale des États-Unis en 1892. 362
Production de la houille dans le monde. 366
Production de l'or et de l'argent dans les principaux pays du globe. . . 484
Découverte de nouveaux gisements d'or à Coolgardie (Australie occidentale). 595
Statistique de l'industrie minérale et métallurgique de l'Autriche en 1892. 596
Statistique de l'industrie minérale et métallurgique de la Bavière en 1892. 597

Pages.
Production minérale et métallurgique de l'Espagne en 1890-1891 598
Production minérale du Portugal en 1892 598
Actes de courage et de dévouement. — Accidents arrivés dans les mines et carrières 666

BIBLIOGRAPHIE.

Deuxième semestre de 1893.

Ouvrages français 669
Ouvrages belges. 686
Ouvrages anglais. 686
Ouvrages américains 694
Ouvrages allemands. 695
Ouvrages russes. 701
Ouvrages espagnols 702
Ouvrages italiens 702

Liste des échanges autorisés entre les *Annales des mines* et les publications françaises et étrangères. 712

ERRATA ET ADDENDA

TOME PREMIER.

Pages 512, lignes 5 et 6, *au lieu de :* « des barbares venus d'Égypte entrèrent en Sardaigne », *lire :* « des barbares venus d'Asie-Mineure entrèrent en Égypte ».

TOME DEUXIÈME.

Pages 360 à 362, ligne 12 de la colonne de gauche de chacun des tableaux, *au lieu de :* « Aluminium », *lire* : « Alun ».

TOME TROISIÈME.

Pages 408, en tête, *ajouter :* « Le chapitre III du mémoire de M. A. Chevalier sur l'exploitation des chemins de fer anglais (*Annales des mines*, 4e sér., t. XI, p. 362) est consacré aux signaux; il est intéressant au point de vue historique.

EXPLICATION DES PLANCHES

DU TOME QUATRIÈME.

Pl. I. — Explosion de grisou survenue au puits de la Manufacture (Loire), le 6 décembre 1891.

Pl. II à VI. — Relations entre la pression, le volume et la température de l'acide carbonique.

Pl. VII à X. — Système de distribution de vapeur à tiroirs d'admission et d'échappement indépendants appliqué à des locomotives de la Compagnie du chemin de fer de Paris à Orléans.

Pl. XI à XIII. — Moteurs électriques à courants alternatifs.

PARIS. — IMP. C. MARPON ET E. FLAMMARION, RUE RACINE, 26.

Fig.2.
Coupe verticale AB.
(Echelle 1/20)

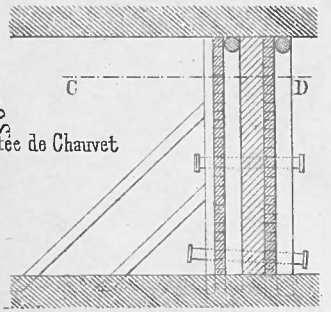


Fig.3.
Coupe horizontale CD. (Echelle 1/20.)

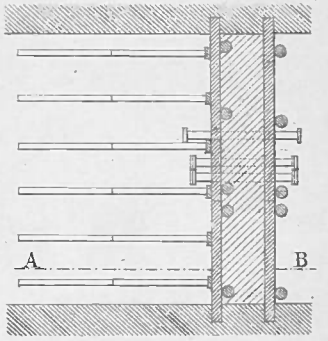


Fig.4. Coupe c'd' (Echelle 1/250.)

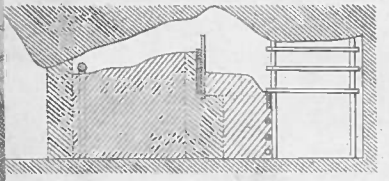


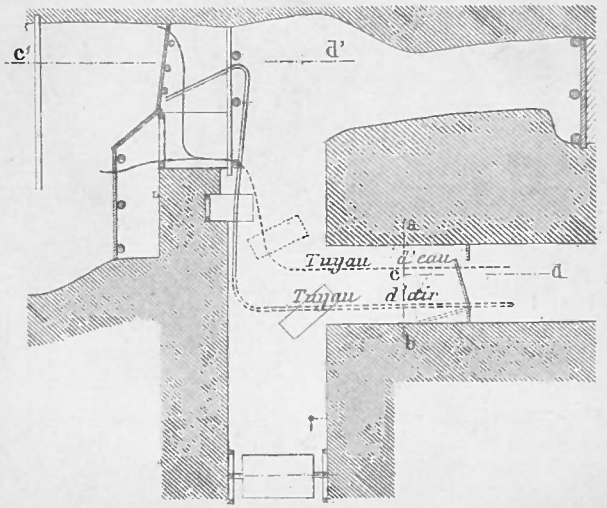
Fig.5.
Coupe ab.
(1/250.)



Fig.6.
Coupe cd.
(1/250)



Fig.7. Plan. (Echelle 1/250.)



6640.

Auto-Imp. L. Courtier, 43, rue de Dunkerque. Paris.

Explosion du 6 Décembre 1891 au Puits de la Manufacture.

Fig. 1. Plan des Travaux. (Echelle 1/1650.)



Fig. 2. Coupe verticale AB. (Echelle 1/20)

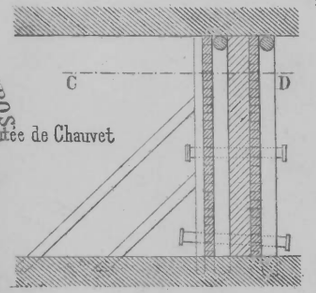


Fig. 3. Coupe horizontale CD. (Echelle 1/20.)

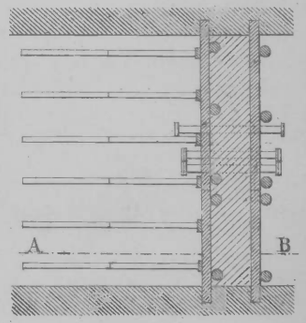


Fig. 4. Coupe c'd'. (Echelle 1/250.)

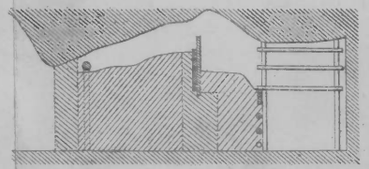


Fig. 5. Coupe ab. (1/250.)

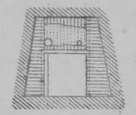


Fig. 6. Coupe cd. (1/250)

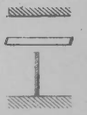
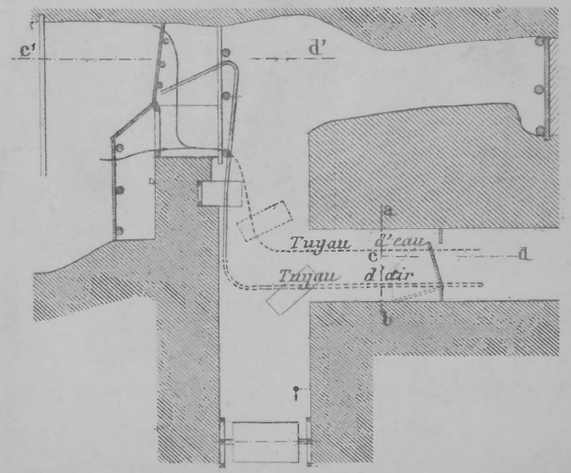


Fig. 7. Plan. (Echelle 1/250.)



6650.

Auto-Imp. L. Courtier, 43, rue de Dunkerque, Paris.

ACIDE CARBONIQUE

Fig. 1

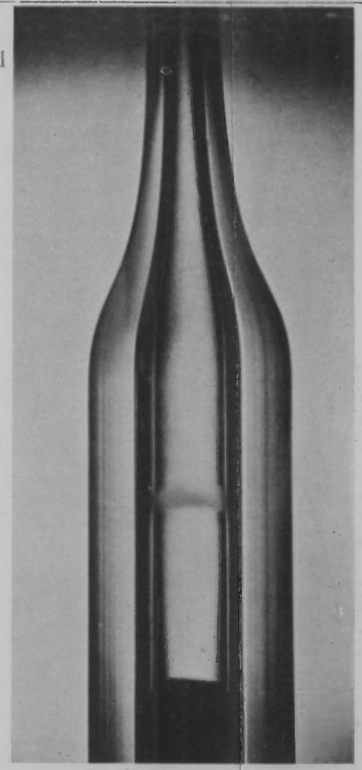


Fig. 2

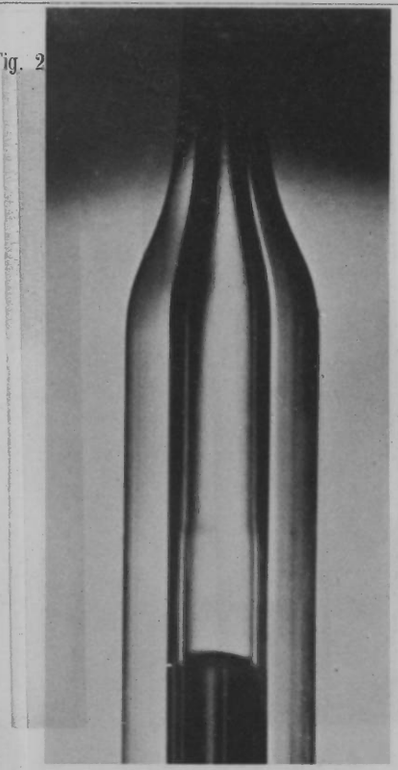


Fig. 3

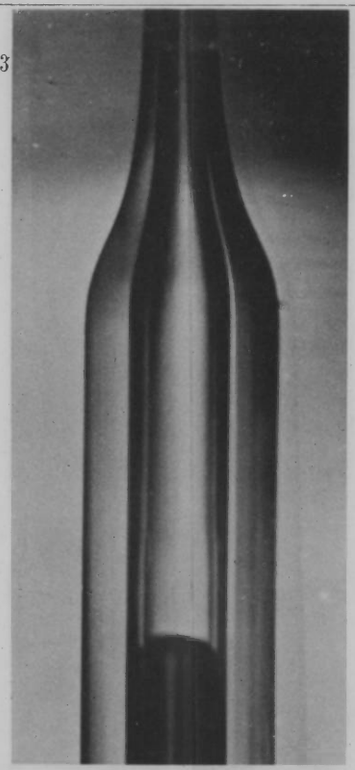


Fig. 4

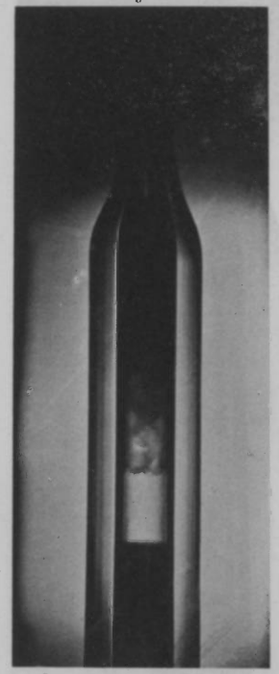


Fig. 5

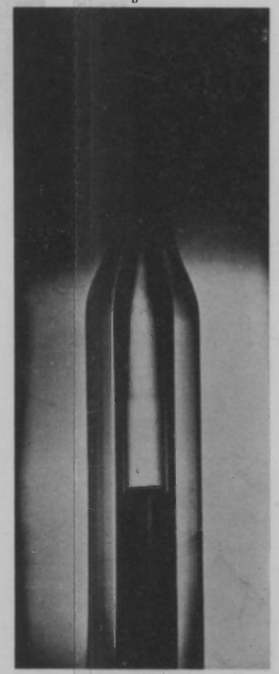


Fig. 6

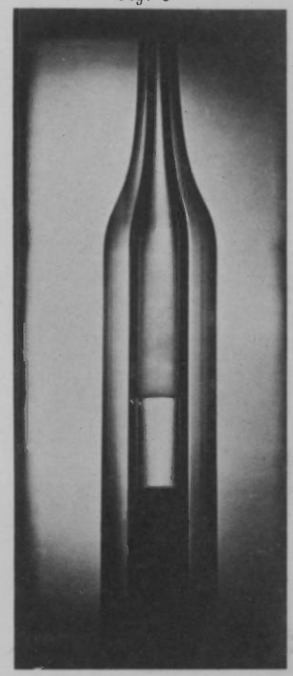


Fig. 7

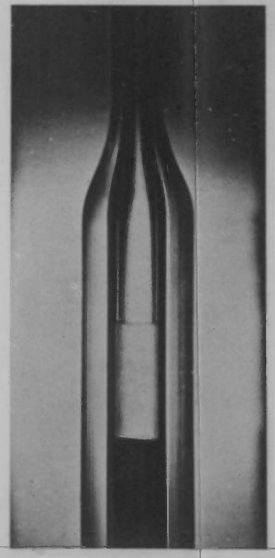


Fig. 8

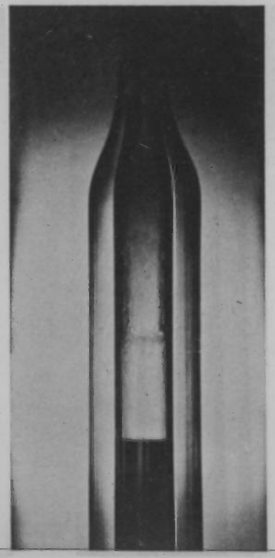


Fig. 9

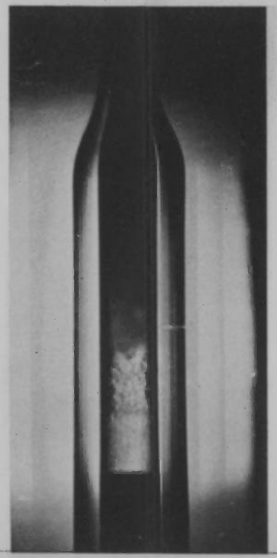


Fig. 10

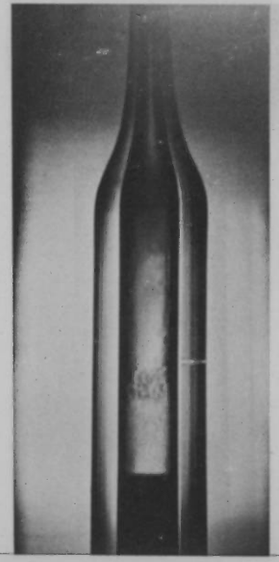


Fig. 11.

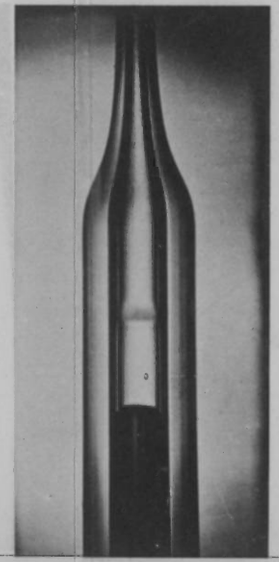
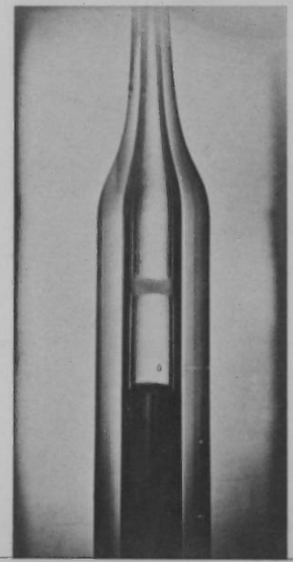


Fig. 12



Annales des Mines, 9e Série, Tome IV, pages 420 et suivantes.

L. Courtier, 43, rue de Dunkerque, Paris.

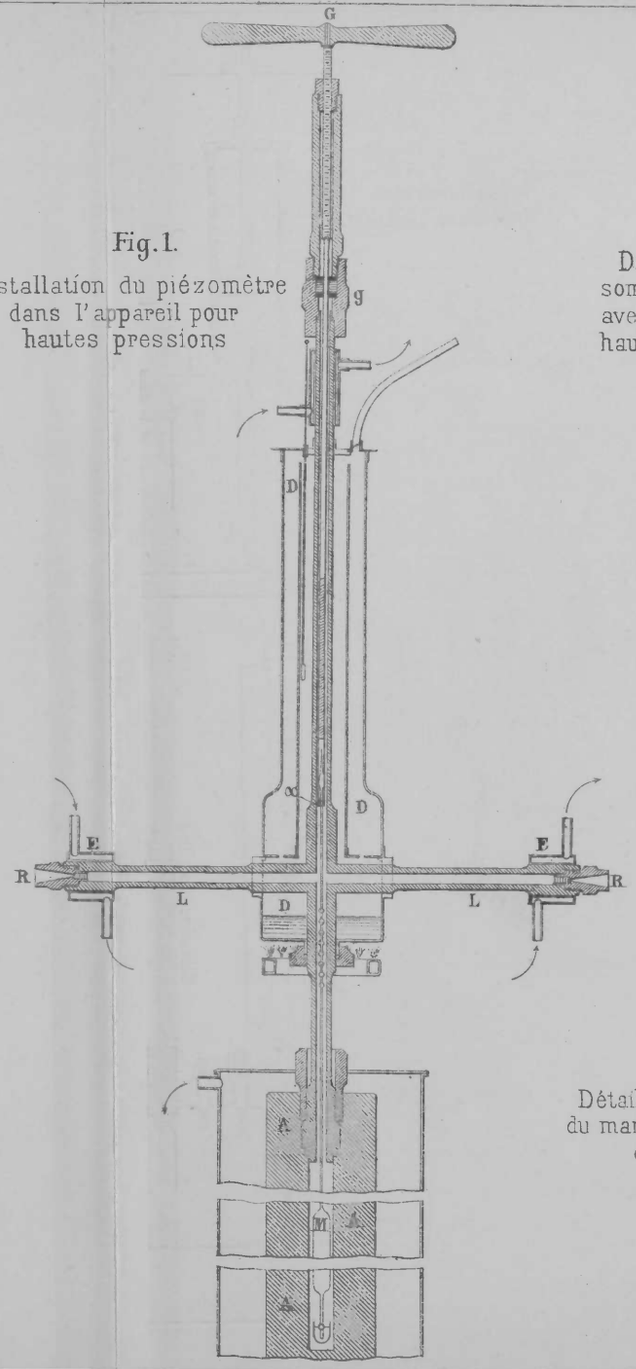
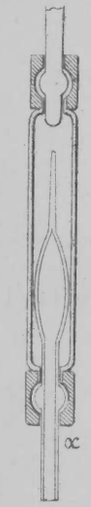


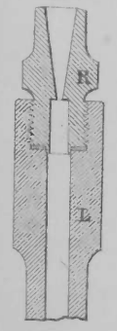
Fig. 1.
Installation du piézomètre dans l'appareil pour hautes pressions

Fig. 2.



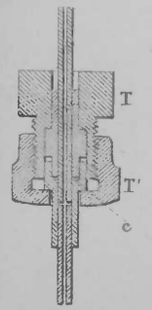
Détail de l'attache du sommet du piézomètre avec la tige réglant sa hauteur dans l'appareil de la Fig. 1

Fig. 3.



Détail des regards de la lunette transversale de l'appareil Fig. 1

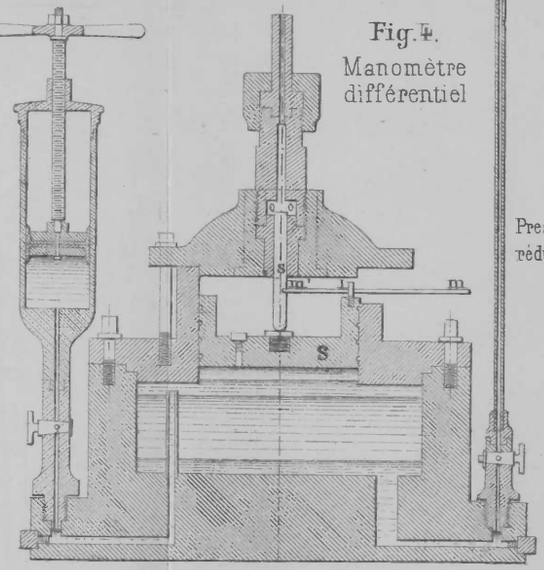
Fig. 6.



Détail d'un assemblage du manomètre à air libre de la Fig. 5

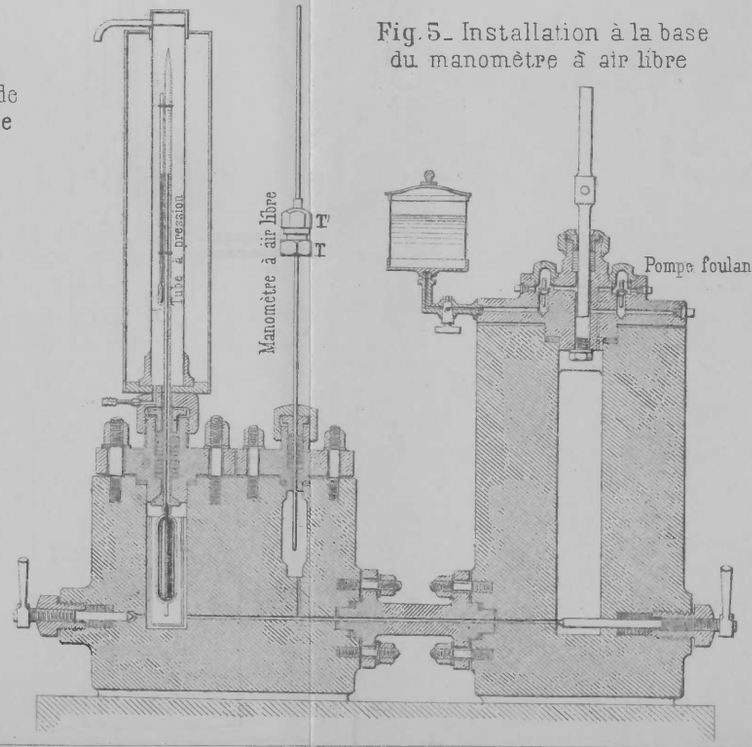
Presse régulatrice de l'élévation des pistons

Fig. 4.
Manomètre différentiel



S, grand piston
s, petit piston

Fig. 5. Installation à la base du manomètre à air libre



6943

Auto-Imp. L. Courtier, 43, rue de Dunkerque, Paris.

Fig. 1. Tension maxima de vapeur, et densités dans l'état de saturation

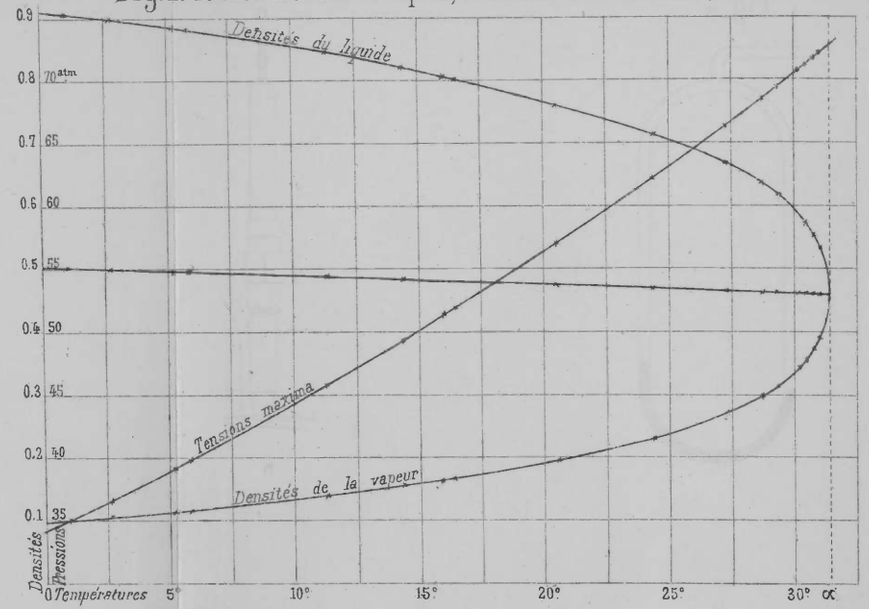


Fig. 2.

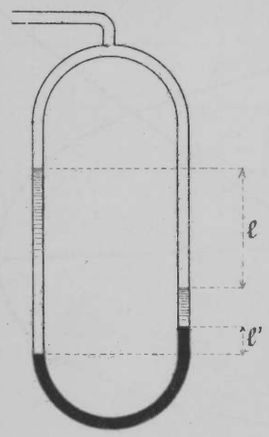


Fig. 3. Appareil pour l'étude de l'élasticité et de la dilatation aux diverses températures et jusqu'à 1000 atm.
(d'après une photographie)

Annales des Mines, 9e Série, Tome IV, pages 420 et suivantes.

Auto-Imp. L. Courtier, 43, rue de Dunkerque, Paris.

Isothermes de l'acide carbonique
dressées, d'après les déterminations de Mr AMAGAT,
dans le système des courbes d'ANDREWS.

Les nombres inscrits auprès des courbes indiquent les températures en degrés centigrades

Fig. 1.

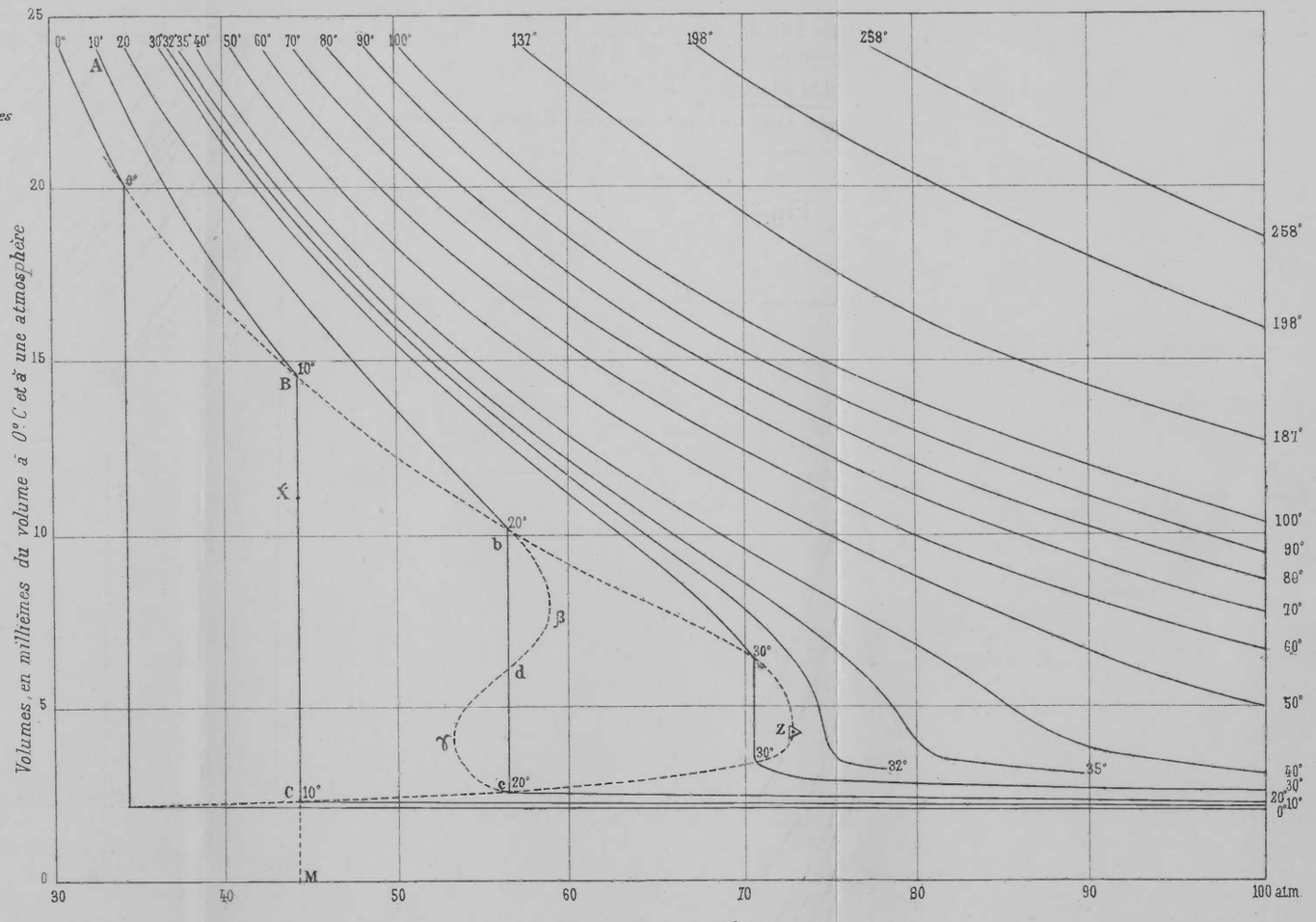


Fig. 2

Annales des Mines, 9e Série, Tome IV, pages 420 et suivantes.

Autó-Imp. L. Courtier, 43, rue de Dunkerque, Paris.

Fig. 1.

Diagramme donnant à diverses températures de 0° à 60° les pressions en atmosphères produites par des charges d'acide carbonique jusqu'à 1 kilogramme par litre. — *Dressé par M. E.H. AMAGAT.*

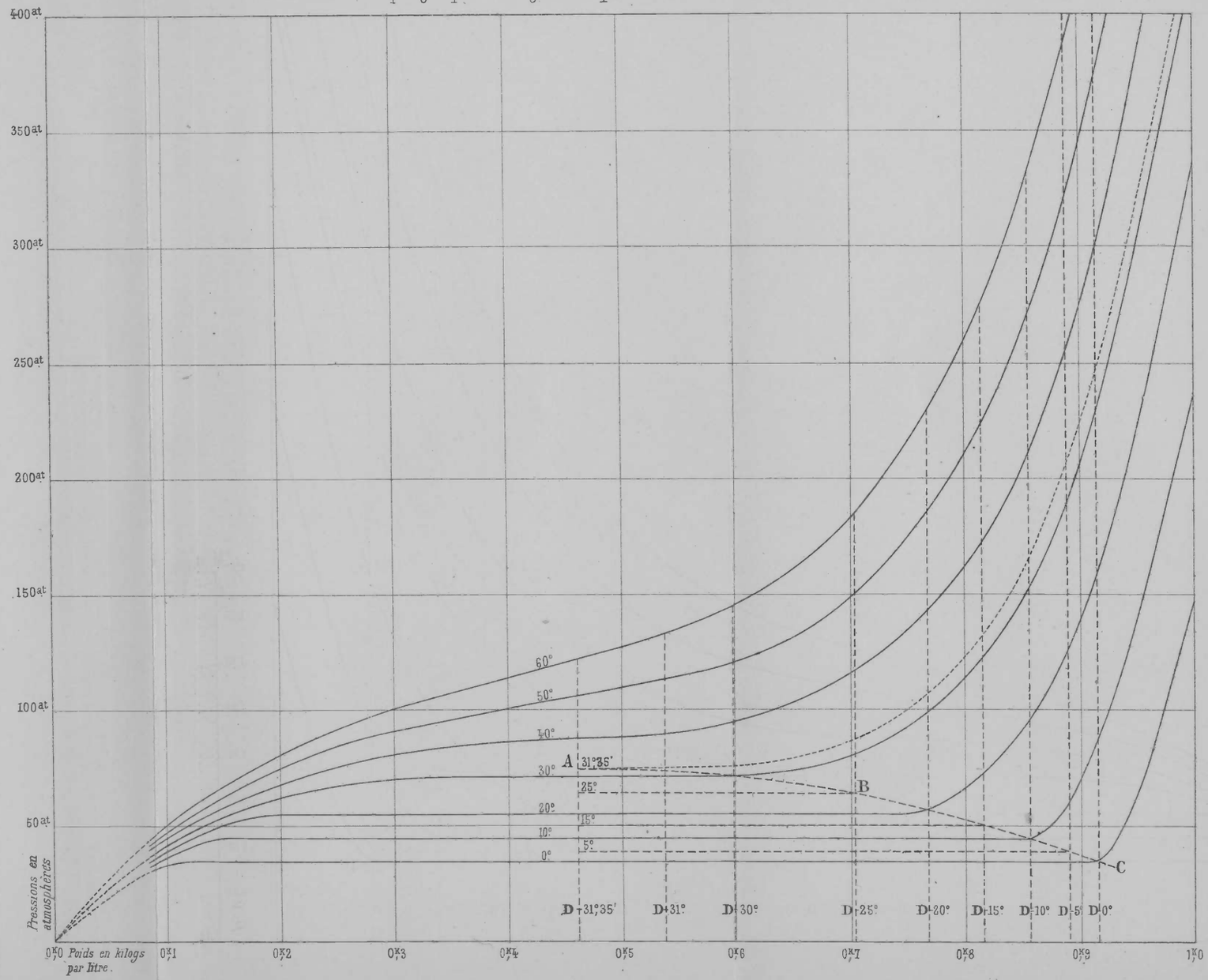


Fig. 2.

Isothermes de M. AMAGAT (PV. en fonction de P).
Ensemble, jusqu'à 1000 atmosphères.

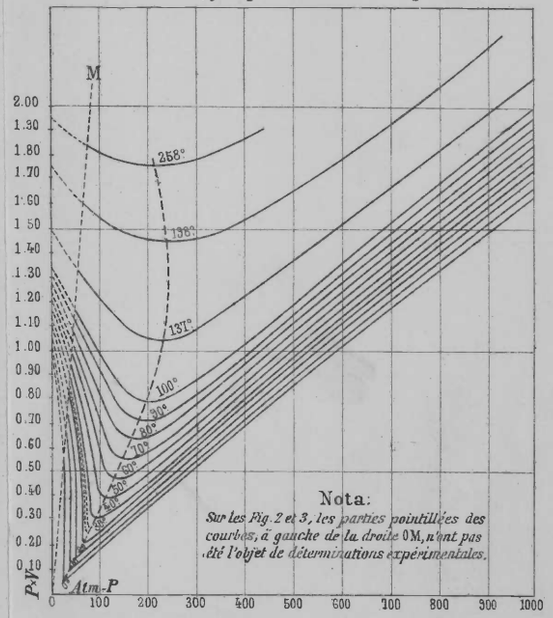
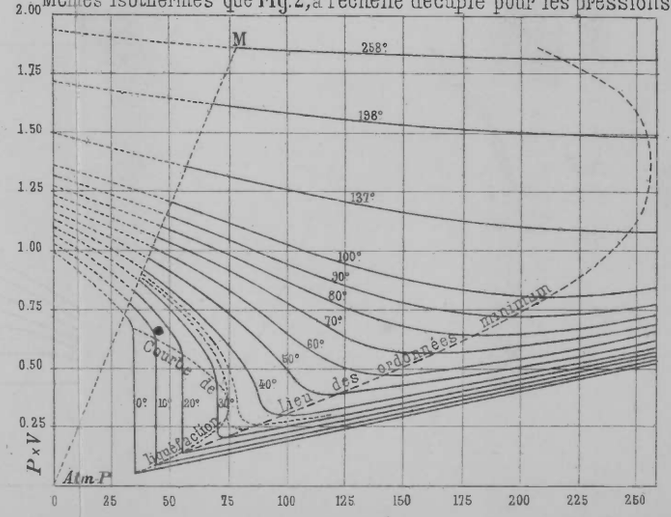


Fig. 3.

Mêmes isothermes que Fig. 2, à l'échelle décuple pour les pressions



(6944)

Annales des Mines, 9e Série, Tome IV, pages 420 et suivantes.

Auto-Imp. L. Courtier, 43, rue de Dunkerque, Paris.

CHEMINS DE FER

Fig. 1 Machine N° 67 (1er Essai)

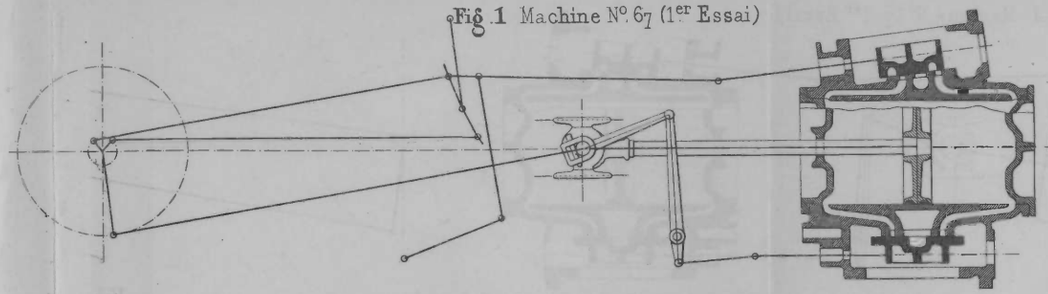


Fig. 2 Machine N° 76 (1er Essai)

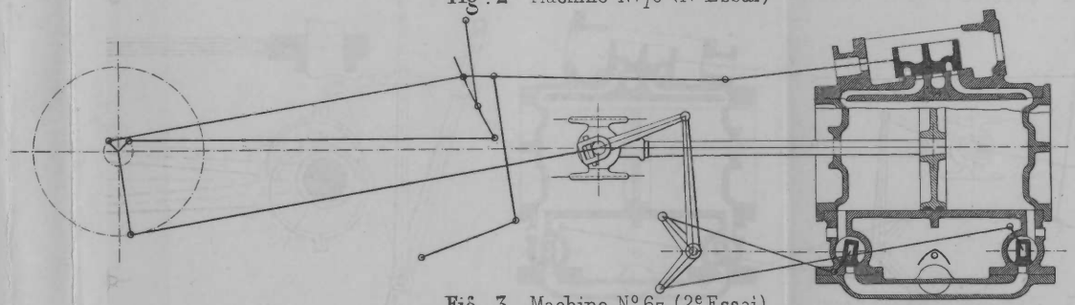


Fig. 3 Machine N° 67 (2e Essai)

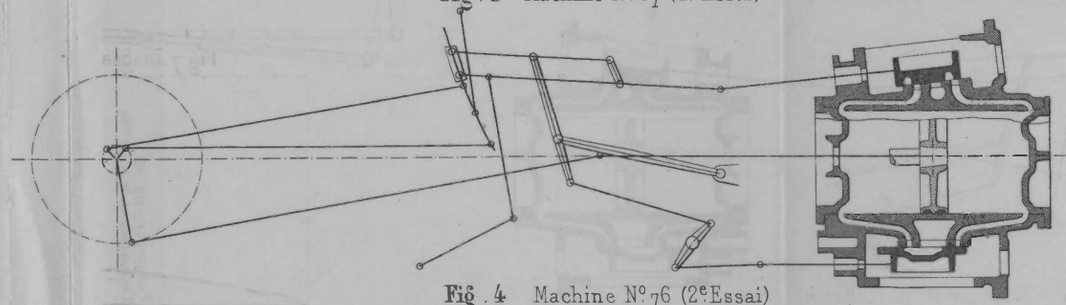


Fig. 4 Machine N° 76 (2e Essai)

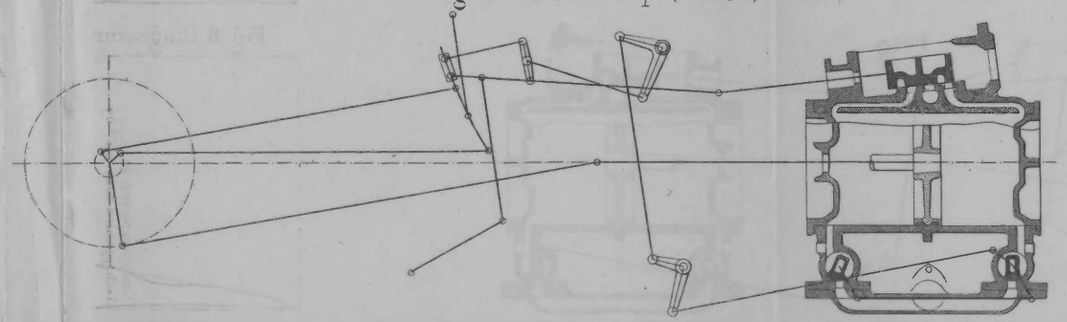


Fig. 5 Machine N° 67 (Essai définitif)

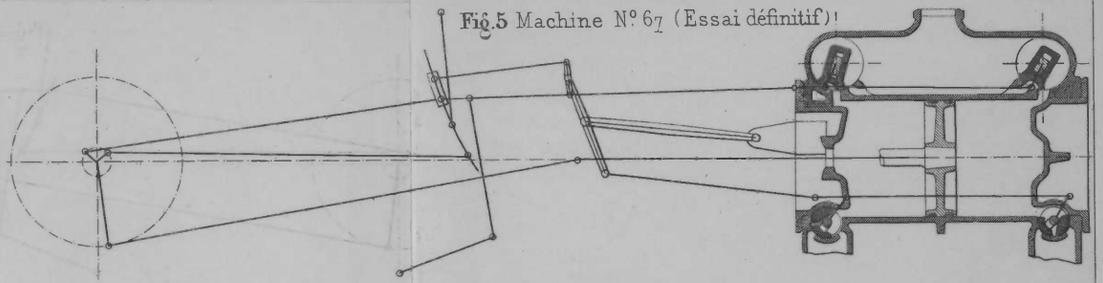


Fig. 6 Distribution C. Polonceau

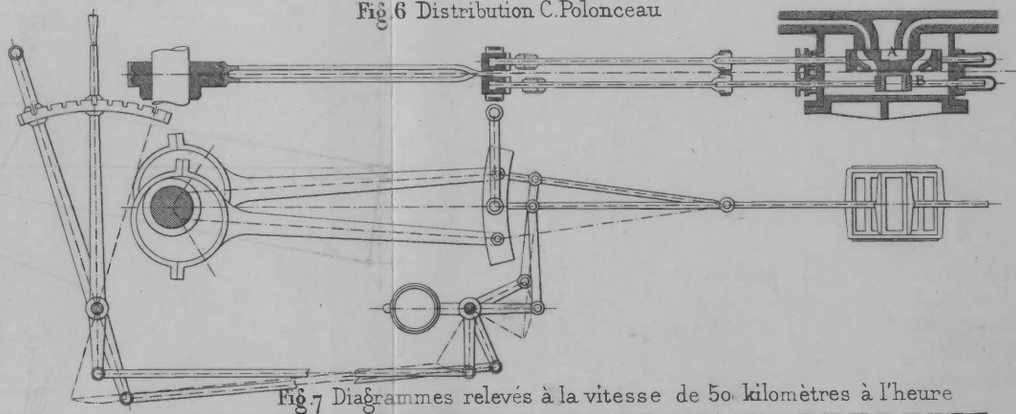


Fig. 7 Diagrammes relevés à la vitesse de 50 kilomètres à l'heure

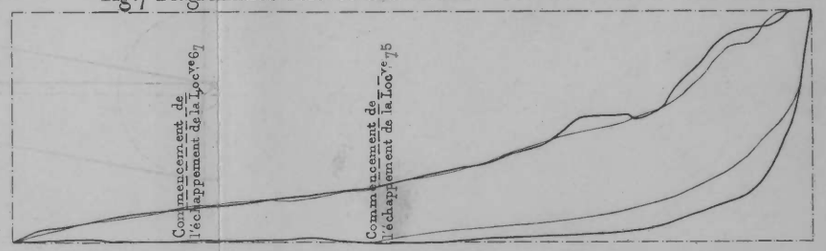
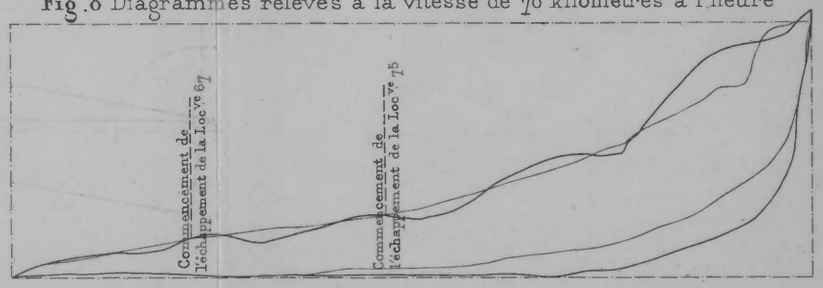


Fig. 8 Diagrammes releves à la vitesse de 70 kilomètres à l'heure



Annales des Mines 9e Série Tome IV pages 545 et suiv.

Macquet sc.

LOCOMOTIVES A VOYAGEURS

Distribution à tiroirs cylindriques, indépendants pour l'admission et l'échappement

Ensemble de la distribution

Fig. 4
Position du tiroir d'admission le piston étant au fond de course d'arrière

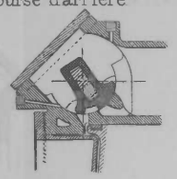


Fig. 5
Coupe longitudinale montrant les tiroirs d'admission

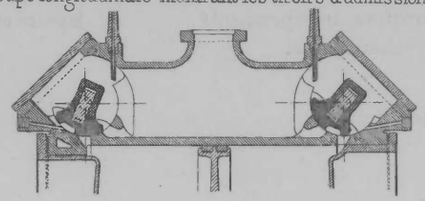


Fig. 3 Coupe transversale par l'axe des tiroirs

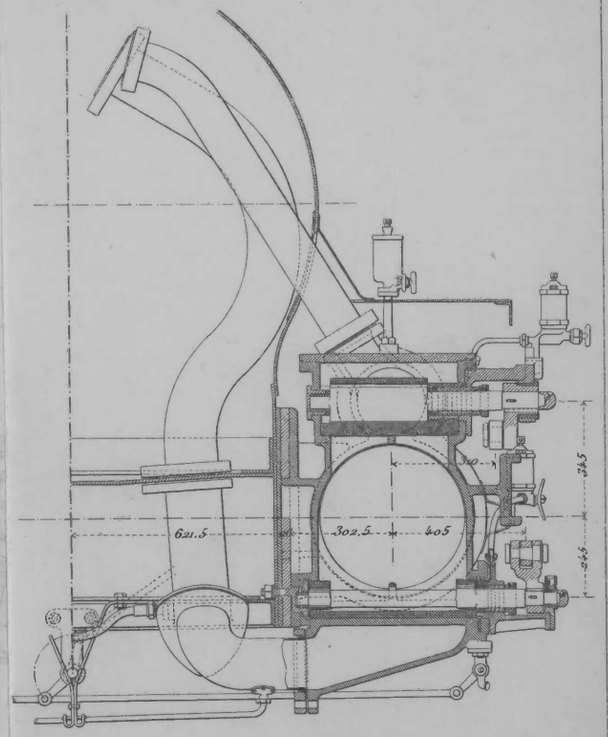


Fig. 1 Elévation

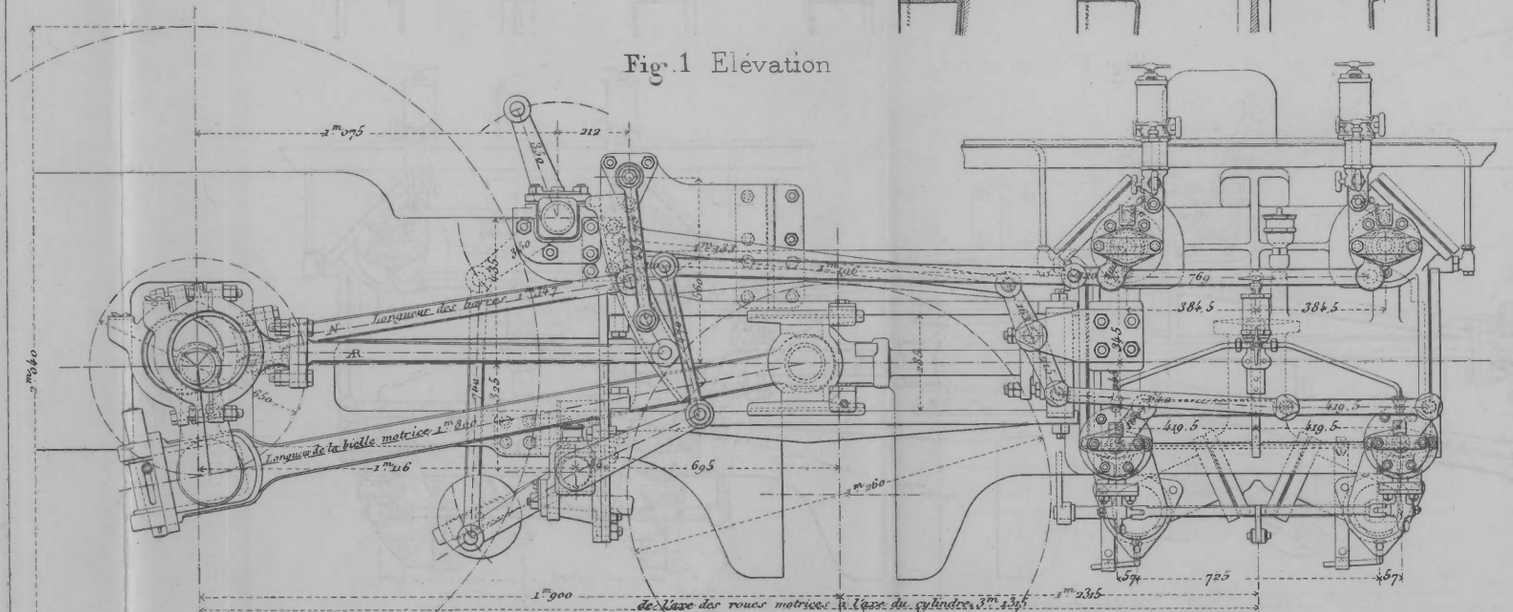


Fig. 6
Coupe longitudinale montrant les tiroirs d'échappement

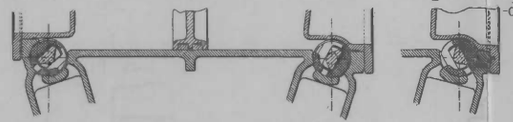


Fig. 7
Position du tiroir d'échappement le piston étant au fond de course d'arrière

Fig. 8

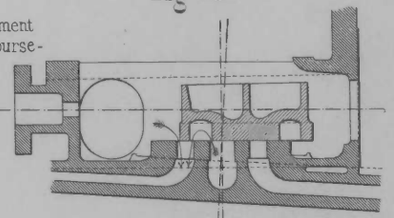


Fig. 2 Vue en Plan

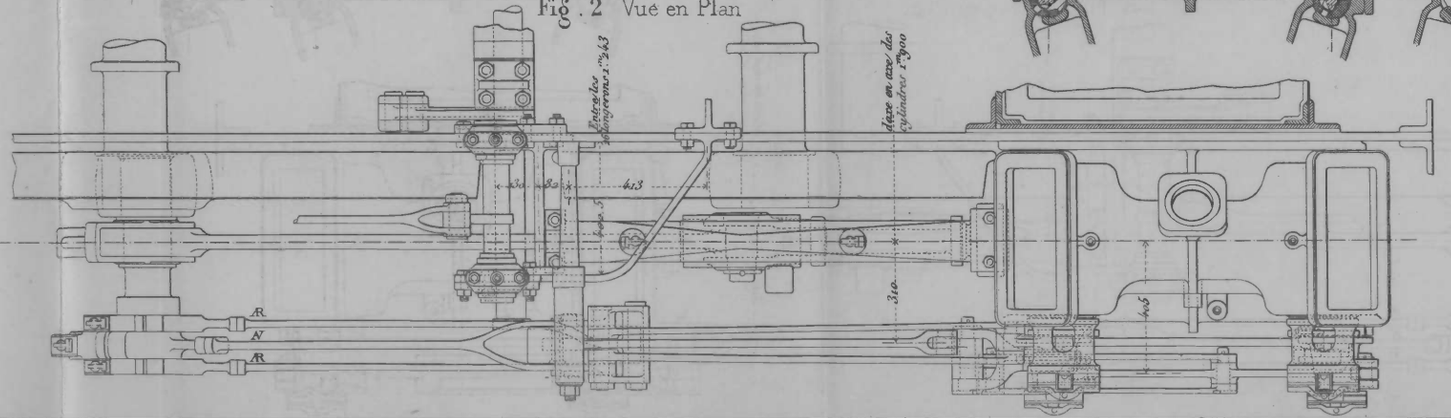
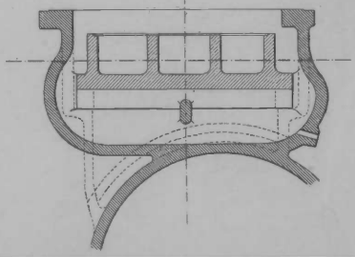


Fig. 9

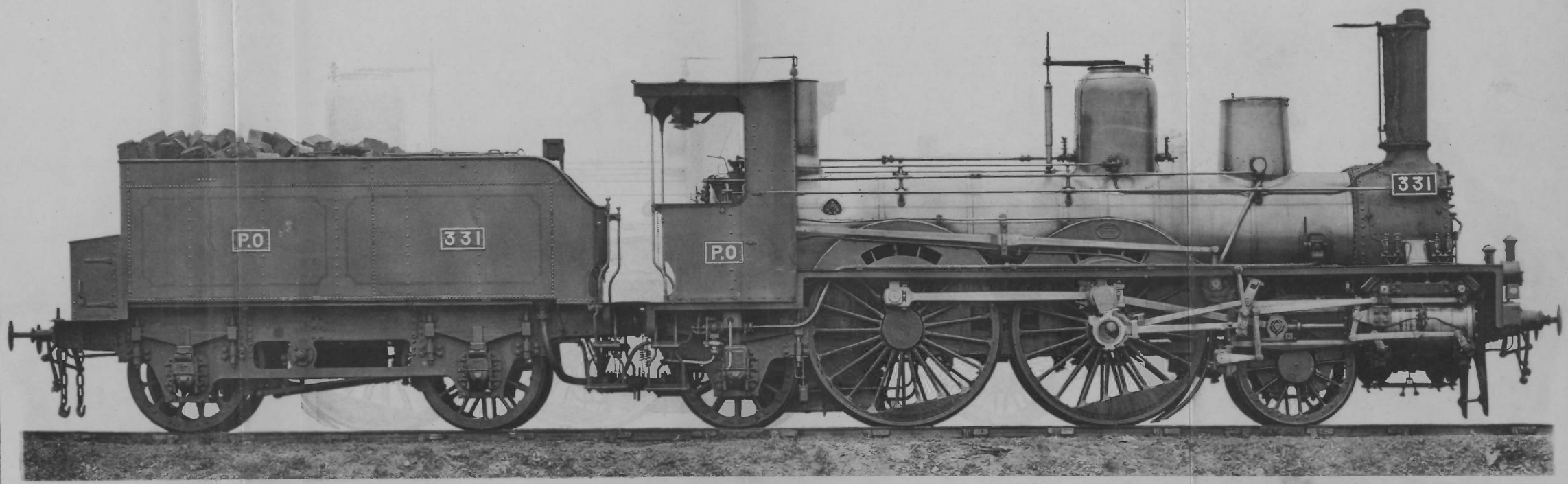


LOCOMOTIVES A 4 ROUES ACCOUPLÉES

Chemin de Fer
de Paris à Orléans

de 2^{m} de diamètre (Distribution à tiroirs d'admission et d'échappement indépendants)

Nos 67, 76, 331, 332, 391, 394, 395, 397 à 400



Annales des Mines, 9e Série, Tome IV, pages 525 et suivantes.

AVTO-IMP. L. COVRTIER. PARIS.

LOCOMOTIVES A MARCHANDISES

Distribution à tiroirs cylindriques indépendants pour l'admission et l'échappement

Ensemble de la distribution

Fig. 1 Elévation

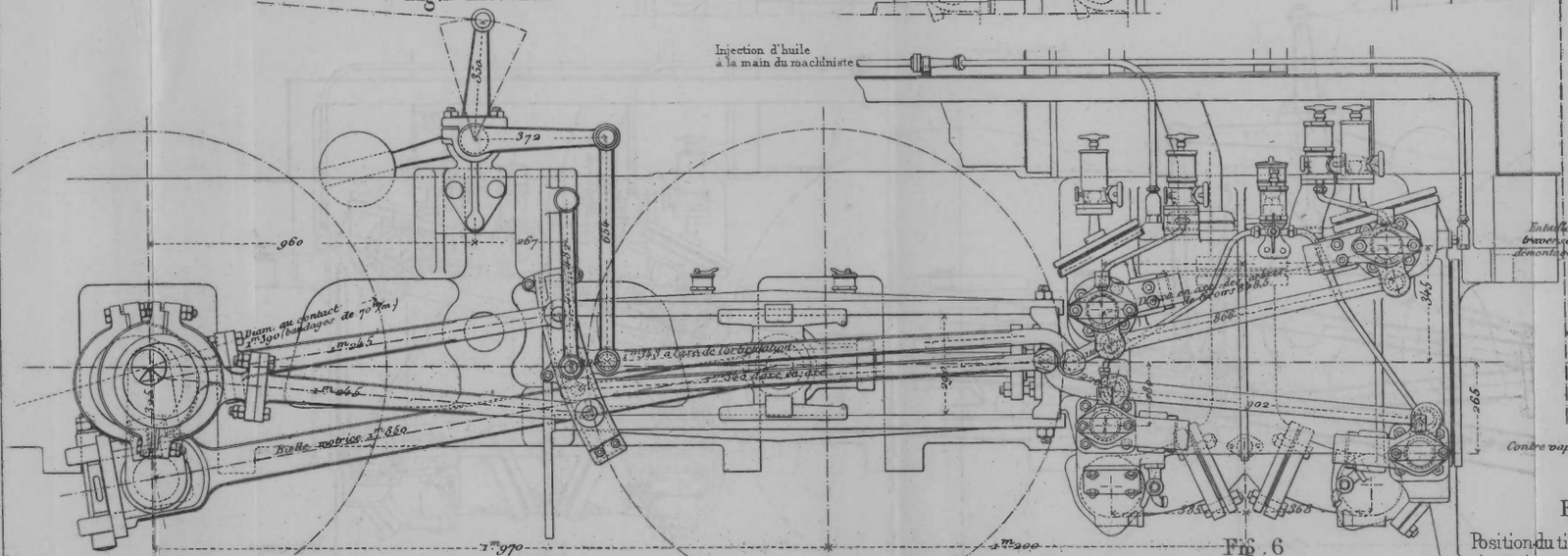


Fig. 4 Position du tiroir d'admission le piston étant au fond de course d'arrière

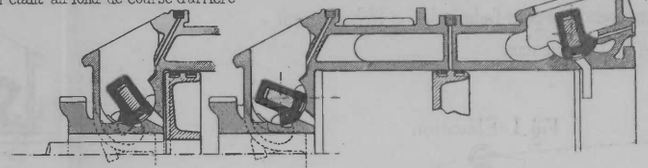


Fig. 5 Coupe longitudinale montrant les tiroirs d'admission

Fig. 6

Coupe longitudinale montrant les tiroirs d'échappement

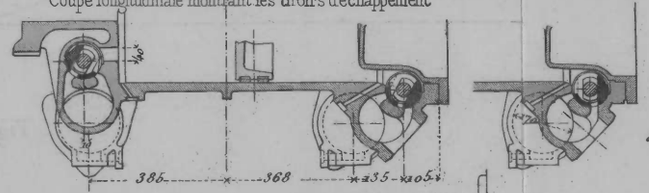


Fig. 3

Coupe suivant l'axe des tiroirs

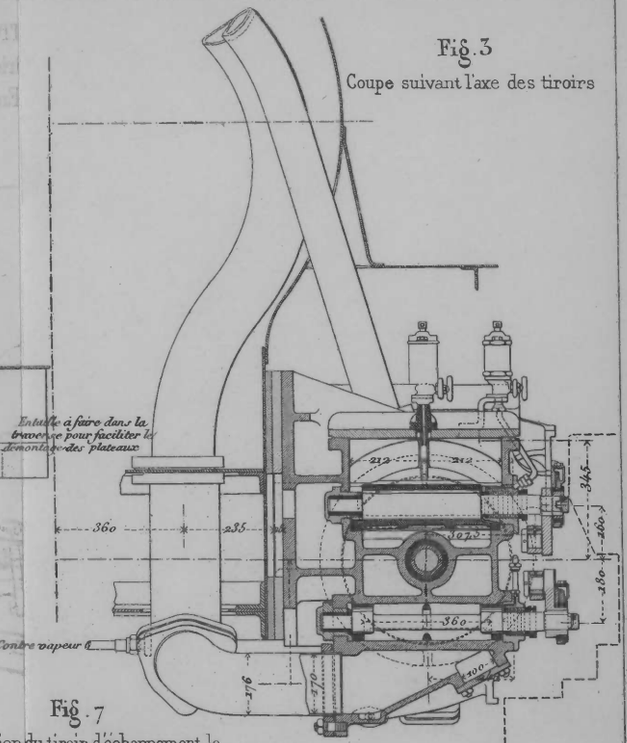
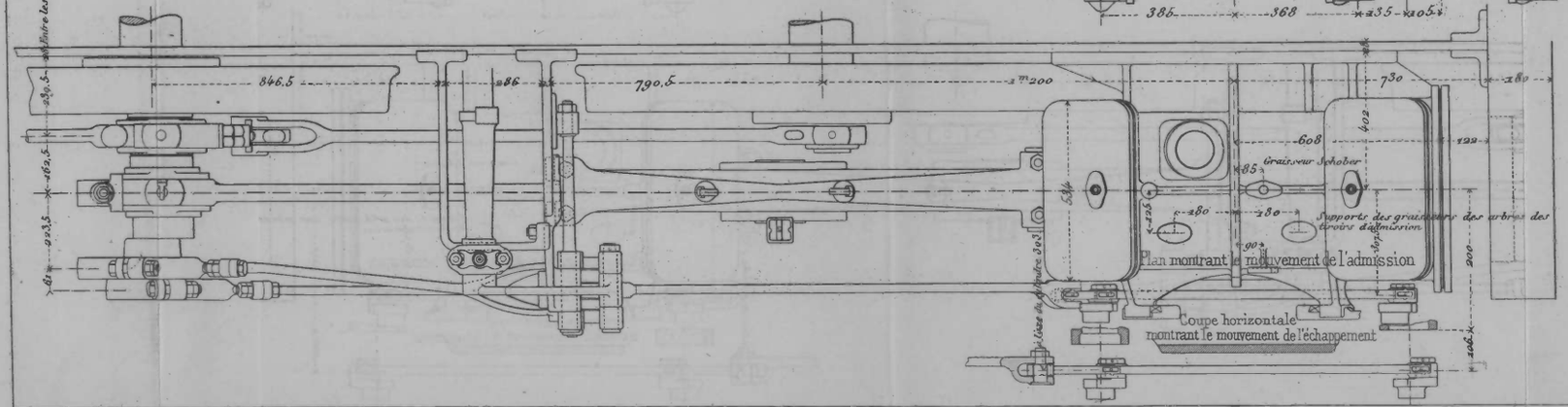


Fig. 7

Position du tiroir d'échappement le piston étant au fond de course d'arrière

Fig. 2 Vue en Plan



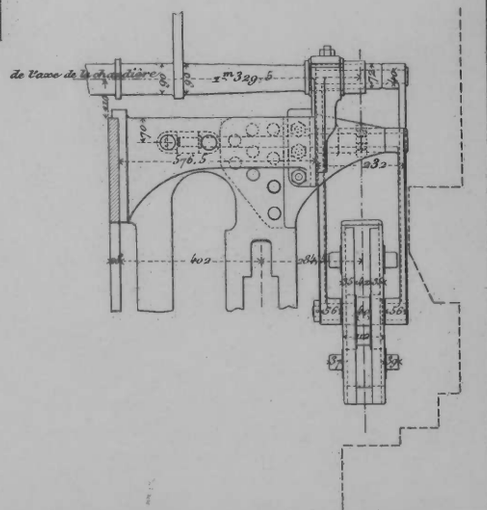
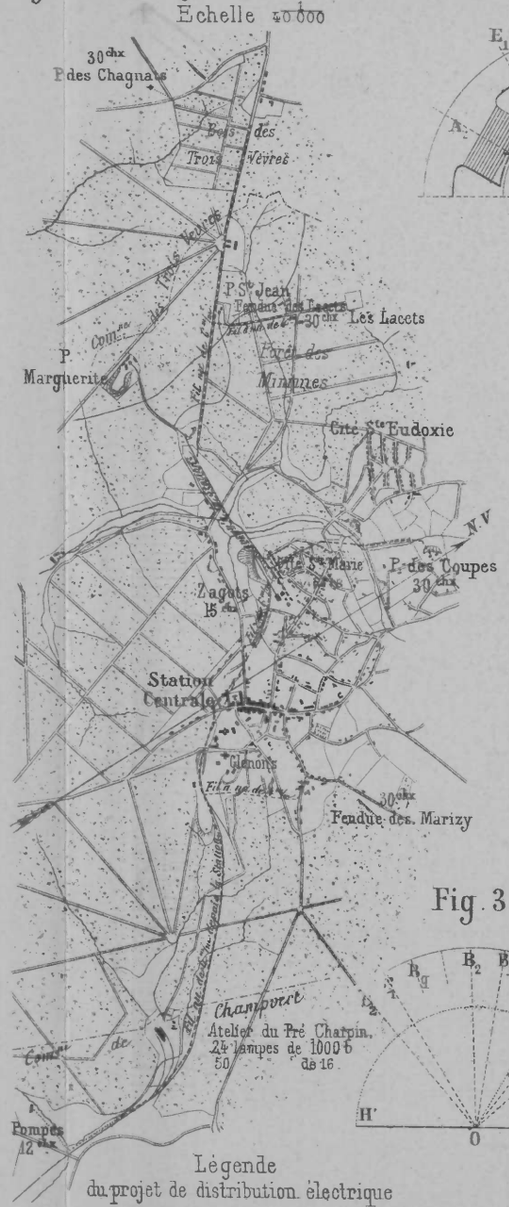


Fig. 4. — Plan du jour des Mines de Decize.

Echelle 1/20 000



Légende du projet de distribution électrique

- Fil aérien ordinaire
- Fil aérien protégé sous isol.t léger en plomb (sous plomb de 5,5 m/m²)
- Fil souterrain placé dans un caniveau en bois goudronné (sous plomb de 12,5 m/m²)

Fig. 1.

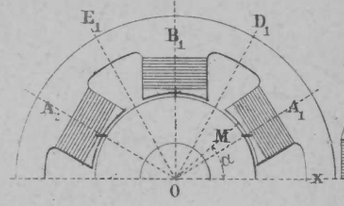


Fig. 2.

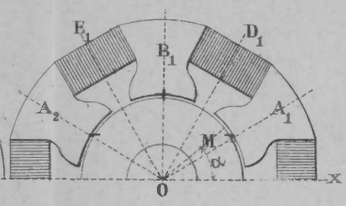


Fig. 3.

Ensemble de l'Usine en construction aux Mines de Decize.

Fig. 5.

Fig. 6.

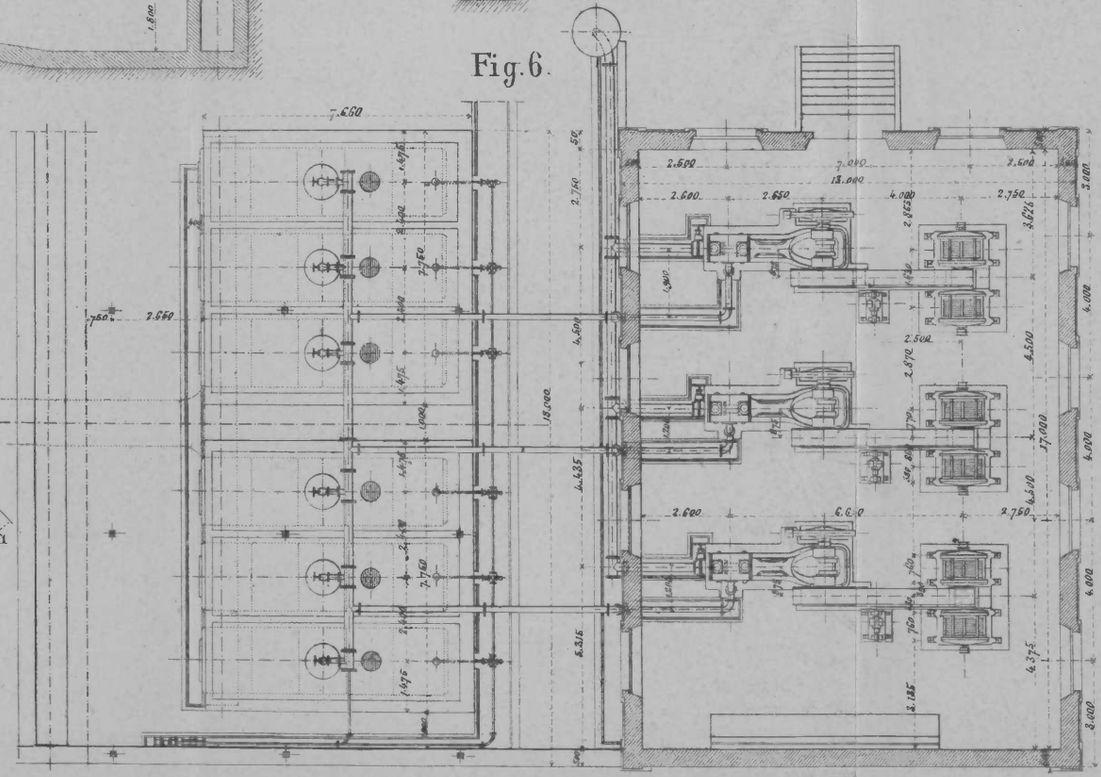


Fig. 7.

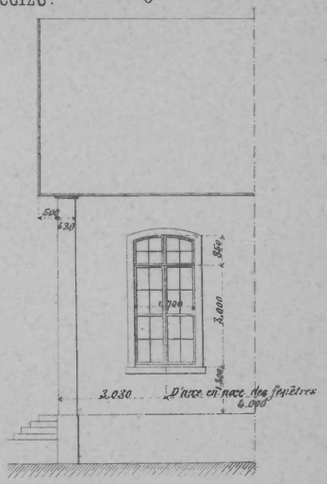
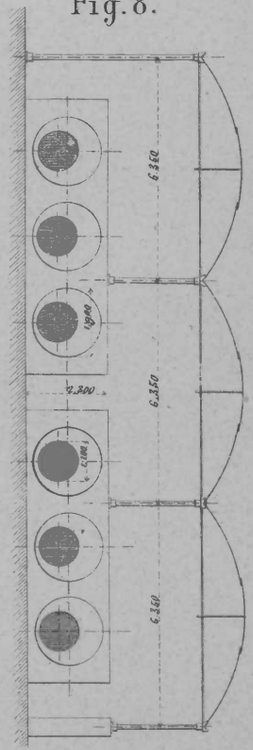


Fig. 8.



(7573)

Annales des Mines, 9e Série, Tome V, pages 599 et suivantes.

Auto-Imp. L. Courtier, 43, rue de Dunkerque, Paris.

Groupe générateur à courants alternatifs diphasés de 100 kilowatts

Fig. 1

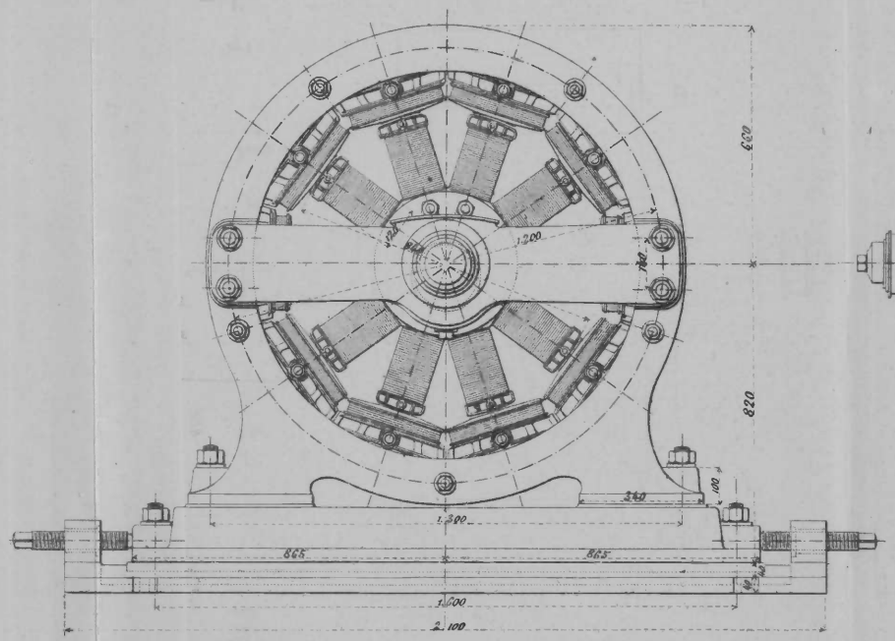
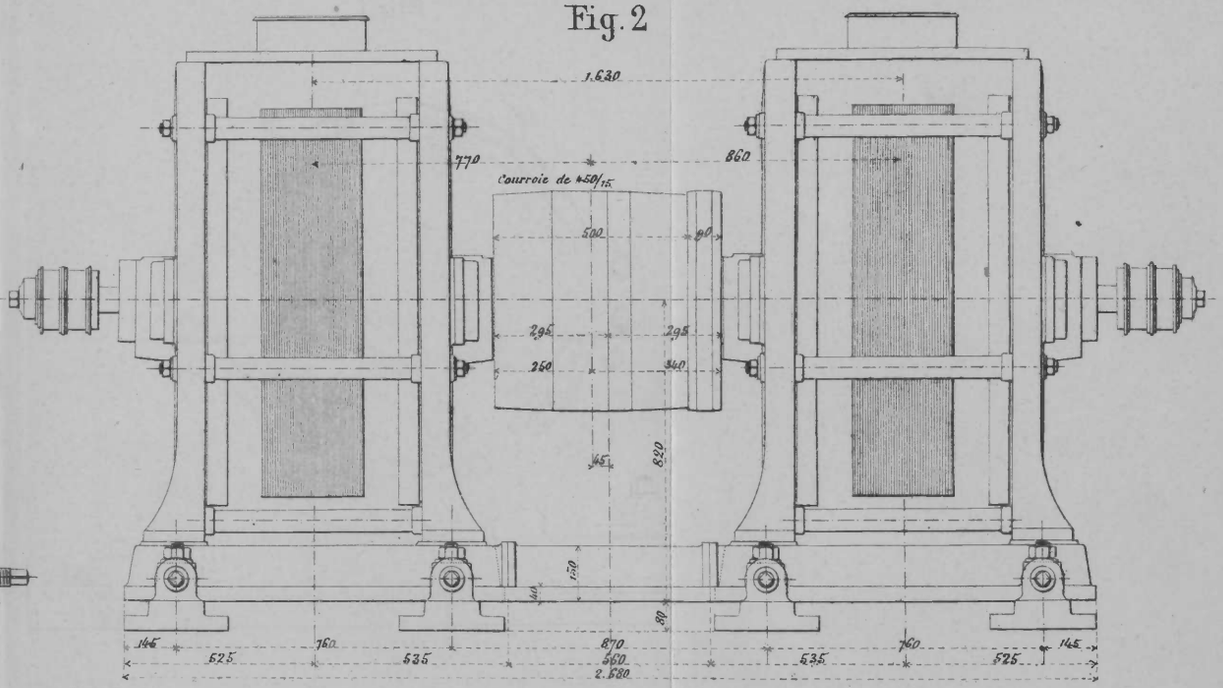
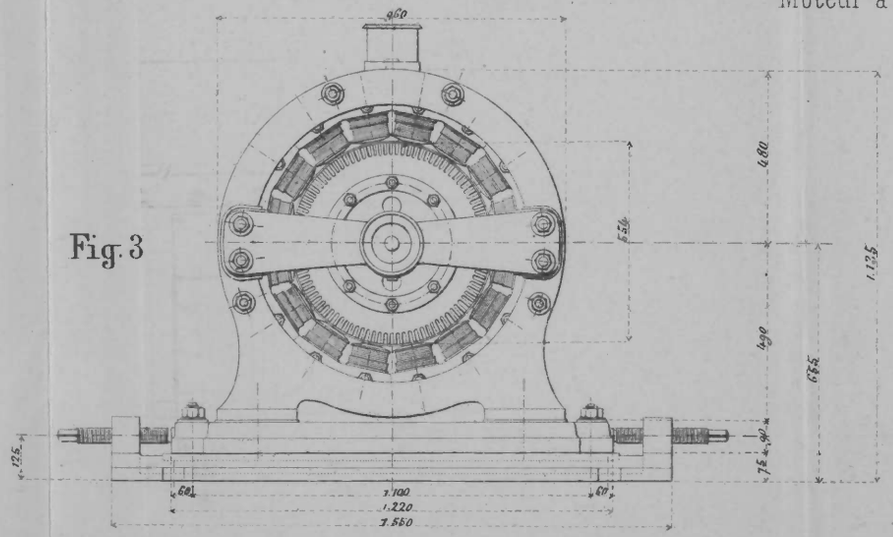


Fig. 2



Moteur à courants alternatifs

Fig. 3



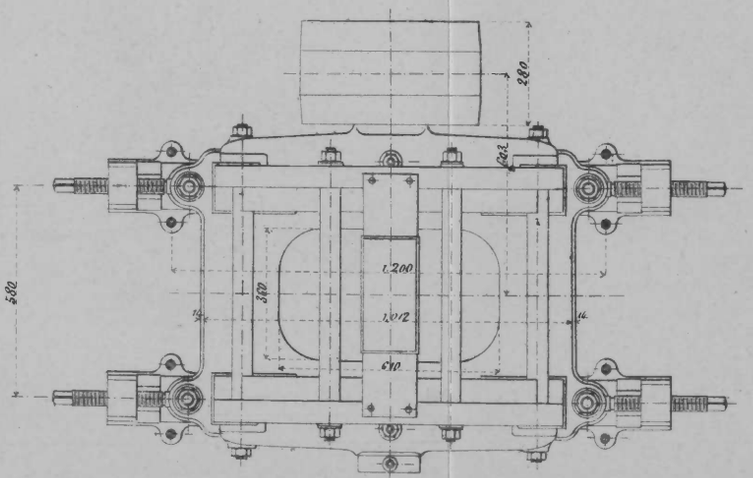
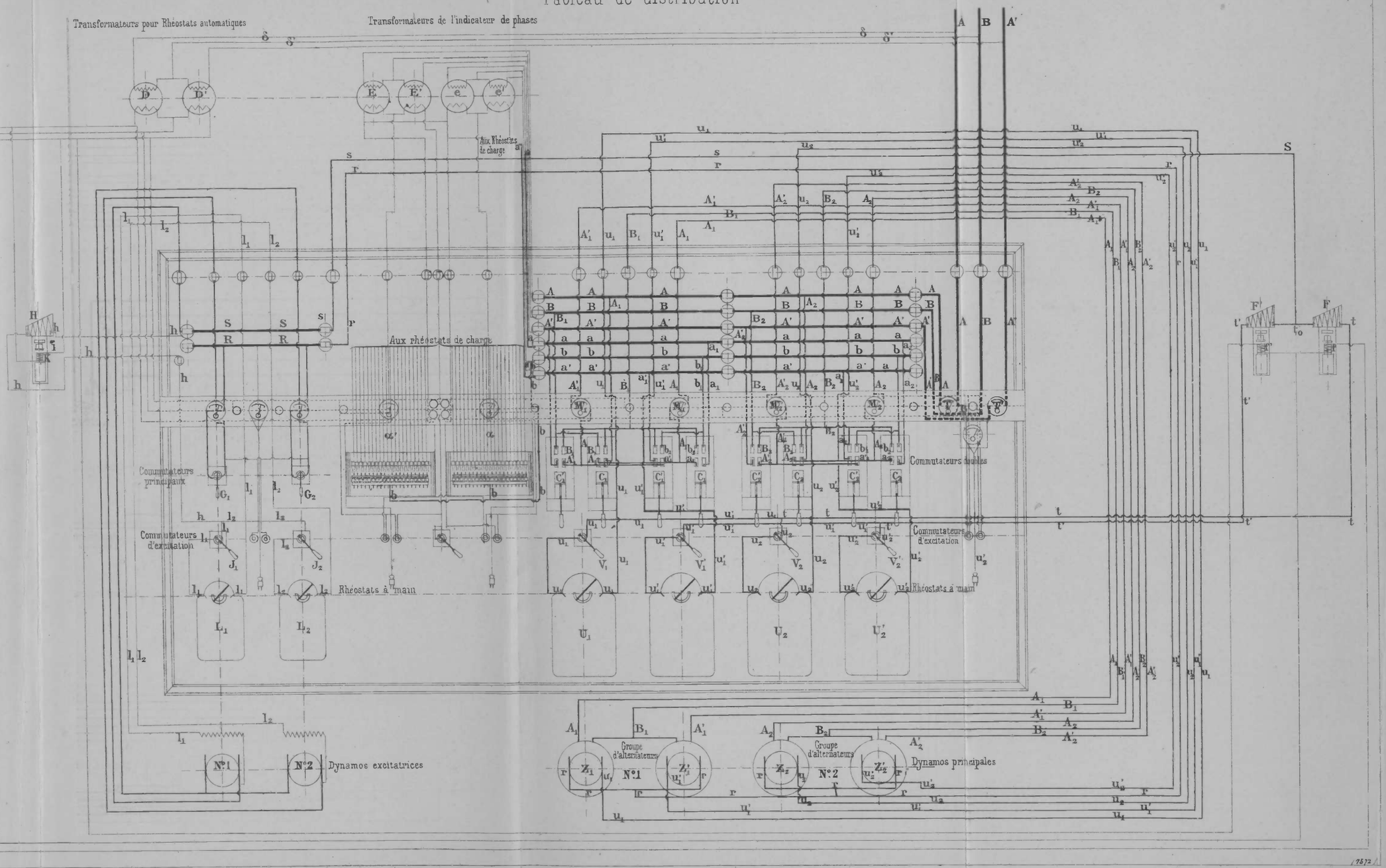


Fig. 4.

Auto-Imp. L. Courtier, 43, rue de Dunkerque, Paris.



Annales des Mines, 9e Série, Tome IV, pages 599 et suivantes.

Auto-Imp. L. Courtier, 43, rue de Dunkerque, Paris.