

N<sup>o</sup> 433  
(4)

ANNALES  
DES MINES

9108

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 conseiller d'Etat, directeur du personnel, du secrétariat et de la comptabilité, est composée ainsi qu'il suit :

MM.

JACQUOT, inspecteur général des mines,  
*président.*

BOCHET, inspecteur général.

L. LUUYT, inspecteur général, directeur  
de l'École supérieure des mines.

PESCHART D'AMBLY, inspecteur général.

LINDER, d<sup>e</sup>

CASTEL, d<sup>e</sup>

HATON DE LA GOUPILLIÈRE, inspecteur  
général.

ROGER, inspecteur général.

ORSEL, d<sup>e</sup>

MALLARD, inspecteur général, profes-  
seur à l'École supérieure des mines.

LORIEUX, inspecteur général, secrétaire  
du conseil général des mines.

RÉSAL, ingénieur en chef, 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.

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

VICAIRE, d<sup>e</sup>

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

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

DOUVILLÉ, d<sup>e</sup>

BERTRAND, ingénieur, professeur à  
l'École supérieure des mines.

LODIN, d<sup>e</sup>

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 sur mémoire, au prix de revient.

La publication des ANNALES DES MINES a lieu par livraisons, qui paraissent tous les deux mois.

Les six 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 90 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.

N<sup>o</sup> 433  
041

# 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.

### HUITIÈME SÉRIE

MÉMOIRES. — TOME XI

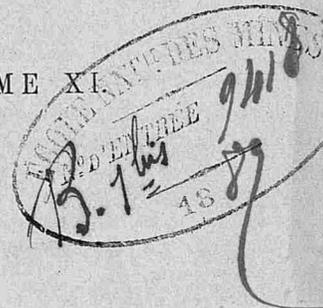
PARIS

V<sup>VE</sup> CH. DUNOD, ÉDITEUR

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

Quai des Augustins, n<sup>o</sup> 49

1887



« Ils assurent plus de régularité et permettent de donner, en cas de nécessité, un coup de collier pour rétablir le service, après un de ces arrêts du trait dans le puits d'extraction, qui se répercutent dans toute la mine, avec le herschage ordinaire, en exigeant un temps assez long pour remettre en mouvement les trains immobilisés dans toutes les gares (Haton de la Goupillière, *Traité d'Exploitation*, t. I, p. 738). »

C'est ordinairement dans le travers-bancs qui relie le puits d'extraction aux couches exploitées à chacun des étages en activité, et quelquefois même dans les galeries de roulage de ces étages que l'on établit les tractions mécaniques. Dès lors, étant donné que le puits d'extraction sert ordinairement de puits d'entrée d'air, et que le courant parcourt le travers-bancs de jonction pour arriver aux galeries dans la couche où il se bifurque pour parcourir en tous sens les travaux, nous pouvons conclure, que le plus généralement, un transport mécanique établi dans une mine, à un étage quelconque, sera appelé à fonctionner dans le courant d'air d'entrée, ce qui lui impose des conditions spéciales pour éviter la viciation de l'air qui doit remplir toute la mine, mais lui donne à d'autres points de vue une certaine latitude; beaucoup plus rarement, il se trouvera dans le retour d'air.

Comme moteurs, les systèmes de transport mécaniques emploieront ou bien des machines mobiles, c'est le cas des locomotives souterraines, ou bien des machines fixes dont le mouvement se transmettra aux véhicules par des câbles dont l'arrangement variable a donné lieu aux systèmes connus :

- Corde tête-corde-queue;
- Corde sans fin;
- Câble traînant;
- Chaîne flottante.

Ces différents systèmes sont certainement très commodes et d'une application facile; ils sont au moins les plus répandus jusqu'à ce jour. Mais il semble qu'en principe, et toutes choses égales d'ailleurs, l'emploi des locomotives doit être préférable, en ce sens qu'il affranchit l'exploitation de charges qui peuvent être, dans certains cas, assez onéreuses, savoir : 1° L'emploi de câbles dont la longueur est au moins double, quelquefois triple de la distance à parcourir. L'entretien et le remplacement de ces câbles peut grever assez fortement le prix de revient de l'unité de travail utile. 2° L'emploi de rouleaux (tail-ropes) et l'entretien d'un ballast soigné sur la voie. 3° La mise en mouvement de longueurs considérables, à grande vitesse (tail-ropes, corde sans fin), qui exige pour la machine motrice un excès de puissance assez considérable. Le travail absorbé par le câble représente 45 à 47 p. 100 du travail total du moteur dans les systèmes corde-queue et corde sans fin (Haton de la Goupillière, t. I, p. 758). Il est vrai qu'une partie de la puissance d'une locomotive est employée à la mettre elle-même en mouvement; mais le travail ainsi absorbé n'est qu'une faible partie du travail total, et nous verrons plus loin, dans les expériences faites à Zaukeroda que le travail ainsi absorbé correspondait, en chevaux, de 0<sup>ch</sup>,40 à 0<sup>ch</sup>,50 pour un travail total de 2<sup>ch</sup>,15 à 4<sup>ch</sup>,18, avec des vitesses variant de 2<sup>m</sup>,6 à 1<sup>m</sup>,96. 4° La nécessité d'avoir avec certains systèmes (chaîne flottante) un nombre de véhicules très considérable, qui croît proportionnellement à la distance. Enfin le système de traction par locomotives partage avec le tail-ropes l'avantage d'admettre les courbes (pourvu que le rayon ne descende pas au-dessous de 20 mètres, à cause de la vitesse), et enfin il a de commun avec le tail-ropes et la chaîne flottante d'admettre les bifurcations sans exiger, comme le premier, les manœuvres d'ajustage des câbles, et comme la seconde, des installations particulières de

poulies avec des receveurs et des envoyeurs sur chacune des voies. Tout au plus sera-t-il nécessaire d'avoir un aiguilleur aux bifurcations. En résumé, on voit que l'emploi des locomotives réunit tous les avantages des différents systèmes, sans avoir aucun de leurs inconvénients. La raison qui s'est opposée jusqu'ici à leur emploi dans les mines doit être uniquement cherchée dans la nature de l'agent moteur.

On peut employer, en effet, avec un quelconque des systèmes cités, l'un des deux agents moteurs principaux dont on dispose généralement dans les mines : la vapeur et l'air comprimé.

Pour les locomotives de mines, l'emploi de la vapeur est à peu près impossible dans les conditions ordinaires, en raison de la fumée qui en résulte et qui est inadmissible dans une galerie d'entrée d'air. Dans un retour d'air, l'emploi de la vapeur est également impossible si la mine est grisouteuse, en raison des dangers qu'offre l'existence d'un foyer constamment allumé sur le passage de l'air grisouteux. Si la mine n'est pas grisouteuse, l'emploi de la vapeur sera peut-être possible, à la condition que la ventilation soit assez active pour que le dégagement de fumée ne rende pas le séjour de la galerie impossible aux manœuvres. L'emploi de l'air comprimé aurait le grand avantage de supprimer toutes ces difficultés; malheureusement la nécessité de l'employer à des pressions élevées et le refroidissement intense qui résulte de sa détente, et détermine la formation de glace qui arrête la machine, exigent qu'on ait recours à des dispositions spéciales. La combinaison bien connue de M. Mékarski résout très heureusement le problème, et cet inventeur a même construit un type de locomotive de mine qui figurait à l'exposition de 1878. Le prix de revient calculé de la tonne kilométrique pour une exploitation de 500 tonnes kilométriques serait, d'après l'inventeur, de 4 à 5 cen-

times. Toutefois, soit que les difficultés résultant du double tuyautage, du défaut d'étanchéité des joints, de la nécessité d'avoir des compresseurs spéciaux, aient fait reculer les mineurs devant des frais de premier établissement trop considérables, soit que le système en lui-même n'ait pas donné à la pratique des résultats aussi bons que se les promettait l'inventeur, il est certain que jusqu'à présent ce système n'est pas encore entré dans la pratique des mines.

Dans l'application de la vapeur comme agent moteur aux machines fixes des tractions mécaniques proprement dites, on peut, ou bien installer les générateurs au fond, ou bien les installer à la surface et envoyer la vapeur au fond au moyen d'une conduite spéciale, ou enfin produire à la surface directement le travail à utiliser et le transmettre au fond, soit directement par câbles télodynamiques, soit indirectement au moyen d'un agent moteur de seconde main, tel que l'air comprimé ou bien l'eau sous pression.

Le premier système est généralement écarté, surtout dans les mines de combustibles où l'établissement de générateurs au fond peut être une cause d'incendie et où les conditions d'isolement de ces générateurs doivent être particulièrement soignées. Le deuxième système est plus souvent employé; mais il nécessite l'emploi de tuyauteries excessivement soignées, et feutrées le mieux possible, pour l'introduction de la vapeur; l'installation et l'entretien de ces tuyauteries est assez onéreux, et les pertes par condensation de la vapeur élèvent sensiblement le prix de revient du travail transmis.

Ces deux systèmes ont, en outre, un inconvénient commun, moindre toutefois avec le second, qui est d'échauffer l'air, soit dans le puits lui-même, soit aux abords du puits, et de rendre plus difficile par conséquent l'aérage.

La transmission du travail mécanique, produit à la sur-

face au moyen de câbles télodynamiques, a été employée en Angleterre, en Belgique, et en France, à Ferfay, à la fosse n° 3. Nous ne savons pas quel peut être le rendement mécanique de ce mode de transmission dans le cas particulier de l'application aux mines, mais il ne paraît pas très avantageux, à en juger par le prix de revient de 0<sup>f</sup>,336 par tonne kilométrique utile obtenu à Ferfay pour une production de 270 tonnes par jour, avec le système de la chaîne flottante (Evrard, *Moyens de transport*, t. II).

L'air comprimé a été employé pour actionner des tractions mécaniques dans plusieurs mines (Haton de la Goupillière, *Traité d'exploitation*, tome I, page 787, note 1), mais le prix de revient n'a pas été publié. Il paraît être avantageux lorsqu'on dispose d'une installation déjà existante; mais il exige des frais de premier établissement et d'entretien considérables qui ne sont à la portée que d'un petit nombre de mines.

L'eau sous pression n'a pas encore été employée, au moins pour l'usage spécial des tractions mécaniques. Elle a du reste des inconvénients multiples.

A côté de ces deux agents de transmission est venu, depuis quelques années, s'en placer un nouveau, qui est comme eux un moteur de seconde main, l'électricité.

Il y a lieu de dire également de l'électricité considérée comme agent de transmission, ce que M. Haton de la Goupillière dit de l'air comprimé, qui est le « dépositaire souple et bienfaisant, au point de vue de l'exploitation souterraine, de l'énergie développée par un moteur distinct, mais infidèle, puisqu'à la perte déjà consommée dans le moteur proprement dit, il en superposera nécessairement une seconde pour le déploiement de la puissance dont il est le véhicule, et une troisième pour son propre transport. »

Ce n'est pas non plus, logiquement, au point de vue économique que se recommande l'emploi de l'électricité;

mais elle rachète ce défaut par des avantages si importants en ce qui concerne l'intérieur des mines que son application, bien qu'encore à son début, ne peut manquer d'y prendre un grand développement.

M. Haton de la Goupillière a donné (tome I, page 788, note 1) un résumé succinct de l'historique des essais de transport électrique du travail mécanique et indiqué les applications déjà réalisées en France, ainsi que le détail des pertes subies et le calcul d'un rendement d'après M. Tresca.

Malheureusement les prix de revient de l'unité de travail ne sont pas connus.

Pour ce qui concerne plus spécialement les tractions mécaniques en palier ou en faible rampe, la transmission du travail par voie électrique présente en outre cet avantage considérable, qu'elle permet l'emploi des locomotives et réalise par conséquent tous les avantages que nous avons déjà exposés, sur les tractions mécaniques en supprimant entièrement câbles et mécanismes. On conçoit donc déjà que, malgré le caractère onéreux d'un moteur de seconde main tel que l'électricité, on puisse encore trouver avantage à son emploi en raison de sa grande souplesse, et de l'extrême simplicité de son installation.

Nous avons visité pendant un voyage de mission en Allemagne en 1884, trois installations de chemins de fer électriques dans des mines, à Zaukeroda, près de Dresde (déjà cité par M. Haton de la Goupillière) à Beuthen (Haute-Silésie) et à Neu-Stassfurt. La présente note a pour objet de décrire ces installations, qui ont été faites par la maison Siemens et Halske, de Berlin, d'examiner leur mode de fonctionnement et de donner les prix de revient de la tonne kilométrique utile que nous avons pu constituer approximativement, soit au moyen de chiffres déjà publiés (Oberhergrath Förster, directeur de la

mine de Zaukeroda : *Die elektrische Grubeneisenbahn beim Oppelschachte des Königlichen Steinkohlenwerkes zu Zaukeroda (Jahrbuch für das Berg- und Hüttenwesen im Königreiche Sachsen auf das Jahr. 1883)* et *Die Streckenförderung auf den oberschlesischen Steinkohlengruben (Zeitschrift des Oberschlesischen Berg- und Hüttenmannischen Vereins. März-Juni 1885)*, soit au moyen de renseignements personnels recueillis sur place, ou fournis obligeamment par MM. Siemens et Halske.

## II. — PRINCIPE DES INSTALLATIONS.

D'une manière générale, un transport de force par l'électricité est constitué par un système de deux machines dynamo-électriques reliées par une ligne métallique servant au passage du courant électrique. L'une de ces machines est actionnée par un moteur et produit le courant : c'est la machine génératrice ou primaire; la seconde, qui reçoit par l'intermédiaire de la ligne le courant engendré par la première, est mise en mouvement par lui et restitue, pour les usages auxquels elle est destinée, une partie de l'énergie dépensée à actionner la première; elle porte le nom de machine réceptrice ou secondaire. Le transport de la force par l'électricité a fait déjà l'objet de nombreuses recherches et de brillantes études publiées dans les recueils spéciaux; aussi croyons-nous inutile de reproduire ici les théories établies et les discussions auxquelles elles peuvent donner lieu, et nous bornerons-nous à examiner ce que la question présente de particulièrement intéressant et pratique, dans le cas qui nous occupe, c'est-à-dire l'installation telle que nous l'avons vue dans les trois mines que nous avons visitées, renvoyant pour le côté théorique de la question aux publications telles que la *Lumière*

*électrique* pour les travaux de M. Marcel Deprez ou l'*Elektrotechnische Zeitschrift* pour les recherches de M. le docteur Fröhlich.

Nous retrouvons ici les trois termes constituants d'un transport de force par l'électricité : une machine génératrice ou primaire actionnée par un moteur, et placée à la surface; une ligne consistant en câbles métalliques, disposés dans le puits, qui relie la génératrice à la réceptrice située dans la mine, et enfin la réceptrice qui est une machine du même type que la génératrice, mais installée sur un truck spécial, de manière à utiliser le travail qu'elle restitue pour provoquer son propre déplacement, et à constituer une véritable locomotive.

## III. — MACHINE PRIMAIRE.

Les machines dynamo-électriques sont beaucoup trop connues actuellement pour que nous croyions utile de donner une description des machines employées comme primaires dans les installations que nous avons visitées. Qu'il nous suffise de dire que toutes elles étaient du modèle D<sub>0</sub> vertical de la maison Siemens et Halske (à Zaukeroda, l'enroulement était simple et la machine montée en série; à Beuthen et Neu Stassfurt, l'enroulement était mixte et la machine montée en compound); que, à Zaukeroda, le moteur était une petite machine verticale sans volant, à marche rapide et à action directe, pouvant donner environ 15 chevaux; que, à Beuthen et à Neu-Stassfurt, on avait utilisé des machines horizontales de 100-150 chevaux munies de volants puissants qui commandaient les arbres des machines au moyen de renvois par courroies. Enfin, dans les trois cas, les machines étaient à des distances des puits d'extraction qui pouvaient varier entre 10 et 50 mètres.

## IV. — LA LIGNE.

Le transport du courant électrique de la machine primaire à la locomotive exige un fil d'aller et un fil de retour.

A Zaukeroda, par exemple, la machine primaire est à une distance de 53 mètres du puits; le fil d'aller et le fil de retour sont constitués, au jour, par de gros fils de cuivre nus de 6<sup>mm</sup>,5 de diamètre. Dans le puits, pour l'aller, on a un fil de cuivre de 6<sup>mm</sup>,5 enveloppé de gutta-percha, de plomb et d'une armature de fils de fer galvanisé (*fig. 4*, Pl. 1); pour le retour, la composition du câble est la même, sauf l'armature de fils de fer qui manque. L'un et l'autre sont d'ailleurs enveloppés d'une toile goudronnée et suspendus, tous les 10 mètres, par des agrafes. Cette installation étant la première en date, on avait voulu faire l'essai des deux types de câbles; l'expérience ayant prouvé que le second résistait aussi bien que le premier et donnait un isolement aussi parfait, on l'a employé ensuite exclusivement dans les installations de Beuthen et de Neu-Stassfurt.

A la recette inférieure ces câbles aboutissent à la canalisation du travers-bancs, qui est constituée par deux lignes de rails à section en forme de  $\perp$  portés par des isolateurs. Ces rails pèsent 5 kilogrammes le mètre courant; ils sont soudés bout à bout.

La *fig. 5*, Pl. 1 montre, en coupe, comment les rails R sont fixés aux isolateurs.

Sur cette double ligne de rails glissent des contacts mobiles dont les *fig. 6, 7, 8*, Pl. 1 donnent le plan, la coupe et l'élévation. Ces contacts sont suspendus aux patins des rails au moyen des appendices  $hh_1$  et portent une série de ressorts  $b b_1, b_2 b_3$ , qui appuient fortement sur la face inférieure du rail, de manière à mettre en communication

électrique ce rail et la traverse inférieure du contact à laquelle est fixée la petite tige  $g$  (mobile autour de son axe) d'où part un fil de cuivre isolé qui va à la locomotive. Celle-ci se déplaçant sur la voie provoquera également le déplacement des contacts en tirant sur les câbles  $oo$  (*fig. 2*) qui lui amènent le courant. De peur que ces efforts continuels ne vinssent à rompre ces câbles, on a ajouté des câbles ordinaires un peu plus courts que les premiers, de manière que ceux-ci n'ont plus à supporter aucun effort de traction.

## V. — LA LOCOMOTIVE.

Pour la locomotive, nous croyons devoir, bien que sa description ait déjà été publiée dans les recueils spéciaux, donner sur sa construction et son mode de fonctionnement quelques détails que, pour ne pas allonger la description pratique des installations, nous réunirons à la fin de cette note sous forme d'annexe.

*Manœuvres.* — Nous empruntons à M. l'Oberbergrath Förster (*loc. cit.*) la description des manœuvres à Zaukeroda. Elle se retrouve partout ailleurs dans les mêmes conditions.

Le travers-bancs de Zaukeroda, où le chemin de fer électrique est installé, se dirige du puits Opper dans la direction sud-ouest jusqu'à la couche; il est muni d'une double voie (Pl. 1, *fig. 1 à 3*).

« La voie sud-est sert pour les pleins, la voie du nord-ouest pour les vides. Le personnel a, en conséquence, l'ordre de garer toujours les trains à droite. Comme il n'y a jamais qu'un train en mouvement, tout danger pour le personnel est écarté.

« Le chemin de fer électrique fonctionne sur une lon-

gueur active de 620 mètres, c'est-à-dire que c'est sur cette longueur que la locomotive conduit les trains vides du puits à la couche, les trains chargés de la couche au puits. La partie restante du travers-bancs, long de 720 mètres en tout, est employée pour la formation des trains aux deux extrémités du travers-bancs.

« Il n'est pas nécessaire d'avoir un personnel spécial pour cette formation des trains. En avant, au puits Oppel, l'enchaîneur pousse immédiatement les wagons vides tirés du compartiment d'extraction du puits, sur la voie des vides jusqu'au delà de l'aiguille n° I (voir Pl. 1, *fig. 1 bis*). A l'autre extrémité du travers-bancs les trains sont formés, soit que les chevaux amènent les wagons pleins de la galerie de roulage directement sur la voie des pleins, soit que l'enchaîneur de la balance S<sub>1</sub> (*fig. 1*) y pousse directement les wagons pleins venant de l'étage supérieur.

« La locomotive, arrivant vers le puits avec un train chargé sur la voie des pleins, passe de la voie des pleins à la voie des vides au moyen de l'aiguille n° I, se place derrière le train vide qui l'attend et le *pousse* sur la voie des vides (*fig. 2*) le long du travers-bancs jusqu'à ce qu'elle arrive à l'aiguille III qui se trouve à l'extrémité sud-ouest du travers-bancs. La locomotive abandonne ensuite le train vide à la conduite des chevaux et utilise l'aiguille n° III pour passer sur la voie des pleins et se placer derrière le train chargé qui a été formé par les hommes sur la voie des pleins, et amené exactement devant l'aiguille n° III du côté du puits. Elle *pousse* alors ce train et l'amène jusqu'au puits jusqu'à ce qu'elle ait légèrement dépassé l'aiguille I; elle renverse alors sa marche et recommence de la même manière avec le train vide.

« L'aiguille n° II n'est utilisée qu'exceptionnellement, et seulement dans le cas où il y a entre la recette et elle tant de wagons pleins que l'aiguille n° I ne peut plus être

utilisée. Alors le train vide se place derrière l'aiguille II et celle-ci sert, dans ce cas, au passage de la locomotive de la voie des pleins à la voie des vides.

« Sur le premier wagon du train est installée une lanterne rouge pour avertir les hommes qui peuvent se trouver dans le travers-bancs. La lanterne de la locomotive qui est tournée également dans la direction du mouvement est blanche.

« Enfin, tout le long du travers-bancs, courent à côté l'un de l'autre deux fils nus,  $r$ ,  $r_1$ ,  $r_2$ , qui sont les conducteurs d'une sonnette électrique. De cette manière, on peut mettre celle-ci en mouvement, de la locomotive, à tout instant et dans toutes les positions du train, en pressant de la main les deux fils l'un contre l'autre. Les signaux sont transmis au mécanicien du jour et servent, moyennant une convention particulière, à lui donner à tout instant les indications nécessaires, si l'extraction doit rester interrompue pendant quelque temps, ou si elle doit recommencer, ou si le courant est trop faible. »

M. Förster fait remarquer avec raison que la locomotive agissant par poussée et non par traction on fait, de ce chef, une économie de temps et de travail. Cela est fort juste dans le cas où l'on se trouve à Zaukeroda pour les wagons pleins qui viennent de la balance S<sub>1</sub> et que l'on n'a pas besoin d'assembler, mais pour les wagons qui sont amenés par les chevaux le couplage des wagons est tout fait, et l'économie n'existe pas. Pour les wagons vides venant du puits, il est bien vrai qu'il y a gain de temps au puits puisqu'on n'a pas besoin de les coupler, mais il faudra bien le faire à l'extrémité du travers-bancs pour ceux qui seront emmenés plus loin par les chevaux. Il n'y a donc d'exception que pour les wagons qui passent par la balance et qu'il fallait coupler avant, tandis qu'on les laisse indépendants maintenant. Ce sont ces wagons seuls qui réalisent une économie. Dans les conditions

ordinaires le couplage doit toujours être fait si on se sert à un moment quelconque de chevaux. On peut, d'ailleurs, faire agir la locomotive par traction ou par poussée. A Hohenzollern-Grube on fait agir la locomotive à la traction pour éviter les déraillements trop fréquents lorsqu'on l'employait à refouler le train.

Nous ferons observer, en outre, qu'il n'est pas nécessaire que le travers-bancs soit à double voie. Il se trouvait établi dans ces conditions à Zaukeroda avant l'installation du chemin de fer électrique, mais rien n'empêche d'utiliser une galerie à une seule voie, pourvu seulement que l'on puisse établir à chaque extrémité une portion en double voie suffisante pour garer les trains formés, et que la partie restante de la voie unique soit assez longue pour permettre de loger le train arrivant et de faire les manœuvres de changement de voie de la locomotive.

#### VI. — INSTALLATIONS DÉJÀ EXISTANTES.

Nous avons visité trois installations électriques à Zaukeroda, à Beuthen et à Neu-Stassfurt.

a) *Installation de Zaukeroda.* — Ouverture, 1<sup>er</sup> septembre 1882.

Le travers-bancs n° 5 dans lequel se trouve le chemin de fer est situé à la profondeur de 220 mètres et il a 720 mètres de longueur; 620 mètres seulement servent au transport. Il possède deux voies en rails d'acier de 65 millimètres de hauteur, 80 millimètres de patin, et pesant 6<sup>kg</sup>,77 le mètre courant. La voie est très sensiblement horizontale.

La machine génératrice tourne à 750-850 tours par minute. La locomotive a les dimensions suivantes :

Longueur . . . . .	2 <sup>m</sup> ,43
Largeur . . . . .	0 <sup>m</sup> ,80
Hauteur totale . . . . .	1 <sup>m</sup> ,50
Poids . . . . .	1.600 kilog.

Les convois sont formés de 10 à 15 wagons chargés ayant les dimensions suivantes :

Longueur . . . . .	1 <sup>m</sup> ,50
Largeur . . . . .	0 <sup>m</sup> ,65
Hauteur . . . . .	1 <sup>m</sup> ,00
Poids mort . . . . .	250 kilog.
Poids utile . . . . .	475 —
Poids brut . . . . .	725 —
Vitesse moyenne obtenue, par seconde . . . . .	2 <sup>m</sup> ,6

Extraction totale pour 2 postes de 8 heures :

Année 1883. . . . .	660 wagons correspond à 314 tonnes utiles
En pleine exploitation 800 —	380 —
Le premier cas correspond à 195 tonnes kilométriques utiles.	
Le second cas correspond à 236 —	—

Le personnel spécial au chemin de fer électrique comprend, pour 2 postes, 2 conducteurs de locomotive : 2 hommes à la machine sur 2/3 de leurs postes qui sont de 12 heures.

L'ensemble du matériel fourni par la maison Siemens et Halske comprend :

1 locomotive électrique (devant fournir, d'après le traité, la force nécessaire pour traîner au moins 10 wagons chargés, c'est-à-dire un poids brut de 7.250 kilogrammes avec 2 mètres de vitesse minima);

1 machine génératrice avec moteur à vapeur;

700 mètres courants de conducteurs doubles avec les isolateurs pour les fixer;

260 mètres de câbles pour réunir la génératrice à ces conducteurs. Diverses pièces de réserve.

Le prix de l'ensemble est de . . . . .	14.000 marks.
Transport de Berlin à Zaukeroda . . . . .	275 —
Conduites de vapeur, courroies, etc. . . . .	315 —
Fournitures diverses pour rails conducteurs, etc. . . . .	373 —
Pose . . . . .	960 —
Frais de premier établissement . . . . .	16.238 marks.

Soit 20.297 francs.

b) *Installation de Hohenzollern-Grube à Beuthen.* — Ouverture, 24 septembre 1883.

Situation de la voie : travers-bancs à 180 mètres de profondeur.  
Longueur de la voie : environ 800 mètres.  
Largeur de la voie : 0<sup>m</sup>,628.  
Inclinaison : sensiblement horizontale.  
Vitesse obtenue : 3 mètres par seconde.  
Poids de la locomotive : environ 2.200 kilogr. (En raison de la mauvaise adhérence aux rails dans la mine).

Depuis 1884 (juillet) une seconde locomotive, un peu plus grosse et plus lourde, avec quelques changements et améliorations (mentionnés dans l'annexè) est entrée en service. Son poids est de 2.560 kilogrammes.

Puissance de la locomotive : l'effort de traction développé est de 175 kilogrammes pour une vitesse de 3 mètres par seconde.

L'installation de la ligne est en tout semblable à celle de Zaukeroda.

Résistance de la ligne . . . . .	0,8 ohms.
Force électromotrice développée . . . . .	320 volts.
Intensité du courant . . . . .	25 ampères.
Travail disponible sur l'arbre de la réceptrice . . . . .	5 à 10 chevaux.

Le prix de l'ensemble de l'installation électrique est de 25.000 francs, savoir :

Locomotive capable de remorquer un poids brut de 75.000 kilogr. avec une vitesse de 3 mètres par seconde . . . . .	8.750 fr.
Machine primaire . . . . .	5.000
870 mètres de conducteurs en <b>I</b> avec isolateurs . . . . .	6.250
230 mètres de câbles . . . . .	1.250
Armature de réserve, emballage, installation, etc. . . . .	3.750

25.000 fr.

Durée de l'extraction . . . . .	40 heures.
Poids brut, des wagons pleins . . . . .	950 kilogr.
Poids utile . . . . .	575 —
Poids mort . . . . .	375 —

Depuis notre visite, on a installé à Hohenzollern-Grube un deuxième chemin de fer électrique qui a une longueur d'environ 1.000 mètres. Actuellement (1886) 3 locomotives électriques du poids de 2.500 kilogrammes chacune y sont en service.

c) *Installation de Neu-Stassfurt.* — Ouverture 21 décembre 1883 :

Situation de la voie : 330 mètres au-dessous de la surface.  
Longueur de la voie : environ 1.100 mètres.  
Largeur de la voie : 0<sup>m</sup>,615.  
Inclinaison : horizontale.  
Vitesse obtenue : 3 mètres par seconde.  
Poids de la locomotive : 1.975 kilogr.

Puissance de la locomotive : l'effort de traction développé est de 175 kilogrammes avec la vitesse indiquée de 3 mètres.

Les trains comportent 10 wagons chargés d'un poids brut de 12.000 kilogrammes.

La ligne est constituée de la même manière que dans les deux autres installations.

Le puits d'extraction se trouve à peu près au milieu, à environ 600 mètres de l'une des extrémités.

Les données électriques et le travail disponible sont les mêmes qu'à Hohenzollern-Grube.

Une deuxième traction électrique a été établie sur 1.500 mètres de longueur, depuis notre visite, avec une seconde locomotive. On s'occupe actuellement (1886) d'installer un treuil électrique de 10 chevaux pour faire le service d'un plan incliné.

## VII. — RÉSULTATS OBTENUS.

Pour ce qui est des résultats obtenus nous ne pouvons que reproduire, d'après M. l'Oberbergrath Förster, le tableau des expériences qui ont été faites à Zaukeroda :

NUMÉROS des observations.	NOMBRE de wagons transportés.	EFFORT de traction de la locomotive.		VITESSE MOYENNE par seconde.	PUISSANCE de la locomotive.		NOMBRE DE TOURS de la machine à vapeur pendant le trajet du train.	TOURS de la machine à vapeur par minute.	PUISSANCE DE VAPEUR Indiquée dans le cylindre.
		Y compris 15 kilogr. pour le mouvement propre de la locomotive.	Non compris 15 kil. pour le mouvement propre de la locomotive.		Y compris son propre mouvement	Non compris son propre mouvement			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	10 pleins. . . . .	kilogr. 95	kilogr. 80	mèt. 2,34	ch. v. 2,97	ch. v. 2,50	885	200,4	ch. v. 7,8
2	15 pleins en partie insuffisamment graissés.	160	145	1,96	4,18	3,79	1.038	195,9	13,8
3	20 pleins bien graissés. . . . .	180	165	1,44	3,46	3,17	1.242	173,2	14,7
4	20 pleins parmi lesquels quelques-uns insuffisamment graissés. . . . .	230	215	0,78	2,40	2,24	?	?	?
Limite à ne pas atteindre. Le train était parfois sur le point de rester en place.									
5	10 vides. . . . .	50	35	2,76	1,84	1,29	798	217,8	4,9
6	15 vides. . . . .	60	45	2,66	2,43	1,39	830	212,8	6,0
7	20 vides. . . . .	75	60	2,34	2,34	1,87	833	189,0	8,6

Partant de l'expérience n° 2, M. Förster se propose de calculer le rendement mécanique de la transmission électrique, c'est-à-dire le rapport du travail disponible sur l'arbre de la réceptrice au travail dépensé sur l'arbre de la génératrice.

Dans ce cas, le diagramme pris sur la machine à vapeur a donné 13<sup>ch</sup>,8 dépensés. On mesura au frein, sur l'arbre de la machine, le travail effectif et on trouva :

$$11^{\text{ch}},2.$$

La locomotive développait en même temps un travail de 4<sup>ch</sup>,18. Pour passer au travail disponible sur l'arbre de la réceptrice. M. Förster admet une absorption de 25 p. 100 (chiffre probablement trop faible) dans les trains d'engrenage de la locomotive et calcule ce travail disponible par

$$\left(1 + \frac{25}{100}\right) 4,18 = 5^{\text{ch}},22.$$

Le rendement mécanique de la transmission électrique a donc pour expression :

$$\frac{5,22}{11,2} = 46,6 \text{ p. } 100,$$

chiffre en somme parfaitement admissible avec un courant d'une intensité et d'une force électromotrice aussi peu considérables.

Ce rendement ainsi calculé n'a du reste aucune valeur au point de vue scientifique; il est dépourvu de toute exactitude et de tout intérêt au point de vue pratique; la considération du rendement de la transmission électrique nous importe fort peu; la seule chose que nous ayons à considérer est le prix de revient de la tonne kilométrique utile.

Nous avons déjà dit plus haut que l'extraction totale par journée de 16 heures était, en temps de faible extraction :

$$660 \text{ wagons} = 314 \text{ tonnes utiles} = 495 \text{ tonnes kilométriques utiles.}$$

dans le cas de pleine extraction, parfaitement réalisable avec le matériel actuel :

$$800 \text{ wagons} = 580 \text{ tonnes utiles} = 236 \text{ tonnes kilométriques utiles.}$$

*Hohenzollern-Grube.* — Nous n'avons pas de résultats d'expériences faites à Hohenzollern-Grube, mais nous avons relevé les chiffres suivants sur les registres de la mine :

Année 1884. — Longueur exploitée, 800 mètres.

MOIS.	NOMBRE de wagons pleins transportés.	POIDS UTILE de charbon en tonnes.	NOMBRE de trains de 15 wagons pleins par journée de 10 heures.	PAR JOUR.	
				Poids utile transporté en tonnes.	Effet utile en tonnes kilométriq.
1	2	3	4	5	6
Janvier . . .	14.367	7.901	45	263	210,4
Février . . .	12.889	7.089	40	236	188,8
Mars . . . .	16.047	8.826	42	294	235,2
Avril . . . .	14.214	7.816	43	261	208,8
Mai . . . . .	17.549	9.663	47	322	257,6
Juin . . . . .	16.930	9.311	48-49	310	248,0
Juillet . . .	20.644	11.354	45	378	302,4
Total . . . .	112.637	51.960			
Moyennes . .	16.091	7.423	44,3	295	236

Le maximum a été obtenu le 27 août où on a transporté 917 wagons pleins répartis entre 62 trains.

Le poids de charbon transporté a été de 504 tonnes correspondant à 403 tonnes kilométriques utiles.

Les chiffres qui précèdent montrent tout d'abord que les conditions économiques dans lesquelles ces installations fonctionnent laissent notablement à désirer. Ces extractions de 314 tonnes (Zaukeroda) et 295 tonnes (Hohenzollern-Grube) sont suffisantes pour les besoins de ces mines, mais elles utilisent incomplètement les moyens mis à leur disposition. Il suffit, pour s'en rendre compte, d'évaluer le temps réel de travail de la locomotive. Nous allons voir qu'il n'atteint que 50 à 60 p. 100 du temps total employé à l'extraction. Il est évident que c'est là une utilisation défectueuse, pour plusieurs raisons; la première est que si le conducteur de la locomotive néglige d'avertir le mécanicien du jour de l'arrêt d'extraction, celui-ci laissera sa machine marcher en pure perte; en second lieu, le salaire du conducteur et celui du mécanicien, portant de cette manière sur un nombre de tonnes

transportées moindre, grèvent chacune d'elles plus lourdement; en troisième lieu enfin, les intérêts et l'amortissement du premier établissement, ainsi que les frais d'entretien divers grèvent, pour les mêmes raisons, plus lourdement, les résultats obtenus. Il y aurait donc un avantage probablement assez considérable à concentrer davantage encore l'extraction sur un puits pour y employer la locomotive électrique.

Voyons, par exemple, ce qui se passe à Zaukeroda: la distance parcourue est de 620 mètres qui exigeraient, avec la vitesse annoncée de 2<sup>m</sup>,6, une durée de 4 minutes pour chaque train plein. En admettant que le temps nécessaire à la manœuvre de la locomotive aux extrémités soit de 2 minutes, ce qui est bien suffisant, et que le retour des wagons vides exige le même temps que pour les wagons pleins, on arrive à attribuer à chaque voyage de la locomotive (train plein et train vide indistinctement), une durée de 5 minutes. Si, en raison des chiffres donnés dans le tableau des expériences (cité plus haut) nous prenons comme vitesse moyenne 2 mètres seulement, nous arrivons à attribuer à la durée moyenne d'un voyage de la locomotive 6<sup>min</sup>,10<sup>sec</sup>.

Pour Hohenzollern-Grube, où la vitesse atteint 3 mètres, le parcours est de 750 mètres, ce qui exige 4<sup>min</sup>,10<sup>sec</sup>.

La durée moyenne d'un trajet de locomotive sera 5<sup>min</sup>,10<sup>sec</sup>. Si nous admettons pour la vitesse un chiffre un peu inférieur, 2<sup>m</sup>,50 par exemple, nous arrivons à une durée moyenne de trajet de 6 minutes.

Cela posé, nous pouvons former le tableau suivant, qui montre bien quelle grande importance prennent les pertes de temps, et qui prouve la nécessité d'une concentration poussée plus loin encore pour obtenir une utilisation suffisamment économique des moyens de transport employés.

NOM DE LA MINE.	NOMBRE de wagons transportés.	NOMBRE TOTAL des trains (pleins et vides) (15 wagons).	DURÉE MOYENNE d'un trajet de la locomotive.	DURÉE des postes d'extraction.	TEMPS réellement employé.	TEMPS PERDU.	RENDEMENT Temps employé. Durée des postes d'extraction.
Zaukeroda. . . . .	660	88	3' 6' 40"	16 <sup>h</sup> 16 <sup>h</sup>	7 <sup>h</sup> 20' 9 <sup>h</sup> 17'	8 <sup>h</sup> 40' 6 <sup>h</sup> 43'	0,45 0,57
	800	106	3' 6' 40"	16 <sup>h</sup> "	9 <sup>h</sup> 11 <sup>h</sup> 11'	7 <sup>h</sup> 5 <sup>h</sup>	0,56 0,70
Hohenzollern-Grube. . .	510	68	3' 40' 6"	10 <sup>h</sup> "	6 <sup>h</sup> 6 <sup>h</sup> 43'	4 <sup>h</sup> 3 <sup>h</sup> 45'	0,60 0,67
Extraction réalisée le 27 août. . . . .	917	124	4' 50"	"	10 <sup>h</sup>	0	1

Il est particulièrement intéressant pour l'avenir des locomotives électriques, de remarquer que le dernier cas cité dans le tableau précédent, où 500 tonnes de charbon (correspondant à 400 tonnes kilométriques utiles) ont été transportées au puits représente le maximum de rendement de la locomotive dans ces conditions; mais qu'il ne représente pas cependant le maximum absolu possible, attendu que la machine primaire, construite pour marcher à 1000 tours, ne faisait que 800 tours à la minute; si elle marchait à sa vitesse normale, la locomotive pourrait remorquer des trains de 20 wagons pleins et transporter 660 tonnes, soit 520 tonnes kilométriques utiles.

On pourrait augmenter encore la puissance des locomotives en augmentant leurs dimensions, ce qui n'est pas impossible; on se trouverait toutefois limité, de ce côté, par les dimensions des galeries et des cages d'extraction et par la solidité de la voie; mais on pourrait aussi employer deux locomotives alimentées par deux circuits distincts, ou même par un seul et même circuit, comme il a été fait pour les tramways électriques de Sachsenhausen-Offenbach et de Mödling, près de Vienne (Autriche).

## VIII. — PRIX DE REVIENT.

La détermination d'un prix de revient est toujours une opération délicate, qu'il n'est guère possible de donner comme certaine et authentique que lorsqu'on a pu en déterminer soi-même tous les éléments, sinon (et tel est ici le cas), on est obligé de formuler d'avance toutes réserves à l'égard de résultats empruntés pour lesquels tout contrôle a été impossible.

Nous nous en tiendrons donc aux chiffres publiés par M. Förster.

M. Förster part de l'expérience n° 2 du tableau reproduit plus haut, où on a transporté 15 wagons, en partie insuffisamment graissés. On a observé les dépenses de vapeur suivantes :

Pour le voyage des wagons pleins. . . . .	8.101 mètres cubes.
— — vides . . . . .	4.200 —
La vapeur ayant une pression effective de.	3 <sup>at</sup> ,5.

Soit en tout 12<sup>m³</sup>,301.

(Cette consommation élevée, qui correspond à environ 21 kilogrammes de vapeur par cheval-heure, doit probablement être attribuée à ce que la machine employée est une petite machine à allure rapide, et par suite peu économique).

M. Förster ajoute à cette consommation une certaine quantité de vapeur correspondant à la marche de la machine pour les manœuvres, ou à vide, lorsque l'arrêt de l'extraction est de courte durée, qu'il évalue à 5 p. 100.

La consommation se trouve alors portée à

$$\left(1 + \frac{1}{20}\right) 12,301 = 12,9 \text{ mètres cubes.}$$

Le mètre cube de vapeur à 3<sup>at</sup>,05 effectives, coûte à Zaukeroda, d'après M. Förster :

0,40 pfennigs.

La dépense est donc :

$$12,9 \times 0,40 = 5,16 \text{ pfennigs.}$$

Pour un wagon on a donc une dépense de :

$$0^{\text{pf}},34.$$

Le salaire du conducteur de la locomotive est réglé de la manière suivante : Il reçoit, en commun, avec l'enchaîneur de la balance S, un salaire de 1<sup>pf</sup>,05 pour chaque wagon plein transporté dans le travers-bancs. La part du conducteur est de 0<sup>pf</sup>,08.

Quant aux mécaniciens de la surface qui sont de vieux ouvriers à salaire faible, l'ensemble de leurs gains pour la durée de 16 heures représente 3 marks 13 pfennigs.

Dès lors M. Förster établit son prix de revient de la manière suivante :

*Pour une extraction de 660 wagons en 16 heures.*

Salaire du conducteur, 0,8 par wagon . . . . .	5 <sup>ma</sup> ,28 pfg.
Vapeur, 0 <sup>ps</sup> ,34 par wagon . . . . .	2 ,24
Mécaniciens au jour . . . . .	3 ,13
Graissage, entretien, éclairage . . . . .	1 ,10
	<hr/>
	11 <sup>ma</sup> ,75 pfg.

Soit 1<sup>pf</sup>,78 par wagon.

En ajoutant à ces chiffres l'intérêt et l'amortissement du capital de premier établissement calculé à 15 p. 100 sur 300 jours de travail . . .	8 <sup>ma</sup> ,12 pfg.
	<hr/>
	19 <sup>ma</sup> ,87 pfg.

Soit 3<sup>pf</sup>,01 par wagon.

Si l'extraction était de 800 wagons, on aurait :

Conducteur de locomotive . . . . .	6 <sup>ma</sup> ,40 pfg.
Vapeur . . . . .	5 ,72
Mécaniciens . . . . .	3 ,13
Entretien, éclairage, graissage . . . . .	1 ,25
	<hr/>
	13 <sup>ma</sup> ,50 pfg.

Soit 1<sup>pf</sup>,69 par wagonnet.

Intérêt et amortissement du premier établissement . . . . .	8 <sup>ma</sup> ,12 pfg.
	<hr/>
	21 <sup>ma</sup> ,62 pfg.

Soit 2<sup>pf</sup>,70 par wagonnet.

*Tableau de comparaison avec les résultats précédemment obtenus avec l'extraction par chevaux et par hommes.*

NOMBRE des WAGONNETS.	EXTRACTION ÉLECTRIQUE.		EXTRACTION par chevaux.	EXTRACTION par rouleurs.
	Sans amortisse- ment du premier établissement	Avec amortisse- ment du premier établissement		
Pour 660 wagonnets . . . . .	Pf. Centim. 1,78=2 <sup>c</sup> ,22	Pf. Centim. 3,01=3 <sup>a</sup> ,76	Pf. Centim. 3,71=4 <sup>c</sup> ,64	Pf. Centim. 6,2=7 <sup>c</sup> ,7
Pour 800 — . . . . .	1,69=2 <sup>c</sup> ,02	2,70=3 <sup>c</sup> ,37	3,70=4 <sup>c</sup> ,63	6,2=7 <sup>c</sup> ,7
<i>Rapportés à la tonne kilométrique utile ces chiffres deviennent :</i>				
Pour 660 = 195 t. kilomét.	6,00=7 <sup>c</sup> ,5	10,2=12 <sup>c</sup> ,75	12,6=15 <sup>c</sup> ,7	21 <sup>p</sup> =26 <sup>c</sup>
Pour 800 = 236 t. kilomét.	5,72=7 <sup>c</sup> ,15	9,16=11 <sup>c</sup> ,45	12,5=15 <sup>c</sup> ,6	21 <sup>p</sup> =26 <sup>c</sup>

Les chiffres de M. Förster paraissent assez admissibles ; nous manquons, d'ailleurs, d'éléments pour les discuter. Nous devons toutefois remarquer que si les chiffres auxquels il arrive pour les frais d'exploitation seulement, sans acception de l'intérêt ni de l'amortissement du premier établissement, sont relativement élevés, on doit l'attribuer principalement au faible tonnage transporté, qui correspond seulement à 195 tonnes kilométriques utiles, alors qu'avec l'installation existante on pourrait facilement réaliser plus du double, comme nous l'avons montré plus haut ; ceci, d'ailleurs, ne fait que corroborer ce que nous avons déjà dit à ce sujet et montrer combien est juste et importante la réserve relative à l'importance du tonnage transporté, si nettement formulée par M. Haton de la Goupillière au sujet de l'emploi des tractions mécaniques.

Supposons, par exemple, que la mine de Hohenzollern-Grube soit capable de suffire constamment à l'extraction exceptionnelle du 27 août 1884 ; rien ne s'oppose à ce qu'elle le fasse avec le matériel existant. Voyons alors quel sera le prix de revient. Nous admettrons que le service de la traction électrique exige :

1 conducteur de locomotive (poste de 10 heures) avec un salaire de 6 francs.

2 manœuvres, un à chaque extrémité (l'enchaîneur du puits et les conducteurs de roulage n'ayant pas le temps de faire le service de formation des trains), avec un salaire de 3<sup>f</sup>,50.

La machine développant un travail indiqué de 18 chevaux (ce chiffre nous a été donné comme ayant été constaté dans les expériences, non publiées d'ailleurs, faites à Hohenzollern-Grube), ce qui correspond à 15 chevaux sur l'arbre sensiblement, et en admettant, dans une machine de cette force (100 chevaux) que la production du cheval-heure dépense 1<sup>k</sup>,5, la consommation-heure sera de 22<sup>k</sup>,5, soit par 10 heures, 0<sup>f</sup>,225, que nous comptons à 5<sup>f</sup>,50 la tonne.

Nous aurons alors par poste de 10 heures :

Un conducteur de locomotive. . . . .	6 <sup>f</sup> ,00
Deux manœuvres. . . . .	7,00
Un mécanicien. . . . .	5,00
Charbon, main-d'œuvre aux chaudières, entre- tien, graissage, etc. . . . .	4,50
	22 <sup>f</sup> ,50

qui, répartis sur une production de 400 tonnes kilométriques, donnent pour la tonne kilométrique :

5<sup>cent</sup>,58

#### IX. — COMPARAISON DU TRANSPORT PAR LOCOMOTIVES ÉLECTRIQUES AVEC LES AUTRES SYSTÈMES DE TRANSPORT MÉCANIQUES.

S'il est, en général, difficile d'établir le prix de revient d'une opération déterminée, il est plus difficile encore de le comparer à des prix de revient d'opérations similaires faites dans des conditions analogues, mais non identiques.

Il est si facile, en effet, de leur faire subir, dans un sens ou dans l'autre, des variations considérables, suivant qu'on y fait figurer, ou qu'on passe sous silence, telles ou telles dépenses, que l'on peut assez souvent arriver à démontrer aussi bien l'excellence que l'infériorité d'un système.

Dans le cas présent, nous avons, pour les locomotives électriques, deux prix de revient calculés par M. Förster pour les tonnages de 195 tonnes kilométriques et de 236 tonnes kilométriques utiles, avec une longueur de voie de 620 mètres, et un prix de revient évalué par nous pour un tonnage de 400 tonnes kilométriques utiles, avec une longueur de voie d'environ 800 mètres. Ces prix comportent uniquement les frais d'exploitation proprement dits ; ils ne font aucune acception des frais d'entretien, qu'il est assez difficile d'évaluer actuellement, ni des frais d'intérêt et d'amortissement du premier établissement parce qu'il faudrait être fixé sur la question de savoir : s'il y a lieu de compter dans le premier établissement les chaudières, les moteurs, et l'établissement de la voie, et aussi quelle durée doit être attribuée aux diverses parties du mécanisme pour fixer le taux de l'amortissement, ce qu'il est encore actuellement impossible de faire pour le système électrique. Il faudrait, en outre, pouvoir comparer les prix de revient dans des conditions identiques de tonnage kilométrique utile, et aussi de longueur de voie exploitée, car il est évident que plus la voie est longue, moindre est l'importance du temps perdu dans les manœuvres aux extrémités.

Cela posé, nous avons obtenu plus haut les résultats suivants :

*Frais d'exploitation à Zaukeroda (chiffres publiés par M. Förster). Longueur de voie, 620 mètres.*

Tonnage utile, 195 tonnes kilom.	Prix de 1 tonne kilom.	7 <sup>cent</sup> ,5.
— 236 — — —	— — —	7 <sup>cent</sup> ,15.

*Frais d'exploitation à Hohenzollern-Grube (chiffre calculé par nous).* Longueur de voie, 800 mètres.

Tonnage utile, 400 tonnes kilom. Prix de 1 tonne kilom. 3<sup>cent</sup>,58.

D'autre part, le rapport à l'Institut des ingénieurs des mines du nord de l'Angleterre (Briart et Weiler, 1871) donne pour prix de la tonne kilométrique utile, en ne prenant dans les éléments du prix de revient total que les articles charbon et main-d'œuvre, les chiffres suivants :

SYSTÈMES.	TONNAGE transporté par poste.	LONGUEUR de voie exploitée.	PRIX pour 1 tonne kilométrique.
		mètres	centimes
Corde-queue . . . . .	483	1.949	7,34
Corde sans fin . . . . .	431	956	8,07
Chaîne flottante . . . . .	407	777	5,32
Câble trainant . . . . .	328	1.270	12,95

Enfin, dans une très intéressante description de la traction mécanique par câble sans fin que nous avons visitée à Cadzow Colliery (Hamilton), en Écosse, publiée dans les *Transactions of the mining Institute of Scotland* (assemblée générale du 20 août 1885), M. David Ferguson, ingénieur de la mine, évalue à 1,334 penny le prix de revient de la tonne-mile (pour les frais d'exploitation seulement, c'est-à-dire charbon et main-d'œuvre), le tonnage total étant de 842 tonnes, et la longueur exploitée (le total étant constitué par plusieurs lignes actionnées simultanément) étant en moyenne de 1.200 mètres environ. Rapporté à la tonne de 1.000 kilogrammes et au kilomètre, ce prix devient 8<sup>cent</sup>,49 pour 1 tonne kilométrique.

Le chiffre que nous avons calculé à Hohenzollern-Grube pour 400 tonnes kilométriques utiles et 800 mètres de longueur de voie est donc très comparable et plutôt inférieur à ceux obtenus par les tractions mécaniques an-

glaises. Il resterait, pour faire une comparaison plus complète, à faire entrer les frais d'entretien et les intérêts et amortissements, qui sont probablement moindres avec le système des locomotives électriques en raison de la simplicité de l'installation.

La seule comparaison réellement valable entre deux systèmes serait une comparaison faite dans des conditions identiques de tonnage transporté et de longueur de voie. Ces conditions se rencontrent difficilement dans la pratique. M. Vogel, dans la *Zeitschrift für das Berg-Hütten- und Salinen-Wesen*, t. XXXI, p. 479, a essayé de calculer les prix comparés de la tonne kilométrique utile avec les diverses méthodes pour un tonnage transporté de 400 tonnes sur une longueur de voie de 2 kilomètres, soit 800 tonnes kilométriques utiles, acception faite de l'intérêt et de l'amortissement du premier établissement à raison de 5 et 10 p. 100. Il arrive aux résultats suivants :

1° Par chaîne automotrice . . . . .	2 <sup>cent</sup> ,875
2° Par locomotive électrique . . . . .	5 <sup>cent</sup> ,625
3° Par chaîne sans fin ordinaire . . . . .	8 <sup>cent</sup> ,125 à 9 <sup>cent</sup> ,375
4° Par les divers systèmes de traction par câbles .	10 <sup>cent</sup> ,625 à 12 <sup>cent</sup> ,750
5° Par chevaux . . . . .	20 <sup>cent</sup> ,625

Voici enfin, pour permettre les comparaisons, deux tableaux plus complets, mais relatifs à des conditions d'exploitation variées, publiés par le professeur W. Schutz dans la *Zeitschrift des Vereins der deutscher Ingenieure* pour 1884, cahiers 8 et 9.

## Traction mécanique par câbles et par chaînes.

	UNITÉS.	CORDE-QUEUE Fosse Sainte-Marie à Aniche.	CABLE TRAINANT Von der Heydt (Grube (Saarbrücken).	CABLE SANS FIN			CHAÎNES SANS FIN		POUR COMPARAISON. Locomotives électr. dans la houillère de Zaukeroda.
				à grande vitesse (1). Shire Oaks Colliery Nottinghamshire.	à petite vitesse (2). Brügel-Pit à Vigan.	à petite vitesse (3). Meatow-Colliery à Vigan.	Burbachstollen (Saarbrücken).	Mine Hasard (Belgique).	
1. Coût de l'installation.	Francs	40.000	57.500	18.750	57.500	18.750	100.000	140.000	20.000
2. Intérêt et amortissement pour 1 tonne kilométrique. . . . .	Centimes	8,80	1,65	1,8	2,38	2,53	5,05	1,44	2,87
3. Frais d'exploitation pour 1 tonne kilom.	Centimes	3,40	6,50	11,6	23,59	12,95	4,74	1,42	7,06
4. Frais totaux pour 1 tonne kilométrique.	Centimes	12,20	8,15	13,4	25,97	15,48	9,79	2,86	9,93
5. Tonnage par poste. . . . .	Tonnes kilométr.	182	1.161	326	805	239	703	3.200	235
6. Longueur exploitée. . . . .	Mètres.	550	3 770	843	1.983	585	1.760	3.200	620
7. Vitesse de marche. . . . .	Mètre seconde.	5	3 30	3,30	0,60	0,50	1,87	1,5	2,6
8. Durée du poste. . . . .	Heures.	10	10	12	12	12	10	8	16

(1) La voie des wagons pleins est en rampe de 1/48.

(2) — — — — — 1/62.

(3) — — — — — 1/21.

## Traction par locomotives souterraines.

	UNITÉS.	VAPEUR			AIR COMPRIMÉ		ÉLECTRICITÉ. — à Zaukeroda.
		Avec feu		Sans feu. Système Honigmann.	Système Petan.	Système Mekarski.	
		à Doman.	à Cessous.				
1. Coût de l'installation . . .	Francs	40.000(1)	40.000(1)	13.750	16.250	25.000	20.000
2. Intérêt et amortissement pour 1 tonne kilométrique . . . . .	Centimes	2,7	0,94	3,24	5,10	5,22	2,87
3. Frais d'exploitation pour 1 tonne kilométrique. . . . .	Centimes	3,8	3,30	5,31	7,66	8,63	7,06
4. Frais totaux pour 1 t kil.	Centimes	6,5	4,24	8,55	12,76	13,85	9,93
5. Tonnage journalier. . . . .	Tonnes kilométr.	488	1.421	141	106	159	235
6. Longueur exploitée. . . . .	Mètres	2.320	4.627	620	620	620	620
7. Vitesse de marche. . . . .	Mètre seconde	2,30	3,30	1,50	1,50	1,50	2,60
8. Poids de la machine. . . . .	Kilogr.	4.400	8.000	2.400	2.700	2.300	1.600
9. Hauteur — . . . . .	Mètre.	1,92	2,10	?	?	1,55	1,50
10. Largeur — . . . . .	Mètre.	1,30	1,60	?	?	1,10	0,80

(1) Deux locomotives sont en service; il faudrait encore ajouter aux frais d'exploitation ceux de ventilation, qui ne pouvaient d'ailleurs pas être évités.

Ces deux tableaux, sans permettre de formuler une conclusion absolue, confirment au moins ce que nous disions de l'importance du tonnage et de la longueur de voie, en ce sens que tous les chiffres faibles de la quatrième ligne (prix totaux), se rapportent à des tonnages considérables et à de grandes longueurs de voie; tous les autres sont ou supérieurs ou comparables à celui donné pour Zaukeroda. Les chiffres relatifs aux locomotives à vapeur avec feu sont remarquablement peu élevés; mais ces locomotives ne peuvent pas être employées à l'intérieur des mines; quant à celui donné pour la locomotive à vapeur sans feu (système Honigmann), nous croyons prudent de ne l'accepter quant à présent que sous réserves, les évaluations n'ayant pas, croyons-nous, été faites dans les conditions de la pratique, c'est-à-dire pour un service prolongé et à l'intérieur même de la mine.

Nous devons d'ailleurs faire remarquer qu'il ne s'agit pour les installations électriques que nous avons étudiées, que de tonnes de houille transportées; en France, où l'exploitation se fait généralement avec introduction de remblais, il conviendrait de compter dans le tonnage utile les remblais transportés; de cette manière, le prix de revient de la tonne kilométrique utile se trouverait notablement réduit, de 35 à 40 p. 100 probablement de la valeur que nous avons calculée.

## X. — AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS.

En résumé, on voit, d'après ce qui précède, que les transports dans les mines par locomotives électriques peuvent permettre d'arriver à des prix de revient de la tonne kilométrique, en général, très comparables à ceux obtenus par les meilleurs systèmes ordinaires, et pouvant même être inférieurs. Si l'on observe que dans bien

des cas la complication de l'installation empêche d'établir les tractions mécaniques ordinaires, on voit que souvent les installations électriques présentent de grands avantages.

Il serait intéressant d'avoir, pour pouvoir s'en rendre compte exactement, des chiffres portant sur une période un peu étendue et comprenant les frais d'entretien. Malheureusement nous n'avons pu obtenir à ce sujet aucune donnée précise.

Ces installations se recommandent :

Par la grande simplicité et l'extrême facilité de leur établissement ; à Zaukeroda le montage a été fait, sans monteur spécial, par un ouvrier attaché à la mine, qui était allé à Berlin se mettre au courant pour être conducteur de la locomotive ;

Par la grande souplesse que présente leur emploi, qui leur permet de se plier à toutes les difficultés ;

Par le peu de dérangement qu'elles causent : elles sont d'une installation très facile dans les puits et dans les galeries ; elles ne nécessitent pas de double voie ; elles n'embarrassent pas les galeries avec des chaînes ou des câbles qui traînent et qui peuvent causer des accidents ; elles se prêtent très facilement aux bifurcations et admettent les courbes de rayon supérieur à 20 mètres (les installations étudiées ci-dessus sont en ligne droite, mais il est certain que le fonctionnement serait le même si elles avaient des courbes) ; elles admettent, d'ailleurs, les pentes qui sont compatibles d'une manière générale avec le remorquage par locomotive.

L'humidité ne nuit pas sensiblement à leur fonctionnement ; les rails conducteurs dans les galeries sont d'ailleurs facilement protégés où il est nécessaire par de petits toits en bois.

Au point de vue des dépenses d'exploitation elles présentent une réelle économie sur la traction par che-

vaux (tonne kilométrique à 12 ou 15 centimes) et sont très comparables aux autres tractions mécaniques.

Le capital de premier établissement est moindre qu'avec tout autre système.

L'entretien est probablement moindre également. Avec les précautions indiquées plus haut, il ne peut presque pas arriver que les machines électriques soient brûlées. D'autre part la construction de la locomotive ne comporte rien de bien fragile, et on a pu nous dire, à Beuthen, qu'elle avait déjà subi plusieurs déraillements et des chocs violents sans en éprouver aucune avarie. Les seules réparations que l'on puisse avoir à faire sont des remplacements de balais frotteurs, de collecteurs et de contacts mobiles. Elles peuvent, dans tous les cas, être faites sur place ; elles n'entraînent pas d'arrêt prolongé des machines, si on a soin d'avoir des pièces de rechange, et ne sont pas des sources de dépenses bien considérables. On a en somme constaté, à Hohenzollern-Grube, que la partie électrique du système fonctionne avec beaucoup plus de sécurité que la partie purement mécanique. Au début on a eu de fréquentes ruptures dans le mécanisme de transmission de la locomotive. Cet inconvénient, attribuable surtout à la nouveauté de l'installation et au peu d'expérience acquise, ne s'est plus représenté après qu'on eût construit les roues dentées en acier phosphoreux avec des supports élastiques. Pour éviter les chocs violents qui peuvent parfois se produire quand on tourne trop rapidement le levier de mise en marche, on a intercalé entre la locomotive et le train un attelage à ressort.

A côté de ces avantages, qui sont si nombreux, il faut citer comme inconvénients :

1° La question du danger de mettre des conducteurs parcourus par un courant électrique dans la main des hommes. Bien que la question de l'action physiologique des courants électriques soit encore peu élucidée, il

semble toutefois qu'on puisse dire que le danger est généralement assez faible avec les machines à courants continus; il est aussi très réduit avec des courants de tension aussi peu considérable. La question est agitée pour les forces électromotrices de 3.000 volts et plus employées dans les expériences de M. Deprez à la gare du Nord. Nous ne croyons pas qu'on considère comme réellement dangereuses des tensions de 300 volts. Enfin, si comme le dit M. le docteur d'Arsonval, dans sa note du 26 janvier 1885 à l'Académie des sciences, le danger réside surtout dans la plus ou moins grande self-induction de la bobine, rien n'empêchera de se servir, si l'expérience en sanctionne l'efficacité, du moyen qu'il indique, en proposant d'installer une dérivation pour l'extra-courant, infranchissable pour le courant direct, et jouant le rôle « d'une soupape de sûreté qui se soulève seulement et automatiquement pour une pression déterminée. »

Pour les mines grisouteuses les tractions électriques par locomotives ont un autre inconvénient grave qui est que, principalement au contact des rails conducteurs et des contacts mobiles, se produisent, dans le mouvement très rapide d'entraînement que subissent ces derniers, des gerbes d'étincelles puissantes qui sont absolument inadmissibles dans le cas où il peut y avoir du grisou en présence. Toutefois dans une galerie d'entrée d'air, et si on peut considérer la ventilation comme assez active, peut-être pourrait-on les admettre.

## XI. — RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS.

En résumé, les conditions dans lesquelles les chemins de fer électriques de mines peuvent trouver une application avantageuse paraissent être principalement :

1° Un tonnage assez important pour réduire à 2 cen-

times ou 2<sup>cm</sup>,5 environ la charge par tonne kilométrique utile provenant des intérêt et amortissement du premier établissement. Pour une installation simple, comme celle de Hohenzollern-Grube, ayant coûté de 25.000 à 30.000 francs, un tonnage de 500 à 800 tonnes kilométriques serait nécessaire;

2° Une longueur de voie aussi grande que possible pour réduire à son minimum l'influence du temps perdu en manœuvres aux extrémités.

Comme précautions à prendre, outre celles d'ordre purement électrique qui incombent au constructeur, les suivantes paraissent pouvoir être recommandées utilement :

1° Éviter les changements de pente dans la voie, parce qu'une rampe même de faible longueur exigera que tout le matériel soit construit pour la franchir comme si toute la voie avait la même pente;

2° Faire actionner la machine primaire par un moteur ayant un excès de puissance et une allure lente, plutôt que par une machine de marche rapide à connexion directe, qui est anti-économique;

3° Munir cette machine d'un régulateur sensible actionné par le courant lui-même, qui ferme la soupape d'admission de vapeur quand la locomotive est au repos, pour éviter un surcroît de dépense inutile si le conducteur de la locomotive néglige d'avertir le mécanicien.

La conclusion de cette étude ne doit pas être que l'emploi de l'électricité pour effectuer les transports dans les mines soit appelé à remplacer partout les autres modes de transports employés jusqu'à ce jour; ce serait fort exagéré. On peut dire seulement qu'il est probable que son emploi pourra donner, dans cette application comme dans beaucoup d'autres sans doute, des résultats réellement pratiques. Il est à désirer, toutefois, que des expériences plus suivies, industriellement faites et avec des

garanties d'exactitude sérieuses, viennent montrer ce qu'on peut en réalité en attendre. Il y a là, dans tous les cas, une ressource précieuse qui pourra être parfois d'un grand secours, et le mineur peut compter dorénavant sur « un auxiliaire souple et bienfaisant » de plus. C'est à ce point de vue qu'il nous a paru intéressant de décrire et d'étudier les installations allemandes.

## ANNEXE

La *fig. 9* de la Pl. 1 donne la coupe en long par l'axe de la locomotive. Le moteur est une machine dynamo-électrique fonctionnant comme machine secondaire ou réceptrice, et entièrement semblable à la génératrice. Son armature est dirigée suivant l'axe de la locomotive; on voit son axe en *f*, les fils qu'elle porte en *n* et le collecteur en *h*. Le courant est amené des rails R aux balais appliqués sur ce collecteur par l'intermédiaire des fils  $o_1, o_2$ ; la rotation se produit en sens inverse de celle qui engendrerait le courant dans la machine considérée comme génératrice. Le mouvement se transmet aux roues *aa* du bâti par un système de roues dentées montées sur les essieux, commandées par un pignon porté par l'arbre  $\alpha$  qui est lui-même actionné, par l'intermédiaire des roues d'angle *b* et *c*, de l'arbre *d*, et des roues *e* et *r*, par la roue *s* que porte le prolongement de l'arbre *f*. A ce système un peu compliqué, employé au début à Zaukeroda, on en a substitué un autre plus simple qui supprime la roue intermédiaire *r* en relevant l'arbre *d* dans une position

oblique et le faisant commander directement par l'arbre *f* au moyen d'un système de roues d'angle.

Le fonctionnement de la locomotive exige que l'on puisse réaliser : 1° la mise en marche; 2° l'arrêt; 3° le changement de marche.

*Mise en marche.* — La mise en marche est obtenue au moyen d'un simple commutateur qui est ici le cylindre en cuivre *i* mis en mouvement par le levier extérieur *k*. Ce cylindre communique d'une manière permanente avec l'un des balais de la machine, l'autre balai étant lui-même en communication permanente avec l'un des conducteurs  $o_1$ , et le second conducteur  $o_2$  aboutissant à un ressort isolé; il suffit de tourner le cylindre de manière que le ressort vienne appuyer sur sa surface pour que le circuit soit fermé, et de tourner en sens inverse pour amener le ressort sur une solution de continuité du cylindre et ouvrir le circuit. Toutefois comme il serait dangereux, en raison des chocs qui se produisent dans les engrenages et des extra-courants de rupture qui pourraient brûler les machines, de fermer et d'ouvrir instantanément le circuit, on a été obligé de réaliser ces deux opérations d'une manière progressive. Dans ce but, le conducteur  $o_2$ , au lieu d'arriver directement au ressort de commutation, traverse une série de résistances disposées sur la locomotive elle-même et que nous représentons schématiquement sur la *fig. 10* de la Pl. 1.

Aux points  $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \epsilon, \zeta$  sont insérés des conducteurs allant à des ressorts  $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \dots, \rho_6$  isolés et disposés les uns au-dessous des autres sur un support parallèle aux génératrices du cylindre *i*. On voit facilement qu'on peut disposer des résistances  $r_1, r_2, r_3, r_4, r_5$  qui séparent deux à deux les points d'insertion des conducteurs  $\rho_1, \dots, \rho_6$  pour que le courant obtenu dans le circuit fermé sur le ressort  $\rho_6$  soit aussi faible qu'il sera nécessaire et que la gradation

soit aussi lente qu'on voudra dans le passage du courant fermé sur  $\rho_6$  au courant normal fermé sur  $\rho_1$ . Ces fermetures successives du circuit sur les ressorts superposés  $\rho_6, \rho_1, \dots, \rho_1$ , ont conduit à donner au cylindre  $i$ , au lieu d'une simple solution de continuité suivant une génératrice, une disposition en échelons, comme on le voit dans la *fig. 11* où les échelons sont marqués d'indices correspondants à ceux des ressorts.

*Arrêt de la machine.* — L'arrêt de la machine s'obtient par sa mise hors circuit, pour laquelle on observe, au moyen du dispositif même que nous venons de décrire, la même progression que pour la mise en marche.

Il vaut mieux toutefois, en raison des inconvénients qui pourraient résulter soit de l'extra-courant de rupture, soit principalement de l'emportement de la machine génératrice pour qui toute résistance serait supprimée, ne pas mettre la machine complètement hors circuit, mais fermer le circuit sur le ressort  $\rho_6$ , en calculant la somme des résistances de manière que le courant ne conserve plus qu'une intensité insuffisante pour mettre la locomotive en mouvement.

On a placé, en outre, sur les roues de la locomotive, un système de freins que l'on voit en  $l$  sur la figure et qui sont manœuvrés par la manivelle extérieure  $m$ . Ces freins ont pour objet d'obtenir rapidement l'arrêt de la machine dans des cas spéciaux, de danger imminent ou d'inadvertance du conducteur. Ils ont toutefois le grave inconvénient de produire, par leur serrage brusque, la rupture des dents des engrenages de transmission; cet inconvénient ne nous paraît pas devoir être moindre avec le système employé depuis lors à Beuthen de freins directement appliqués sur l'arbre de la machine.

Le serrage serait sans doute moins brusque et le choc moindre si on se servait de la machine elle-même comme

frein en la fermant sur elle-même ou sur une faible résistance tout en l'isolant de la génératrice.

Les résistances  $r_1, r_2, r_3, \dots, r_5$ , qu'il est nécessaire de pouvoir intercaler dans le circuit pour sa fermeture ou son ouverture étaient constituées, à Zaukeroda, par des baguettes de charbon couchées parallèlement dans deux caisses placées à la partie supérieure de la locomotive (ces caisses ne sont pas représentées sur la figure) et remplies d'eau pour prévenir l'échauffement des charbons. Cette eau était renouvelée suivant les besoins. A Beuthen et Neu-Stassfurt, on avait remplacé ce dispositif peu commode par des bandes, larges de 2 centimètres environ, de toile de laiton très fine tendues sur des cadres en bois et baignant dans l'air. Le tout était placé également sur le haut de la machine et protégé par une enveloppe grillée permettant la circulation de l'air pour rafraîchir ces résistances.

*Changement de marche.* — Pour une position donnée des balais, le changement de marche exige le changement de sens du courant, c'est-à-dire l'échange des connexions. Dans la locomotive Siemens on conserve les mêmes connexions en changeant la position des balais, ou plutôt en les remplaçant par une seconde paire de balais placée sur un diamètre de commutation symétrique du premier par rapport au plan médian de la machine. Cette opération est exécutée par le commutateur ou inverseur Hopkinson, manœuvré par le cylindre  $i$  au moyen d'une rainure hélicoïdale tracée sur sa surface, dans laquelle s'engage un bouton relié au commutateur. Il suffit alors, pour obtenir la marche en avant ou en arrière par l'inversion des balais, de tourner le cylindre  $i$  dans un sens ou dans l'autre à partir d'une position moyenne correspondant au repos. La conséquence directe de cette disposition est que le cylindre  $i$ , au lieu du profil

simple des échelons de la *fig.* 11, doit avoir le profil double de la *fig.* 12, symétrique par rapport à la génératrice qui correspond à la position moyenne du levier de manœuvre et au repos de la machine.

En résumé, la mise en marche, l'arrêt et le changement de marche de la locomotive s'obtiendront en faisant tourner le levier *k* dans un sens ou dans l'autre.

Comme il est important, d'ailleurs, que le conducteur puisse surveiller la voie sur laquelle il s'engage, la locomotive possède à ses deux extrémités deux sièges pour le conducteur, qui servent chacun pour la marche dans un sens déterminé.

La locomotive est munie, en outre, d'une cloche d'alarme et d'une lanterne montées sur un bras *p, p*, qui peut tourner autour de son axe de manière à présenter toujours la lanterne vers l'avant, et la cloche vers l'arrière sous la main du conducteur.

La construction de la locomotive est, d'ailleurs, entièrement symétrique au point de vue de la direction, et les leviers *m* et *k*, dont nous avons parlé pour les freins et les manœuvres de marche, sont reproduits aux deux extrémités. Le cylindre de distribution *i* n'existe qu'à l'extrémité où se trouve le collecteur de la machine; le levier de commande *k*, qui est à l'autre extrémité, est relié à l'autre au moyen d'une tige de renvoi que l'on voit représentée à la partie supérieure de la figure.

## TABLE DES MATIÈRES.

	Pages
I. Généralités . . . . .	5
II. Principe des installations . . . . .	12
III. La machine primaire . . . . .	13
IV. La ligne . . . . .	14
V. La locomotive : manœuvres. . . . .	15
VI. Installations déjà existantes . . . . .	18
VII. Résultats obtenus . . . . .	21
VIII. Prix de revient. . . . .	27
IX. Comparaison du transport par locomotives électriques avec les autres systèmes de transport mécaniques . . . . .	30
X. Avantages et inconvénients. . . . .	35
XI. Résumé et conclusions . . . . .	38
XII. Annexe : la locomotive : description . . . . .	40

## LÉGENDE DE LA PLANCHE I

*Installation de chemin de fer électrique au puits Oppel de la mine de Zaukeroda, près de Dresde.*

- Fig.* 1 et 1 bis. Plan du travers-bancs.  
*Fig.* 2. Coupe en long du travers-bancs.  
*Fig.* 3. Coupe en travers du travers-bancs.  
*Fig.* 4. Section du câble.  
*Fig.* 5. Coupe d'un support isolateur.

Fig. 6, 7, 8. Vues en plan, élévation et coupe des contacts mobiles.

Fig. 9. Coupe longitudinale par l'axe de la locomotive :

- a roues;
- b roues de transmission;
- c } roues d'angle et arbre;
- d }
- e roues de transmission;
- f arbre de la machine;
- h collecteur;
- i cylindre de commutation, commandé par le levier k;
- l sabot de frein, commandé par le levier m;
- n électro-aimant;
- o fils du circuit;
- p bras mobile, avec lanterne et cloche;
- q sièges pour le conducteur.

Fig. 10. Schéma des résistances que le conducteur intercale dans le circuit.

Fig. 11. Élévation en développement du cylindre de commutation, sans renversement de marche.

Fig. 12. Élévation en développement du cylindre de commutation, avec renversement de marche.

## STATISTIQUE

### de l'Industrie minière de la France.

TABLEAUX COMPARATIFS DE LA PRODUCTION DES COMBUSTIBLES MINÉRAUX  
DES FONTES, FERS ET ACIERS, EN 1885 ET EN 1886 (\*).

#### I. — Combustibles minéraux.

PRODUCTION PAR DÉPARTEMENT.

DÉPARTEMENTS	NATURE DU COMBUSTIBLE.	PRODUITS	
		1885	1886
		tonnes	tonnes
Ain.....	Lignite.....	6	»
Allier.....	Houille.....	754.397	818.000
Alpes (Basses-)...	Lignite.....	30.234	24.751
Alpes (Hautes-)...	Anthracite.....	6.209	5.695
Alpes-Maritimes..	Houille.....	140	60
Ardèche.....	Houille et anthracite..	41.062	41.222
Aude.....	Lignite.....	879	1.100
	Idem.....	210	200
Aveyron.....	Houille.....	756.927	658.158
Bouches-du-Rhône..	Lignite.....	4.862	4.166
	Idem.....	366.783	388.221
Cantal.....	Houille.....	63.506	28.782
	Lignite.....	180	313
Corrèze.....	Houille.....	2.617	550
Côte-d'Or.....	Houille et anthracite..	5.895	6.385
Creuse.....	Houille.....	150.840	197.455
	Idem.....	110	348
Dordogne.....	Lignite.....	680	569
	Idem.....	20	2.8
Drôme.....	Houille.....	1.687.148	1.699.579
	Lignite.....	14.465	15.362
Gard.....	Houille et anthracite..	222.629	240.500
	Lignite.....	350	448
Hérault.....	Anthracite.....	121.682	129.708
	Lignite.....	1.437	1.300
Jura.....	Idem.....	200	»
Loire.....	Houille et anthracite..	2.952.088	2.798.595
Loire (Haute-)...	Houille.....	201.052	214.008
Loire-Inférieure..	Anthracite.....	17.113	15.331
Lot.....	Houille.....	2.934	3.431
Maine-et-Loire..	Anthracite.....	29.510	32.331
Mayenne.....	Idem.....	65.563	58.757
Nièvre.....	Houille.....	184.376	190.501
Nord.....	Houille et anthracite..	3.582.759	3.978.175
Pas-de-Calais.....	Houille.....	6.127.461	6.463.580
Puy-de-Dôme.....	Houille et anthracite..	187.717	211.409
Pyrénées-Orientales..	Lignite.....	2.252	1.972
Rhône.....	Houille.....	36.418	33.557
	Idem.....	197.581	165.043
Saône (Haute-)...	Lignite.....	8.605	8.028
Saône-et-Loire..	Houille et anthracite..	1.270.784	1.223.268
Sarthe.....	Anthracite.....	17.079	14.037
Savoie.....	Idem.....	11.007	10.835
Savoie (Haute-)...	Idem.....	120	»
Sèvres (Deux-)...	Houille.....	19.595	15.750
Tarn.....	Idem.....	333.170	317.030
Var.....	Lignite.....	1.821	2.282
Vaucluse.....	Idem.....	7.573	6.440
Vendée.....	Houille.....	19.028	16.848
Vosges.....	Lignite.....	1.425	309
	Houille et anthracite..	19.068.548	19.588.928
	Lignite.....	441.982	455.669
Récapitulation..			
Totaux.....		19.510.530	20.044.597
Augmentation.....			534.067

(\*) Ces tableaux ont été publiés, par ordre de M. le Ministre des Travaux publics, au *Journal officiel* du 4 mars 1887. Les chiffres concernant l'année 1886 sont extraits des états *semestriels* fournis par les Ingénieurs des mines et, par suite, *provisoire*s; tandis que la statistique de 1885, résultant du dépeillement des états *annuels*, contient des chiffres *défini*tifs.

PRODUCTION PAR BASSIN.

GROUPES GÉOGRAPHIQUES DE BASSINS.	PRODUITS		BASSINS ÉLÉMENTAIRES (1).	DÉPARTEMENTS OU LES BASSINS SONT SITUÉS.	PRODUITS	
	1885	1886			1885	1886
	tonnes	tonnes			tonnes	tonnes
<b>I. — Houille et Anthracite.</b>						
Nord et Pas-de-Calais.	9.710.220	10.441.755	Valenciennes. . . . .	Nord, Pas-de-Calais . . . . .	9.655.193	10.441.755
Loire . . . . .	3.000.663	2.841.460	Le Boulonnais (Hardinghen). . . . .	Pas-de-Calais . . . . .	55.027	»
Gard . . . . .	1.728.210	1.740.801	Saint-Etienne (et Rive-de-Gier) . . . . .	Loire, Rhône. . . . .	2.949.087	2.796.196
Bourgogne et Nivernais.	1.501.197	1.462.579	Sainte-Foy l'Argentière . . . . .	Rhône . . . . .	36.046	33.557
Tarn et Aveyron. . . . .	1.093.031	978.619	Communay. . . . .	Isère . . . . .	12.157	9.308
Bourbonnais. . . . .	830.920	915.196	Le Roannais (Roanne). . . . .	Loire, Rhône. . . . .	3.373	2.399
Auvergne. . . . .	335.610	314.578	Alais . . . . .	Gard, Ardèche. . . . .	1.696.272	1.707.005
Hérault. . . . .	222.629	240.500	Aubenas . . . . .	Ardèche . . . . .	27.664	29.909
Creuse et Corrèze. . . . .	153.597	198.353	Le Vigan. . . . .	Gard . . . . .	4.274	3.887
Vosges méridionales	197.584	165.045	Creusot et Blanzay. . . . .	Saône-et-Loire. . . . .	1.127.871	1.102.717
Ouest . . . . .	167.889	153.054	Decize . . . . .	Nièvre . . . . .	184.376	190.501
Alpes occidentales. . . . .	126.861	136.930	Epinac et Aubigny-la-Ronce. . . . .	Saône-et-Loire, Côte-d'Or . . . . .	114.240	95.749
Maures . . . . .	140	60	Bert. . . . .	Allier . . . . .	40.142	42.425
Pyrénées . . . . .	»	»	La Chapelle-sous-Dun . . . . .	Saône-et-Loire . . . . .	31.811	26.829
Totaux pour les houilles.	19.068.548	19.588.928	Sincey, Forges. . . . .	Côte-d'Or, Saône-et-Loire . . . . .	2.757	4.358
			Aubin. . . . .	Aveyron . . . . .	743.577	643.424
			Carmaux. . . . .	Tarn . . . . .	333.170	317.030
			Rodez. . . . .	Aveyron. . . . .	13.350	14.734
			Saint-Perdoux. . . . .	Lot . . . . .	2.934	3.431
			Commentry (et Doyet) . . . . .	Allier. . . . .	683.897	747.653
			Saint-Eloy. . . . .	Puy-de-Dôme . . . . .	116.665	139.621
			L'Aumance (Buxières-la-Grue). . . . .	Allier. . . . .	30.358	27.922
			La Queue (Fins et Noyant) . . . . .	Haute-Loire Puy-de-Dôme. . . . .	238.478	254.870
			Brassac. . . . .	Cantal, Puy-de-Dôme. . . . .	79.515	49.616
			Champagnac et Bourg-Lastic . . . . .	Haute-Loire . . . . .	17.617	10.092
			Langeac . . . . .	Hérault. . . . .	222.629	240.500
			Graisssessac, Roujan. . . . .	Creuse . . . . .	143.452	189.433
			Ahun. . . . .	Creuse . . . . .	7.688	8.022
			Bourgneuf . . . . .	Corrèze, Dordogne . . . . .	2.757	898
			Cublac (Terrasson), Meymac et Argentan . . . . .	Hautes-Pyrénées . . . . .	197.584	165.045
				Mayenne, Sarthe . . . . .	82.642	72.704
				Loire-Inférieure, Maine-et-Loire. . . . .	46.623	47.662
				Deux-Sèvres, Vendée. . . . .	38.624	32.598
				Mayenne . . . . .	»	»
				Calvados, Manche. . . . .	»	»
				Isère . . . . .	108.904	119.700
				Hautes-Alpes, Savoie. . . . .	17.216	16.530
				Isère . . . . .	621	700
				Haute-Savoie . . . . .	120	»
				Alpes-Maritimes, Var. . . . .	140	60
				Basses-Pyrénées, Aude. . . . .	»	»
				Totaux pour les houilles.	19.068.548	19.588.928
<b>II. — Lignite.</b>						
Provence. . . . .	398.838	413.254	Fuveau (Aix). . . . .	Bouches-du-Rhône, Var . . . . .	366.783	388.669
Comtat . . . . .	22.823	22.320	Manosque . . . . .	Basses-Alpes, Vaucluse . . . . .	30.234	24.751
Vosges méridionales . . . . .	10.030	8.937	La Cadière . . . . .	Var. . . . .	1.821	1.834
Sud-Ouest . . . . .	8.628	8.250	Bagnols, Orange, Banc-Rouge, Vagass. . . . .	Ardèche, Gard, Vaucluse. . . . .	18.353	18.447
Haut-Rhône . . . . .	1.663	1.508	Méthamis. . . . .	Vaucluse. . . . .	2.839	2.401
			Barjac et Cèlas . . . . .	Gard. . . . .	1.631	1.472
			Montolieu . . . . .	Hérault. . . . .	»	»
			Gouhenans, Gémonval. . . . .	Haute-Saône. . . . .	8.605	8.028
			Norroy . . . . .	Vosges . . . . .	1.425	309
			Millau et Trévezel. . . . .	Aveyron, Gard. . . . .	4.956	4.748
			Estavar, Orignac, Saint-Lon, Larquier. . . . .	Pyrénées-Orientales, Hautes-Pyrénées, Landes . . . . .	2.252	1.972
			La Caunette . . . . .	Aude, Hérault. . . . .	560	648
			Simeyrols et la Chapelle-Péchaud. . . . .	Dordogne . . . . .	680	569
			Murat. . . . .	Cantal . . . . .	180	313
			La Tour-du-Pin. . . . .	Isère . . . . .	1.437	1.300
			Hauterives, Montélimar. . . . .	Drôme . . . . .	20	208
			Douvres. . . . .	Ain, Jura. . . . .	206	»
			Entrevernes et Chambéry. . . . .	Haute-Savoie, Savoie. . . . .	»	»
				Totaux pour les lignites.	441.982	453.669
				Totaux généraux. . . . .	19.510.530	20.044.597

(1) Les bassins dont les mines n'ont pas été exploitées dans l'année et les départements correspondants ont leurs noms en italique.

## II. — Industrie sidérurgique.

### PRODUCTION DES FONTES.

DÉPARTEMENTS.	DÉSIGNATION de LA FONTE suivant la nature du combustible.	1885			1886		
		FONTES		PRODUCTION totale.	FONTES		PRODUCTION totale.
		d'affinage.	de moulage ou moulée en 1 <sup>re</sup> fusion.		d'affinage.	de moulage ou moulée en 1 <sup>re</sup> fusion.	
		tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes
Allier . . . . .	Au coke . . . . .	25.147	12.372	37.519	21.314	11.145	32.459
Ardèche . . . . .	Au coke . . . . .	22.376	9.406	31.782	26.292	7.339	33.631
Ardennes . . . . .	Au coke . . . . .	16.106	"	16.363	19.134	"	19.134
	Au bois . . . . .	"	257	"	"	"	"
Ariège . . . . .	Au coke . . . . .	12.886	"	12.886	3.815	"	3.815
Aveyron . . . . .	Au coke . . . . .	20.650	"	20.650	3.659	1.566	5.225
Bouches-du-Rhône . . . . .	Au coke . . . . .	14.131	227	14.358	15.182	"	15.182
	Au bois . . . . .	2.751	"	"	835	"	"
Cher . . . . .	Mixte . . . . .	"	9.740	12.491	"	3.675	4.510
Corse . . . . .	Au bois . . . . .	466	"	466	"	"	"
Dordogne . . . . .	Au bois . . . . .	192	"	192	800	"	800
Gard . . . . .	Au coke . . . . .	70.637	9.776	80.413	72.830	15.257	88.087
Gironde . . . . .	Au bois . . . . .	600	560	1.160	575	530	1.125
Indre . . . . .	Au bois . . . . .	743	"	743	"	"	"
Isère . . . . .	Au coke . . . . .	18.299	34	18.605	5.811	"	6.079
	Au bois . . . . .	199	73	"	229	39	"
Landes . . . . .	Au coke . . . . .	41.400	"	54.053	29.652	6.281	42.210
	Au bois . . . . .	7.531	5,124	"	3.845	2.432	"
Loire . . . . .	Au coke . . . . .	26.483	63	26.546	22.484	115	22.599
Loire-Inférieure . . . . .	Au coke . . . . .	44.902	"	44.902	24.053	5.423	29.476
	Au coke . . . . .	"	11.746	"	133	14.677	"
Lot-et-Garonne . . . . .	Au bois . . . . .	230	"	11.976	95	"	14.905
	Au coke . . . . .	26.075	30.506	"	26.041	10.351	"
Marne (Haute-) . . . . .	Au bois . . . . .	3.099	"	66.009	"	"	41.368
	Mixte . . . . .	"	6.329	"	"	4.976	"
Meurthe-et-Moselle . . . . .	Au coke . . . . .	480.081	226.680	706.761	543.253	192.431	735.684
Meuse . . . . .	Au coke . . . . .	3.216	5.432	8.973	3.079	5.813	9.962
	Au bois . . . . .	"	325	"	"	4.070	"
Nord . . . . .	Au coke . . . . .	174.077	43.518	217.595	191.290	24.870	216.160
Pas-de-Calais . . . . .	Au coke . . . . .	95.351	"	93.231	88.135	3.010	91.165
Pyrénées-Orientales . . . . .	Au bois . . . . .	4.280	"	4.280	"	"	"
Rhône . . . . .	Au coke . . . . .	29.459	"	29.459	17.299	"	17.299
Saône (Haute-) . . . . .	Au bois . . . . .	1.619	1.066	2.685	1.579	236	1.815
Saône-et-Loire . . . . .	Au coke . . . . .	114.310	"	114.310	75.129	31	75.160
Tarn . . . . .	Au coke . . . . .	1.898	340	2.238	"	"	"

### RÉCAPITULATION.

Fonte . . . . .	( Au coke . . . . .	1.235.364	350.100	1.585.464	1.188.605	298.309	1.486.914
	( Au bois . . . . .	21.710	7.405	29.115	7.958	4.327	12.285
	( Mixte . . . . .	"	16.069	16.069	"	8.651	8.651
Totaux . . . . .		1.257.074	373.574	1.630.648	1.196.563	311.287	1.507.850
Diminutions . . . . .					60.511	62.287	122.798

### PRODUCTION DES FERS.

DÉPARTEMENTS.	MODE DE FABRICATION DU FER.	1885				1886			
		RAILS.	FERS mar- chands et spéciaux.	TÔLES.	PRODUCTION totale.	RAILS.	FERS mar- chands et spéciaux.	TÔLES.	PRODUCTION totale.
Aisne . . . . .	Pudlage . . . . .	"	"	455	682	"	"	577	577
	Affinage au charbon de bois . . . . .	"	"	227	"	"	"	"	"
Allier . . . . .	Pudlage . . . . .	665	14.509	6.528	21.702	254	19.640	5.984	25.878
Ardennes . . . . .	Pudlage . . . . .	"	45.363	11.799	63.889	"	43.906	9.586	61.455
	Réchauffage de vieux fers . . . . .	"	3.133	3.594	"	"	4.796	3.167	"
Ariège . . . . .	Pudlage . . . . .	"	8.758	"	8.758	"	4.177	"	4.204
	Affinage au charbon de bois (foyers catalans) . . . . .	"	"	"	"	"	27	"	"
Aube . . . . .	Pudlage . . . . .	"	4.186	"	5.346	"	3.038	"	3.657
	Affinage au charbon de bois . . . . .	"	1.160	"	"	"	619	"	"
Aveyron . . . . .	Pudlage . . . . .	684	16.977	2.276	19.937	253	14.946	1.687	16.886
	Pudlage . . . . .	"	229	"	"	"	198	"	"
Bouches-du-Rhône . . . . .	Réchauffage de vieux fers et riblons . . . . .	"	670	"	899	"	343	"	541
Charente . . . . .	Réchauffage de riblons . . . . .	"	100	"	100	"	100	"	100





## NOTE

SUR DES

EXPÉRIENCES DE CONGÉLATION  
DES TERRAINS

Par M. ALBY, ingénieur des ponts et chaussées.

Les expériences, dont la discussion et les résultats sont ci-après exposés, ont été exécutées dans les ateliers de MM. Rouart frères, au mois d'octobre 1885, à la suite d'une mission envoyée en Allemagne pour étudier le système de fondations par la congélation.

Le procédé Poetsch a été décrit dans une note envoyée à l'Administration, le 28 juillet 1885, par MM. Couvrat, ingénieur des ponts et chaussées, et Ichon, ingénieur des mines, chargés de la mission. Un article de M. Lebreton, ingénieur des mines, sur ce même sujet, a paru dans le numéro des *Annales des mines* de juillet-août 1885.

L'exposition du sujet suppose la connaissance de l'un de ces deux documents.

Les expériences ont porté sur deux points distincts : le premier est la formation de la couche de glace autour des tubes, le second, la résistance des terrains congelés. Bien que les expériences aient été menées simultanément, il est indispensable de séparer les deux études.

## PREMIÈRE PARTIE.

FORMATION DE LA COUCHE DE GLACE  
AUTOUR DES TUBES.

*Description de l'appareil d'expérience.* — L'appareil se compose d'un réservoir cylindrique en tôle de 3 millimètres ayant un diamètre de 1<sup>m</sup>,40 et une hauteur d'environ 3 mètres. Dans l'axe est placé un tube de 3<sup>m</sup>,25 de longueur, de 0<sup>m</sup>,17 de diamètre extérieur, et de 0<sup>m</sup>,008 d'épaisseur, en tôle soudée, analogue à ceux dont M. Poetsch fait usage. Ce tube, fermé à la partie inférieure par une calotte hémisphérique soudée à la forge, est l'élément congélateur. Il repose par sa partie inférieure sur un trépied, et il est fixé à sa partie supérieure par un collier métallique à un fer à T rivé sur les parois du réservoir (Pl. II, *fig. 1*).

Le réservoir, placé verticalement dans une fosse de 0<sup>m</sup>,50 de profondeur, est entouré, dans toute la partie au-dessus du niveau du sol, d'une épaisse couverture de paille qui l'isole de l'atmosphère ambiante.

Sur sa paroi, deux séries de dix ouvertures *a* disposées en hélice permettent d'introduire une sonde en fer pour déterminer le profil de la masse congelée ; la disposition en hélice sert à contrôler ce qui se passe dans les différents méridiens.

Outre ces ouvertures, douze autres, placées suivant une génératrice, servent à appuyer les extrémités de douze tubes de laiton *t* de 12 millimètres de diamètre, fermés en bout. Les douze autres extrémités de ces tubes sont logées dans douze ouvertures percées dans un fer plat parallèle au tube central. Les tubes sont légèrement inclinés et ils peuvent demeurer remplis d'un liquide incon-

gelable. Ils permettent l'introduction de thermomètres dans la masse.

Le tube central porte à sa partie supérieure une cuvette en fer-blanc C dans laquelle le liquide incongelable se déverse librement et d'où il s'écoule par un tuyau dans le congélateur de la machine à glace.

Sur la paroi du tube central sont boulonnés trois petits montants verticaux qui soutiennent une pièce creuse en fer forgé à laquelle est suspendu le tube intérieur d'amenée du liquide. Sur cette pièce vient également s'assembler le tuyau de refoulement de la pompe de circulation. Enfin, au centre de la pièce creuse est engagé un tube de laiton analogue à ceux déjà cités, et dont le but est de permettre la mesure de la température du liquide entrant.

La machine à glace est actionnée pendant le jour par un des arbres de l'atelier, pendant la nuit par un moteur à gaz. La pompe de circulation est mise en mouvement par un moteur à gaz spécial.

*Manière d'opérer.* — La tige de fer qui servait aux sondages était entaillée à son extrémité de manière à ramener quelque peu du sable qu'elle traversait; un curseur glissant à frottement permettait de faire les mesures de longueur sans difficulté.

Pour mesurer les températures on plongeait dans les tubes horizontaux des thermomètres à minima assemblés à une tige de cuivre mince. L'emploi des thermomètres à minima était obligatoire, car en les retirant du fond des tubes on observait un réchauffement de plusieurs degrés dû au passage à travers les couches plus chaudes du liquide.

Les indications fournies par le mode d'opérer adopté ne sont pas rigoureusement exactes, car les températures observées ne sont que le résultat d'échanges complexes

entre le terrain, le tube de laiton, le liquide, la tige thermométrique. Nous avons admis que la température lue était la température au milieu du réservoir thermométrique.

Les lectures faites dans un même tube sont très comparables, mais, en passant d'un tube à un autre, il y a une incertitude. La plus grande réserve est nécessaire dans la comparaison des résultats obtenus dans des tubes différents.

Dans la description de l'appareil, le procédé pour mesurer les températures du liquide à l'entrée du tube intérieur a été indiqué; la température du liquide sortant s'observait directement, le déversement ayant lieu à l'air libre.

*Observations.* — Nous signalons la circonstance suivante qui est très intéressante et qui n'avait pas été prévue.

Au début des expériences, le terrain était recouvert d'une couche d'eau de 3 ou 4 centimètres; par les bouchons en bois, qui fermaient les orifices de sondage, l'eau suintait. La couche d'eau a peu à peu disparu, au fur et à mesure de la formation de la glace, ainsi que les suintements.

Le terrain paraissait s'être asséché, et des crevasses se sont produites dans la partie non congelée de la masse de sable.

Pendant le réchauffement, les suintements ont recommencé, et, au bout de quelques jours, la couche d'eau s'est reformée à la partie supérieure. Ce phénomène semble indiquer que la proportion d'eau absorbée par la masse de sable augmente par le fait de la congélation; d'ailleurs, on conçoit facilement que le changement moléculaire produit par la solidification de l'eau modifie la distance des grains de sable.

En supposant, par exemple, que cette distance augmente plus que dans la proportion de  $1/14$ , il se produit nécessairement un appel d'eau vers la partie qui se congèle. Rien n'assure, néanmoins, qu'en se plaçant dans un milieu indéfini, cet appel soit assez énergique pour assécher notablement la masse.

### I. — Discussion des expériences.

1° *Distribution des températures dans un plan horizontal. Formule théorique.* — Dans l'article paru dans les *Annales des mines*, M. Lebreton indique l'équation de la courbe des températures dans le cas où l'équilibre est réalisé. En prenant comme abscisses les longueurs comptées à partir du centre sur un rayon, cette courbe a une équation de forme logarithmique que nous allons rapidement établir.

Appelons  $K$  le coefficient de conductibilité du terrain supposé invariable avec la température, c'est-à-dire le nombre de calories-kilogrammes qui traversent dans l'unité de temps (seconde) l'unité de surface (mètre carré) sur une épaisseur égale à l'unité (mètre) pour une différence de température égale à l'unité (degré), et  $\theta$  la température de la masse à la distance  $r$  de l'axe. La quantité de chaleur qui traverse l'anneau cylindrique d'épaisseur  $dr$  et d'une hauteur de 1 mètre  $a$ , pour expression, d'après les lois de Fourier :

$$K 2\pi r \frac{d\theta}{dr} dr \frac{1}{dr} (*)$$

(\*) La quantité de chaleur est proportionnelle à la surface (facteur  $2\pi r$ , la hauteur étant l'unité), inversement proportionnelle à l'épaisseur (facteur  $\frac{1}{dr}$ ), proportionnelle à la différence de température (facteur  $\frac{d\theta}{dr}$ ), enfin au coefficient de conductibilité (facteur  $K$ ).

ou plus simplement :

$$(1) \quad 2\pi K r \frac{d\theta}{dr}$$

Cette expression suppose que la chaleur chemine horizontalement et qu'il n'y a aucun échange dans le sens vertical.

Si nous supposons, en outre, qu'il y ait un régime d'équilibre établi entre les températures, la quantité de chaleur qui traverse les anneaux successifs d'épaisseur  $dr$  est constante.

Soit  $c$  la lettre qui la désigne; en l'égalant à l'expression trouvée ci-dessus, on obtient la relation :

$$(2) \quad \frac{c}{2\pi K} = r \frac{d\theta}{dr}$$

qui n'est autre chose que l'équation différentielle de la courbe des températures et qu'il est facile d'intégrer :

$$d\theta = \frac{c}{2\pi K} \frac{dr}{r}$$

$$(3) \quad \theta = \frac{c}{2\pi K} \mathcal{L}r + \gamma$$

Les constantes  $c$  et  $\gamma$  sont déterminées si l'on connaît les températures  $\theta_1$  et  $\theta_2$  en deux points du rayon aux distances  $r_1$  et  $r_2$  du centre.

$$(4) \quad c = 2\pi K \frac{\theta_1 - \theta_2}{\mathcal{L}r_1 - \mathcal{L}r_2}$$

$$(5) \quad \gamma = \frac{\theta_2 \mathcal{L}r_1 - \theta_1 \mathcal{L}r_2}{\mathcal{L}r_1 - \mathcal{L}r_2}$$

et l'équation de la courbe devient :

$$(6) \quad \theta = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\mathcal{L}r_1 - \mathcal{L}r_2} \mathcal{L}r + \frac{\theta_2 \mathcal{L}r_1 - \theta_1 \mathcal{L}r_2}{\mathcal{L}r_1 - \mathcal{L}r_2}$$

Cette équation ne contient plus le coefficient de conductibilité  $K$ .

*Discussion.* — La distribution des températures pendant l'expérience varie d'une manière continue, mais la couche de glace croît lentement, et il est légitime de penser que la distribution est très voisine de celle qui correspond à l'hypothèse de l'équilibre (\*).

Nous avons cherché à nous rendre compte du degré d'exactitude de cette supposition.

Nous avons mesuré les températures chaque jour dans les tubes situés à 0<sup>m</sup>,50, à 1<sup>m</sup>,25 et 2 mètres au-dessous de la surface du terrain, et tracé les courbes des températures obtenues (*fig.* 3 et 4).

Ces courbes ne représentent qu'approximativement la distribution réelle pour diverses raisons.

1° Parce que la température n'est pas la même en tous les points des réservoirs thermométriques qui avaient des longueurs variant de 0<sup>m</sup>,035 à 0<sup>m</sup>,025.

2° Parce que les tubes de laiton dont les extrémités d'un côté étaient à l'air libre sur environ 0<sup>m</sup>,04, ont introduit une perturbation (cette perturbation, variable avec les tubes selon qu'ils étaient plus ou moins remplis d'eau, est surtout sensible près des bords du réservoir).

3° Parce que, à chaque thermomètre correspondait une erreur particulière, tenant probablement à sa forme, erreur que nous avons constatée en plaçant deux thermomètres différents au même point d'un tube et en vérifiant que les températures marquées étaient différentes après la correction du déplacement du zéro. Cette erreur, maxima au fond du tube, s'atténuait très vite.

---

(\*) Tout ce qui suit ne s'applique qu'à la partie solidifiée à la surface de laquelle la température est 0°, car au dehors il est très difficile de faire une hypothèse plausible. D'ailleurs les expériences n'ont pas eu lieu dans des conditions permettant de tirer une conclusion applicable au cas où, au lieu d'avoir une masse limitée de terrain entourée d'une couche isolante, on aurait un milieu indéfini.

De toutes ces causes d'erreur, aucune n'est de nature à faire marquer à l'un quelconque des thermomètres une température inférieure à celle du terrain. Aussi sommes-nous portés à attacher la plus grande confiance au thermomètre qui a marqué les températures les plus basses : c'est avec ce thermomètre que nous avons fait les mesures à 1,25 au-dessous de la surface, à un niveau où la forme du solide congelé était à peu près cylindrique.

*Résultats.* — Pour le tube situé à 1<sup>m</sup>,25 de la surface dans une partie presque cylindrique du solide congelé, il y a accord sensible entre les températures mesurées et celles que donne le calcul; cet accord est remarquable pour le dernier jour, où la couche de glace a eu son épaisseur maximum (\*).

Le calcul donne sur la paroi même du tube congélateur, des températures voisines de celles du liquide en circulation.

Pour les tubes situés à 0,50 et à 2 mètres au-dessous de la surface, nous savons *à priori* que l'hypothèse de la nullité de la transmission de chaleur dans le sens vertical est fautive et que par suite les calculs qui ont été faits ne sont pas applicables.

En effet, pour le tube situé à 2 mètres au-dessous de la surface, il est certain qu'il y a échange de chaleur entre le sol situé au-dessous qui peut être considéré comme une source de chaleur, et la partie inférieure du bloc gelé; la forme même du solide le prouve.

Pour le tube situé à 0,50, il subit certainement de la couche d'air qui est au-dessus du terrain un effet analogue; de plus, il n'est pas douteux que le tube central, en contact avec l'atmosphère, produise une perturbation

---

(\*) Voir les observations qui suivent les tableaux I, p. 80.

vers le centre de la masse, analogue à celle que nous avons signalée pour les petits tubes de laiton.

Nous avons, malgré cette conviction, calculé les courbes de distribution de température et les valeurs de la quantité  $c$ . Les résultats de ces calculs sont des indications sur lesquelles nous n'insisterons pas; nous nous contentons de renvoyer aux tableaux annexes.

*Conséquences.* — La conséquence à tirer de ces résultats est la possibilité de déterminer l'épaisseur de la couche de glace en connaissant les températures en deux points.

On peut aller plus loin et déterminer approximativement le coefficient de conductibilité de la matière;

Soient  $c'$  et  $c''$  les valeurs de la quantité  $c$ , à 24 heures de distance on peut admettre que la valeur moyenne est  $\frac{c' + c''}{2}$  et  $\frac{c' + c''}{2} \times 24 \times 3600$  représente la quantité de chaleur qui a traversé la masse congelée pendant une journée.

Or  $c$  a une expression de la forme :

$$2\pi K \alpha,$$

et nous connaissons les deux valeurs de  $\alpha$ ,  $\alpha'$  et  $\alpha''$  à 24 heures de distance par la relation (4);

$$2\pi K \frac{\alpha' + \alpha''}{2} \times 24 \times 3.600.$$

est donc l'expression de la quantité de chaleur.

D'autre part cette quantité de chaleur comprend :

1° La chaleur nécessaire pour solidifier un anneau de glace dont l'épaisseur est connue par les mesures journalières  $q$ ;

2° La chaleur nécessaire pour modifier la distribution des températures de la masse congelée  $q'$ ;

3° La chaleur nécessaire pour refroidir la partie non congelée  $q''$ ;

4° La chaleur perdue par la surface du réservoir  $q'''$ .

Les expériences permettent de calculer  $q$ ,  $q'$ ,  $q''$ ;  $q'''$  n'a pas été observé en raison de l'épaisseur de la couche de paille; nous le supposons nul et nous aurons, pour déterminer  $K$ , la relation :

$$2\pi K \frac{\alpha' + \alpha''}{2} = \frac{q + q' + q''}{24 \times 3.600}.$$

D'ailleurs il existe une incertitude sur la valeur de  $q$ , car la proportion d'eau et de sable après la congélation n'est pas la même qu'avant et elle n'a pas été déterminée.

La valeur du coefficient  $K$  résultant des expériences est 0,00024 avec les unités adoptées.

Jusqu'à présent nous n'avons parlé que des températures à l'intérieur de la masse congelée. Dans la partie non solidifiée, l'intérêt n'est que secondaire et nous renvoyons simplement à la figure 4, planche II.

*Distribution des températures dans un plan vertical méridien.* — Deux séries de mesures ont été faites au fond des tubes et, par les orifices latéraux, près de la paroi du réservoir, dans la masse même du terrain.

Les mesures prises près de la paroi du réservoir ont été faites avec le même thermomètre. Elles ont constamment donné des températures décroissant depuis le haut jusqu'à une certaine distance de la surface supérieure et croissant ensuite de telle sorte que la température minimum était à environ 0,75 de cette surface.

Ces résultats indiquent qu'il y avait un réchauffement par la partie inférieure et par la partie supérieure, le premier étant d'ailleurs bien plus énergique que l'autre.

Les mesures prises au fond des tubes ont été également faites avec un thermomètre unique : les chiffres qu'elles

fournissent ont toutefois besoin d'être interprétés, car les tubes n'étaient pas tous à égale distance de la paroi du tube congélateur.

Néanmoins en comparant les indications obtenues dans les tubes situés à 1,75 et à 0,50 au-dessous de la surface, tubes placés à la même distance de la paroi du tube central, on trouve que le tube placé à 0,50 a donné des températures constamment plus élevées et que la différence a oscillé dans les environs de deux degrés dans les derniers jours.

En analysant de près les chiffres trouvés et en tenant compte des différences de distance des fonds des tubes à la paroi du tube central, on trouve que la surélévation de température s'étend à peu près jusqu'à 1 mètre au-dessous de la surface. Au delà, on peut considérer que la température est sensiblement constante sur la paroi du tube central.

On peut attribuer cet effet à deux causes différentes : la première est l'influence du tube métallique et du support en fer plat qui est soumis sur une certaine hauteur au réchauffement de l'atmosphère ambiante; la seconde est l'influence de la régularité de la marche des filets liquides. La régularité de cette marche qui est certainement plus grande dans le haut du tube que dans le bas est un obstacle aux échanges thermiques entre la masse de sable et le liquide qui circule.

Ces deux causes produisent chacune une part de l'effet sans qu'il soit possible de la définir. Malgré cela on doit conclure de la comparaison des résultats obtenus près de la paroi du réservoir et près du tube central que la température est presque constante tout le long de celui-ci et qu'au contraire elle varie beaucoup sur celle-là.

### 3° *Distribution des températures à l'intérieur du tube.*

— La différence de température entre le liquide entrant

et le liquide se déversant à l'air libre est restée à peu près égale à  $0^{\circ},70$  pendant toute la durée des opérations.

Nous avons remarqué, d'ailleurs, qu'en plongeant le réservoir thermométrique profondément dans l'espace annulaire entre les deux tubes, on obtenait sur la paroi du tube d'amenée et sur la paroi du gros tube des températures différant de  $0^{\circ},3$  et plus basses sur la paroi du tube intérieur.

Ces résultats permettent de considérer le congélateur comme étant à une température sensiblement constante dans toute sa hauteur.

Ils démontrent, en outre, qu'il y a échange de chaleur entre le liquide descendant et le liquide montant.

## II. — *Forme du solide congelé.*

Les dessins (*fig. 2*, Pl. II) représentent les profils du solide congelé relevés quotidiennement pendant la période de congélation et pendant le dégel. — Le tableau II, p. 80, donne les épaisseurs déduites des sondages.

Il suffit de jeter les yeux sur les dessins pour reconnaître l'influence de la masse inférieure du terrain. Le solide est appointé vers le bas d'une manière très sensible.

Si l'appointement avait pu être attribué à de simples inégalités dans la conductibilité de la matière, ces inégalités auraient dû ralentir le réchauffement comme le refroidissement. Les dessins relatifs au dégel ne permettent pas ce doute. Le dégel a été très rapide dans la partie inférieure; il était sensible dans le bas vingt-quatre heures après l'arrêt de la machine à glace, alors qu'à la partie supérieure, au contraire, l'épaisseur de la couche de glace s'était accrue.

La forme ellipsoïdale du solide est, d'ailleurs, conforme

à la théorie, car, d'après les renseignements fournis ultérieurement par M. Potier, ingénieur en chef des mines, les surfaces isothermes autour d'une source de chaleur rectiligne dans le cas de l'équilibre mobile sont des ellipsoïdes de révolution.

Le dégel de la masse a présenté une circonstance du plus haut intérêt. C'est le retour très rapide de la température de toute la masse à 0°. Vingt-quatre heures après l'arrêt de la machine à glace, la température au centre de la masse atteignant à peine 0°,3; un jour plus tard, cette température était 0 degré. Pendant la première journée, cette élévation de la température avait été accompagnée d'un accroissement de la couche de glace, qui a atteint 0<sup>m</sup>,02 en certains points.

### III. — Rendement de la machine.

Les expériences ne permettent pas de déterminer dans combien de temps on obtiendrait en pratique une couche de glace d'épaisseur donnée.

Il est certain, en effet, que le réservoir étant isolé sur la plus grande partie de sa hauteur, le refroidissement de la masse est beaucoup plus rapide que si le tube était plongé dans un milieu indéfini. Dans la pratique, les tubes ne sont jamais isolés; ils sont placés à des distances variant de 1 mètre à 1<sup>m</sup>,50 et forment un polygone fermé; ils se trouvent donc sur plus de la moitié de leur circonférence dans des conditions analogues à celles de l'expérience. Les zones d'action se limitent les unes les autres.

Du côté tourné vers l'extérieur, les conditions sont tout à fait différentes. Le terrain environnant est une source de chaleur dont l'effet est très puissant, comme le prouvent les phénomènes observés dans la partie inférieure des tubes. Mais cet effet est difficile à évaluer.

Telles qu'elles ont été exécutées (\*), les expériences permettent simplement une évaluation grossière du temps nécessaire pour que les couches de glace de deux tubes juxtaposés se rencontrent.

Bien qu'il soit impossible de rien préciser sur le rendement, les deux considérations suivantes ont un grand intérêt pratique :

1° Le rendement de la machine diminue à mesure que la couche de glace augmente.

En effet, les calories négatives produites par la machine à glace sont absorbées soit par le terrain, soit par les déperditions sur les parois de la tuyauterie et du congélateur de la machine. À mesure que la couche de glace augmente en épaisseur, la quantité de chaleur qui la traverse diminue, et la température du liquide en circulation tend à s'abaisser. Mais cet abaissement de température provoque un accroissement des déperditions. Dans la pratique des appareils à glace, il est très difficile d'obtenir des bains à des températures inférieures à —25 degrés. On devra donc considérer cette température comme la plus basse que la méthode permette d'employer.

2° Il y a intérêt pour la bonne utilisation du froid dans le tube à avoir des températures basses.

Nous avons déjà établi, en effet, que la quantité de chaleur qui passait du tube central à la surface du solide congelé, avait au numérateur le facteur  $\theta_2 - \theta_1$ , qui n'est autre chose que le nombre de degrés négatifs de la température du liquide en circulation.

En appelant  $n$  ce nombre de degrés, la quantité de chaleur qui traverse, dans l'unité de temps, une couche

---

(\*) Pour faire une expérience concluante, il aurait été intéressant de supprimer la couche de paille qui entourait le réservoir sur la moitié de la circonférence. Dans ces conditions, on aurait obtenu des épaisseurs de glace variables dans une section horizontale comme dans la pratique.

d'une épaisseur donnée, peut se mettre sous la forme :

$$nA,$$

A étant une constante qui dépend des rayons limitant la couche congelée et du coefficient de conductibilité.

Nous avons vu, d'autre part, que cette quantité de chaleur se décomposait en plusieurs autres appelées  $q$ ,  $q'$ ,  $q''$ ,  $q'''$ , parmi lesquelles  $q$ ,  $q'$ ,  $q''$  représentent l'effet utile produit et ne dépendent pas du temps, tandis que la dernière  $q'''$ , qui est une déperdition, est proportionnelle au temps :  $q''' = at$ . Si  $t$  désigne un laps de temps pendant lequel A ne varie pas sensiblement, la quantité de chaleur qui passe pendant ce temps est  $nAt$ ; mais la portion utilisée n'est que  $nAt - at$ . Il est, dès lors, évident que cette portion est d'autant plus grande que  $nA - a$  est plus grand aussi. Le rapport  $\frac{nA - a}{nA}$  mesure l'économie du système employé.

Le rendement dépend de deux éléments. Il est certain que si on annule les déperditions en dehors du terrain en supprimant la circulation du liquide incongelable, il ne dépend plus que d'un seul élément, le nombre  $n$  de degrés de la source de froid.

## DEUXIÈME PARTIE

### EXPÉRIENCES SUR LA RÉSISTANCE DES TERRAINS CONGELÉS.

Le second sujet sur lequel ont porté les expériences est la résistance de matières congelées.

Ces expériences ont consisté dans l'écrasement à la presse hydraulique d'un certain nombre de cubes et dans l'essai de briquettes à la traction.

Ces expériences ont un caractère industriel : elles n'ont pas la précision d'expériences de laboratoire.

D'ailleurs, la précision est très difficile à obtenir en pareille matière. Il n'est pas aisé de connaître la température d'un cube gelé que l'on retire d'une enceinte refroidie au moment où on l'écrase sous la presse ; ce bloc n'est certainement pas à la même température dans toute sa masse, les parois se réchauffant plus vite que l'intérieur ; d'ailleurs, pour observer la rupture, il est nécessaire de laisser ces parois au contact de l'air.

Dans ces expériences, nous avons admis que des cubes sortant d'une enceinte à  $n$  degrés et portés immédiatement sous la presse, restaient à  $n$  degrés : comme la résistance va croissant à mesure que la température diminue, le chiffre donné par l'expérience est certainement inférieur au chiffre réel.

Nous avons admis aussi que les cubes ayant séjourné plusieurs heures dans des vases disposés au sein d'un bain à  $n$  degrés étaient eux-mêmes à  $n$  degrés.

Enfin, nous avons considéré que des cubes gelés, exposés à l'air libre, n'étaient revenus à 0 degré qu'au bout d'une heure d'exposition.

Nous nous sommes, d'ailleurs, appliqué à multiplier les essais plutôt qu'à leur donner une grande précision.

Les essais ont porté sur le sable naturel gelé à diverses températures et avec des degrés divers d'humidité ; sur des mélanges à proportions définies d'eau, de sable et de glaise à modeler ; enfin, sur des cubes de glace pure.

*Essais sur le sable mélangé d'eau.* — De même qu'il est difficile de connaître exactement une température, il est assez malaisé d'obtenir des bains à des températures déterminées. Pendant que le tube d'expérience fonctionnait, la température du bain dans le congélateur restait comprise entre  $-14$  et  $-17$  degrés et les expériences de

résistance pouvaient facilement être faites aux environs de ces températures. Lorsque le tube a cessé de fonctionner, la température du bain est descendue jusqu'à  $-26$  degrés et elle s'y est maintenue suffisamment longtemps pour que les cubes gelés aient pu prendre une température peu différente.

Nous avons pu obtenir des indications suffisamment probantes dans les environs de  $-10^{\circ}$ ,  $-12^{\circ}$  et  $-14^{\circ}$  de  $-25^{\circ}$  et près de  $0^{\circ}$ . Avec ces indications, il est possible de tracer une courbe donnant, avec une erreur de moins de 5 kilogrammes par centimètre carré, la résistance à l'écrasement du sable gelé.

Pour les températures intermédiaires, nous nous sommes contentés d'écraser des cubes ayant subi des réchauffements plus ou moins longs et de constater que la résistance allait en décroissant selon que le réchauffement avait été plus ou moins long.

Nous signalerons, avant de donner les chiffres, les difficultés que nous avons éprouvées pour mouler et démouler les cubes; la glace pure se démoule très aisément, grâce à la fusion d'une légère couche qui facilite le glissement de la masse; les cubes de sable, au contraire, par une fusion superficielle, créent un intermédiaire rugueux entre la masse gelée et la paroi du moule; cet intermédiaire s'oppose au démoulage et dégrade le cube. Après quelques tâtonnements, nous avons obtenu de bons résultats avec des moules dont les parois avaient un fruit de  $1/20$  et étaient recouvertes d'une couche d'huile incongelable; dans ces conditions, le premier effet du réchauffement était de rendre fluide la couche épaisse par l'effet du froid, et, en frappant légèrement sur les parois, la masse gelée se détachait sans grande peine.

L'observation de la rupture s'est faite au moyen du manomètre; à mesure que la pompe était manœuvrée,

on voyait augmenter la pression graduellement jusqu'à une certaine limite, puis diminuer tout d'un coup; à ce moment, on découvrait généralement une fissure; en tout cas, en continuant d'actionner la pompe, les fissures ne tardaient pas à devenir apparentes.

Nous donnons la nomenclature des essais tels qu'ils ont été consignés dans les notes d'expérience (Tableau V, p. 83).

Les résultats de ces essais, représentés graphiquement, donnent sur un plan où les abscisses sont les températures et les ordonnées les résistances par centimètre carré, une série de points au milieu desquels nous avons tracé une courbe moyenne. Cette courbe est celle de la résistance du sable saturé d'eau (Pl. II, *fig. 5*).

La saturation avait lieu pour un mélange d'environ 165 grammes d'eau pour 1 kilogramme de sable. Avec 200 grammes d'eau, il y avait plus que saturation, et, sans qu'on agitât, la masse, l'eau se séparait du sable à la partie supérieure; c'est dans ces conditions que nous avons obtenu le maximum de résistance, et il est évident qu'il est inutile de mélanger des quantités d'eau supérieures, car on aurait obtenu un bloc non homogène formé à la partie supérieure d'une couche de glace et à la partie inférieure de sable gelé.

Lorsque la proportion d'eau diminue dans le sable, sa résistance diminue aussi. Les résultats seraient d'ailleurs moins intéressants dans ce cas, parce que les sables simplement humides n'exigent pas l'application de la congélation; leur traversée est un problème moins difficile.

Les essais à la traction dont les résultats sont consignés au tableau VI, n'ont été faits qu'à une seule température voisine de  $-12^{\circ}$ . Les briquettes extraites d'un bain où la température était de  $-15^{\circ}$ , ont été placées dans un seau avec de la sciure de bois gelée.

Ce seau, entouré de drap, a été transporté des ateliers de MM. Rouart jusqu'au Trocadéro, où elles ont été essayées; à l'arrivée, la température de la sciure à l'intérieur du seau était de  $-11^{\circ}$ . On peut, sans grande erreur, évaluer à  $-12^{\circ}$  la température à laquelle les briquettes ont été brisées.

Enfin, nous avons fait sur des cubes taillés au sein du massif congelé, des expériences d'écrasement afin de vérifier s'il n'y avait pas de phénomène particulier de cristallisation dans les cubes gelés au moyen de moules; la vérification a été satisfaisante, et on peut considérer que les expériences ont une portée générale, la présence du sable empêchant toute cristallisation de se former.

*Essais sur des mélanges de sable, d'argile, d'eau.* — Des essais ont été faits sur des mélanges définis de sable, d'argile et d'eau.

Nous renvoyons au tableau VII pour les chiffres trouvés. Ils semblent indiquer que le sable peu humide résiste mieux quand il est mélangé d'argile.

La particularité la plus curieuse que nous ayons observée est la structure schisteuse de l'argile plastique congelée; cette structure s'est retrouvée pour le mélange à poids égaux d'argile et d'eau.

La rupture s'est produite dans les blocs d'argile pure par un glissement sur un plan à  $45^{\circ}$ .

*Essais sur des blocs de glace pure.* — La glace pure a donné, dans les essais auxquels nous l'avons soumise, des résultats tout à fait inattendus; tous les cubes se sont brisés sous une pression de 20 kilogrammes par centimètre carré à la presse hydraulique, en donnant une cassure généralement vitreuse.

Nous avons répété les expériences plusieurs fois, et les résultats ont été toujours pareils. Mais certains cu-

bes, pour lesquels des précautions plus grandes avaient été prises, ont présenté des particularités intéressantes dans les derniers essais. Afin de varier les conditions dans lesquelles s'opérait la congélation, des moules avaient été placés dans le chlorure de calcium et d'autres dans un vase vide plongé dans le bain de chlorure.

Les premiers cubes se congelant rapidement ont donné de la glace opaque en cube pyramidé. Cette glace, nous l'avons observée sur un cube brisé dans le démoulage, présentait, selon les plans diagonaux, la marque évidente d'un changement de structure accusé par une transmission différente de la lumière dans les différents secteurs séparés par ces plans. Les seconds, au contraire, transparents sur la plus grande partie de la masse, n'avaient qu'un noyau central opaque, et la face supérieure, au lieu d'être en forme de pyramide, était simplement mamelonnée.

Dans ces divers cubes, les pyramides et mamelons ont été abattus et le parallélisme des faces soigneusement établi par un rodage.

Dans ces conditions, en manœuvrant doucement la pompe, l'un des blocs opaques s'est brisé à peu près comme ceux qui l'avaient précédé, en donnant des éclats à l'aspect vitreux, mais, au centre, on voyait nettement une pyramide avec la pointe en bas (\*).

En opérant de la même manière, le bloc suivant, au lieu de donner une cassure vitreuse, s'est décomposé en cinq fragments géométriques parfaitement réguliers; une fente s'était produite aux quatre arêtes. En faisant cesser immédiatement la pression et en retirant le cube de la presse, les cinq fragments se sont détachés: la pyramide

---

(\*) La structure particulière de ces cubes se retrouve dans les blocs de glace qui se forment dans les moules employés industriellement. Ces blocs de glace sont divisés par des plans très nets disposés comme sur la figure et se brisent selon ces plans.

centrale déjà signalée, et quatre troncs de prismes au milieu desquelles elle se trouvait logée.

Les blocs transparents se sont brisés d'une manière absolument différente; la ceinture transparente entourant le noyau opaque s'est fendillée comme un verre de lampe sur lequel on injecte de l'eau en pluie fine, et s'est renflée sous la pression.

Ces résultats, bien que leurs particularités soient dépourvues d'un intérêt pratique au moins immédiat, signalent nettement la fragilité de la glace. Une briquette de glace a donné une résistance de 10 kilogrammes par centimètre carré à la rupture par traction.

*Résultats.* — Les résultats pratiques de ces expériences sont les suivants :

*Accroissement rapide de la résistance des terrains lorsque la température s'abaisse.* — Le phénomène est représenté approximativement pour le sable saturé d'eau par une courbe parabolique dont l'équation est :

$$y = 0,153x^2 + 11x + 20,$$

dans laquelle  $y$  désigne le nombre de kilogrammes par centimètre carré et  $x$  le nombre de degrés au-dessous de 0.

Lorsque la proportion d'eau diminue et devient les  $2/3$  de celle qui est nécessaire pour la saturation, la résistance est aussi sensiblement réduite au  $2/3$  de sa valeur pour le sable saturé, et quand la proportion d'eau n'est plus que de  $1/3$ , la résistance paraît réduite aussi à  $1/3$ .

A la traction, la proportion d'eau joue un rôle plus considérable encore.

Le sable saturé d'eau à une température d'environ  $-12^\circ$  peut résister jusqu'à 40 kilogrammes par centimètre carré et on peut compter 30 kilogrammes avec sécurité si l'eau n'est pas en excès.

Avec la proportion en eau des  $2/3$  du poids nécessaire pour la saturation, la résistance est de 25 kilogrammes.

Mais la proportion de  $1/3$  ne donne qu'une résistance à peu près nulle.

En ce qui concerne l'influence de la proportion d'argile, d'eau et de sable, nous voyons que, pour les mélanges où la proportion d'eau et d'argile est, en poids, plus grande que celle du sable, les résultats sont peu différents; les grains de sable se trouvent noyés dans la masse boueuse dont ils ne modifient pas les conditions de résistance. La résistance de ces masses boueuses serait environ égale aux  $2/3$  de la résistance à la compression du sable gelé. Au delà, la résistance augmente à mesure que la proportion de sable devient plus considérable.

Ce changement de résistance est indiqué par une modification de la forme de la cassure; dans le premier cas, cette cassure se produit par des fentes verticales, comme dans le cas de l'eau pure; dans le second, les fentes sont à éléments verticaux et inclinés comme dans les cubes de sable pur.

A la traction, ces phénomènes sont bien indiqués; le mélange moitié eau, moitié argile, a une résistance voisine de celle de l'eau pure (12 kilogrammes environ, la glace pure avait donné 10 kilogrammes). Cette résistance augmente par l'introduction du sable beaucoup plus vite qu'à la compression.

La terre glaise pure a donné une résistance, à la compression et à la traction, égale à la moitié de celle du sable saturé d'eau.

*Résumé.* — En résumé, les expériences ont mis en lumière les points suivants :

1° Les phénomènes thermiques qui se passent à l'intérieur du tube sont de peu d'importance, la viscosité du liquide y joue un grand rôle;

2° La forme du solide congelé et la distribution des températures au sein de ce solide se rapprochent de ce qu'ils seraient dans le cas de l'équilibre mobile des températures ;

3° L'espace de temps dans lequel la température de la masse congelée revient à zéro, lorsque la machine à glace s'arrête, est très court, et le dégel se fait sentir au-dessous du tube peu de temps après l'arrêt ;

4° Il n'est pas possible d'obtenir un bon rendement avec l'intermédiaire d'un liquide incongelable lorsque la couche atteint une épaisseur notable ;

5° L'accroissement de la résistance des matières congelées à la compression lorsque la température s'abaisse est très rapide, cette résistance étant très faible dans les environs du point de fusion de la glace.

6° La variation de la résistance, selon la proportion d'eau contenue par le sable, est considérable : le maximum correspondant à la saturation complète.

I. — TABLEAUX COMPARATIFS DONNANT LES TEMPÉRATURES, SUIVANT LE RAYON A DIVERSES HAUTEURS.

N° 1. — Tube situé à 0<sup>m</sup>,50 au-dessous de la surface.

DATES.	R =	0,085	0,125	0,175	0,225	0,275	0,325	0,375	0,425	0,475	0,525	0,575	0,70
7 octobre.	% mesuré. . .	»	-6,6	-3,9	-1,4	+0,4	1,7	+2,8	+2,2	»	»	»	6,9
	% calculé. . .	-10,0	-6,6	-3,6	-4,4								
8 octobre.	% mesuré. . .	»	-8,2	-5,45	-3,3	-1,6	-0,4	+0,5	+1,3	+2,0	+2,5	+3,1	+4,2
	% calculé. . .	-11,4	-8,2	-5,4	-3,3	-1,6							
9 octobre.	% mesuré. . .	»	-9,0	-6,7	-4,5	-2,9	-1,4	-0,5	+0,2	1,0	+1,2	+1,6	+2,6
	% calculé. . .	-12,0	-9,0	-6,2	-4,2	-2,6	-1,4						

N° 2. — Tube situé à 2 mètres au-dessous de la surface du terrain.

DATES.	R =	0,085	0,12	0,17	0,22	0,27	0,32	0,37	0,42	0,47	0,52	0,57	0,70
7 octobre.	% mesuré. . .	»	-9,2	-4,4	-1,2	0,9	2,8	+4,2	»	»	»	»	+8,8
	% calculé. . .	-13,75	-9,2	-4,6	-1,2								
8 octobre.	% mesuré. . .	»	-9,6	-5,6	-3,0	-1,1	0	0,9	1,6	+2,0	+2,6	»	+4,4
	% calculé. . .	-13,22	-9,6	-6,0	-3,25	-1,1							
9 octobre.	% mesuré. . .	»	-10,4	-6,6	-3,9	-1,8	-0,4	0,9	+2,0				
	% calculé. . .	-13,9	-10,4	-6,1	-4,2	-2,1	-0,4						

N° 3. — Tube situé à 1<sup>m</sup>,25 au-dessous de la surface.

DATES.	Distance à l'axe. } R =	0,085	0,115	0,165	0,215	0,265	0,315	0,365	0,415	0,465	0,515	0,565	0,615	0,70
7 octobre.	% mesuré. . .	»	-10,2	-5,6	-2,3	»	1,9	»	4,2	»	5,9	»	»	7,4
	% calculé. . .	»	»	-5,4										
8 octobre.	% mesuré. . .	»	-10,9	-6,8	-4,1	-1,8	-0,3	+0,8	+1,7	+2,4	+2,8	+3,4	»	5,2
	% calculé. . .	14,1	-10,9	-7,1	-4,3	-2,1	-0,3							
9 octobre.	% mesuré. . .	»	-11,6	-8,0	-6,2	-3,4	-1,6	-0,3	+0,4	+1,0	+1,5	+1,9	»	3,2
	% calculé. . .	14,6	11,6	8,1	5,5	-3,5	-1,7	-0,3						
11 octobre.	% mesuré. . .	»	-12,2	-8,9	-6,6	-4,6	-3,3	-1,9	-0,8	+0,2	»	+0,6		
	% calculé. . .	14,9	-12,2	-9,0	-6,6	-4,8	-3,3	-2,0	-0,8					

Le 7 octobre  $\alpha = 29,07$  Le rayon où  $\theta = 0$  est 0,254

8 —  $\alpha = 24,22$  — — — 0,324

9 —  $\alpha = 22,53$  — — — 0,376

11 —  $\alpha = 20,45$  — — — 0,454

La quantité  $c$  est de la forme  $2\pi K \alpha$ ;  $\alpha$  étant une fonction des températures et des rayons, nous donnons les valeurs du facteur  $\alpha$ .

*Observations.*

Il a été dressé deux courbes (Pl. II, fig. 3) pour représenter la distribution des températures sur le rayon à 1<sup>m</sup>,25 au-dessous de la surface, le 9 et le 11 octobre. Ces courbes représentent la distribution obtenue par le calcul. Les points situés en dehors ont été fournis par l'expérience. Deux autres courbes (Pl. II, fig. 4) représentent les observations faites les 25 et 26 septembre à la même profondeur. La température du liquide en circulation était environ 13°,5 le 25 et 14°,2 le 26. Les résultats relatés ont été observés après six heures de marche de la machine. Nous n'avons pas pensé qu'il y eût intérêt à faire connaître les résultats obtenus à 0<sup>m</sup>,50 et 2 mètres de profondeur. Les courbes obtenues d'heure en heure les 25 et 26 septembre ressemblent à celles qui ont été tracées; nous nous sommes contentés d'en indiquer deux.

Dans le tableau n° 3, le 9 octobre, on remarque un écart considérable entre la température calculée et observée à 0<sup>m</sup>,215 de l'axe. Cet écart doit sans doute tenir à une erreur de lecture; sa grandeur rend cette hypothèse probable.

II. — TABLEAU DONNANT LES RÉSULTATS DES SONDAGES EFFECTUÉS DU 6 AU 22 OCTOBRE 1885.

DATES.	DISTANCE à la surface de la masse.										
		0,25	0,50	0,75	1,0	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	
7 octobre, à 8 <sup>h</sup> 45 soir.	R à droite..	0,225	0,257	0,260	0,249	0,252	0,243	0,248	0,250		
	R à gauche.	0,223	0,250	0,262	0,251	0,248	0,275	0,257	0,246		
8 octobre, à 9 heures soir.	R à droite..	0,271	0,307	0,309	0,299	0,313	0,297	0,282	0,288		
	R à gauche.	0,285	0,300	0,314	0,302	0,301	0,328	0,298	0,266		
9 octobre, à 9 heures soir.	R à droite..	0,309	0,354	0,358	0,352	0,353	0,338	0,320	0,313	0,247	
	R à gauche.	0,328	0,347	0,364	0,363	0,355	0,384	0,351	0,290	0,191	
10 octobre, à 9 <sup>h</sup> 30.	R à droite..	0,351	0,401	0,412	0,396	0,391	0,390	0,351	0,330	0,240	
	R à gauche.	0,372	0,395	0,420	0,413	0,401	0,430	0,386	0,321	0,236	
11 octobre, à 9 <sup>h</sup> 30.	R à droite..	0,388	0,440	0,453	0,444	0,428	0,428	0,384	0,353	0,253	
	R à gauche.	0,400	0,439	0,465	0,465	0,423	0,477	0,426	0,358	0,251	
12 octobre, à 5 <sup>h</sup> 30 soir.	R à droite..	0,415	0,465	0,482	0,493	0,463	0,455	0,400	0,378	0,273	
	R à gauche.	0,431	0,475	0,496	0,499	0,470	0,492	0,435	0,371	0,266	
13 octobre, à 4 heures soir.	R à droite..	0,433	0,467	0,505	0,497	0,475	0,463	0,409	0,362	0,185	
	R à gauche.	0,440	0,483	0,515	0,513	0,475	0,494	0,460	0,366	0,191	
14 octobre, à 4 heures soir.	R à droite..	0,417	0,467	0,499	0,503	0,473	0,462	0,391	0,330		
	R à gauche.	0,425	0,486	0,511	0,512	0,480	0,493	0,417	0,342		
17 octobre, à 4 heures soir.	R à droite..	0,360	0,440	0,467	0,456	0,423	0,391	0,318	0,145		
	R à gauche.	0,373	0,442	0,473	0,484	0,435	0,425	0,374	0,275		
22 octobre, à 4 heures soir.	R à droite..	»	0,277	0,332	0,312	0,288	0,198				
	R à gauche.	»	0,255	0,340	0,356	0,215	0,172	0,168			

Le 16 octobre à la surface R = 0,385

17 — — — R = 0,225

*Observations.*

I. — Les épaisseurs mesurées directement ne donnent pas les mêmes résultats

que le calcul. En calculant, en effet, au moyen des courbes de distribution des températures la position de la zone à 0°, on la trouve plus près de la paroi que la surface résistante sur laquelle la sonde s'arrêtait. Cela tient à ce que, entre les parties du terrain à l'état solide et celle à l'état fluide, il existe une zone dont la consistance est analogue à celle d'un sorbêt; c'est la zone où la glace est en voie de formation.

II. — En jetant les yeux sur le dessin du solide, on voit du côté gauche à la hauteur de 1<sup>m</sup>,25 un creusement dans la masse gelée. Ce creusement est dû à la circonstance suivante: le 10 octobre, après avoir fait le sondage par l'orifice situé à 1<sup>m</sup>,25 de profondeur, on a oublié de replacer le bouchon de bois; l'eau s'est écoulée et il s'est produit un assèchement local, dont l'effet a été de modifier la conductibilité du terrain. Pendant le dégel on voit l'influence de cet assèchement plus nettement encore.

III. — La nature du sol était légèrement variable selon la hauteur, comme il est indiqué dans le tableau suivant:

PROFONDEUR.	NATURE DU TERRAIN RAMENÉ PAR LA SONDE à droite et à gauche.
0,25	Sable peu argileux, grossier.
0,50	— —
0,75	— —
1,00	Sable grossier plus argileux, très aquifère.
1,25	— —
1,50	Sable rougeâtre grossier plus argileux.
1,75	Sable rouge argileux fin.
2,00	— —

III. — TABLEAU COMPARATIF DES TEMPÉRATURES AU FOND DES DIFFÉRENTS TUBES.

*Températures au fond des tubes.*

DATES.	0 <sup>m</sup> ,25	0 <sup>m</sup> ,50	0 <sup>m</sup> ,75	1 <sup>m</sup> ,00	1 <sup>m</sup> ,25	1 <sup>m</sup> ,50	1 <sup>m</sup> ,75	2 <sup>m</sup> ,00	2 <sup>m</sup> ,25	2 <sup>m</sup> ,50	2 <sup>m</sup> ,75
6 octobre, 10 heures soir.	»	»	-5,2	-5,3	-7,2	-5,6	-6,0	-6,0	-1,8	+9,4	+11,9
7 octobre, 12 heures nuit.	»	-5,0	-6,7	-6,7	-8,2	-8,0	-6,9	-7,7	-3,0	+2,6	+8,4
8 octobre, 10 <sup>h</sup> - 12 <sup>h</sup> nuit.	-7,4	-7,4	-7,9	-8,4	-9,7	-9,7	-9,4	-9,6	-4,4	+6,1	+9,4
9 octobre, nuit.	-8,0	-8,2	-8,5	-9,4	-9,4	-9,9	-9,9	-10,4	-5,0	+5,2	+8,3
10 octobre, nuit.	»	-8,4	»	»	-9,9	»	»	-10,0	-5,4	+4,4	+7,6
11 octobre, nuit.	»	-8,8	»	»	»	»	»	»	»	+3,7	+6,7
Distance entre le fond des tubes et la paroi du tube central:											
	0,008	0,010	0,003	0,005	0	0,002	0,010	0	0,065	0,315	0,5
									Distance verticale au fond du tube.		

A part les mesures faites le 6 octobre, toutes les autres ont été faites avec le même thermomètre. Il ne faut d'ailleurs y voir que des indications et non des mesures précises, car on n'a pas laissé le thermomètre séjourner le même temps dans les divers tubes. Ce qui ressort nettement du tableau, c'est que pour les profondeurs de 1 à 2 mètres il n'y a pas de grandes différences; il n'en est pas de même pour les profondeurs de 0<sup>m</sup>,25, 0<sup>m</sup>,50 et 0<sup>m</sup>,75, car pour ces profondeurs les températures vont en décroissant de haut en bas et elles sont sensiblement inférieures aux autres. (Influence du tube central et aussi de la tige portant les tubes thermométriques.)

Pour les profondeurs de 2<sup>m</sup>,25, 2<sup>m</sup>,50, 2<sup>m</sup>,70, les tubes étaient prolongés jusqu'à l'axe du réservoir et on a mesuré les distances verticales des bouts des tubes au fond de la calotte sphérique du tube central.

#### IV. — TABLEAU DES TEMPÉRATURES OBSERVÉES PRÈS DE LA PAROI DU RÉSERVOIR.

Températures près de la paroi du réservoir, R = 0,70.

DATES.	PROFON- DEUR.	0 <sup>m</sup> ,25	0 <sup>m</sup> ,50	0 <sup>m</sup> ,75	1 <sup>m</sup> ,00	1 <sup>m</sup> ,25	1 <sup>m</sup> ,50	1 <sup>m</sup> ,75	2 <sup>m</sup> ,00	2 <sup>m</sup> ,25
		degr.								
26 septembre.	A droite.	10,2	11,0	»	»	12,0	»	»	12,6	»
	A gauche.	»	»	»	»	»	»	»	»	»
6 octobre.	A droite.	»	8,7	9,2	9,6	10,0	10,3	10,8	10,9	»
	A gauche.	»	»	»	»	»	»	»	»	»
7 octobre.	A droite.	»	5,4	5,7	5,9	6,4	6,9	7,5	8,4	»
	A gauche.	»	»	»	»	»	»	»	»	»
8 octobre.	A droite.	4,3	4,2	4,2	4,4	4,4	5,2	6,0	4,9	»
	A gauche.	»	»	»	»	»	»	»	»	»
9 octobre.	A droite.	2,8	2,6	2,6	2,6	3,2	3,5	4,3	4,8	»
	A gauche.	»	2,2	1,0	1,9	2,2	2,5	3,2	4,5	6,3
10 octobre.	A droite.	2,2	2,1	2,2	2,0	3,0	3,0	3,8	4,8	6,2
	A gauche.	2,2	»	1,6	»	»	2,3	»	3,9	5,7
11 octobre.	A droite.	1,5	1,4	1,5	1,3	2,0	2,2	3,0	3,8	5,3
	A gauche.	1,5	1,35	1,0	0,8	1,0	1,2	1,8	3,0	4,7

Le tableau montre très clairement que la différence des températures entre le haut et le bas n'a fait que s'accroître; d'ailleurs le point où la température était minimum s'est déplacé vers le bas.

#### V. — RÉSULTATS DES ESSAIS A LA COMPRESSION DE CUBES CONGELÉS. Mélanges de sable et d'eau.

DATES.	TEMPÉ- TURES.	RÉSISTANCE par 0,01 <sup>2</sup> en kilogr.	OBSERVATIONS.	CROQUIS ET REMARQUES.
1885 8 oct.	-12°	à peu près 120	Quatre blocs ont été écrasés et ont donné des résultats analogues. Deux de ces blocs ont été transportés au pied de la presse enduits de matières grasses au sein d'un bain de chlorure de calcium à -12°. Mais les résultats ne sont qu'approximatifs parce que la pompe était actionnée par la force motrice de l'usine, c'est-à-dire très brutalement. L'aiguille du manomètre avait des oscillations très fortes et les chiffres indiqués correspondent à sa position moyenne.	 Elevations de deux faces perpendiculaires.
9 oct. 9 oct.	-12° -17°	120 148 à 150	Mêmes observations pour les trois cubes qui ont donné ce résultat. Un seul cube de dimensions plus fortes que les précédents.	 Elevations selon deux faces perpendiculaires.
13 oct. 13 oct.	-10° -10°	113 120 (1)	Tous ces essais peuvent être considérés comme préliminaires. Nous ne les rapportons que pour mieux faire ressortir qu'ils s'accordent avec les mesures plus précises faites avec une pompe à main dans tout ce qui suit.	
13 oct.	entre -10° et -2°	75 24 24	Ces blocs ont subi des réchauffements de durée différente à l'air libre : de 5 à 6 minutes pour les premiers et de 1/4 d'heure pour les seconds. Aucun pourtant n'était arrivé à la température de la glace fondante.	
15 oct.	-25°	200	La rupture s'est produite très nettement pour ce bloc ainsi que pour les suivants; il n'y a pas eu trace de frottement sur les bords.	
15 oct.	-25°	175	Ce bloc n'avait pas ses faces parallèles et il s'est brisé avant que le contact fût établi sur toute la surface.	
15 oct.	-25°	170	Bloc cylindrique dont la hauteur était très supérieure au diamètre.	
17 oct.	-14°	131	Ces deux blocs provenaient d'un mélange d'eau et de sable non détrempé, mais où le sable était saturé d'eau.	
17 oct.	-14°	138	La proportion du mélange d'eau et de sable était 200 gr. d'eau pour 1 kilogr. de sable. Dans ces conditions il y a léger excès d'eau. Le premier de ces blocs était cylindrique, circonstance qui explique la diminution de résistance.	
17 oct.	-14°	144 (2)	La proportion du mélange était de 50 gr. d'eau pour 1 kilogr. de sable. Le second bloc était cylindrique.	
17 oct.	-14°	43		
		96		
		63		
17 oct.	entre -10° et -5°	88 70 79 79 75	Ces blocs ont été taillés dans la masse qui entourait le tube Petsch, simplement pour vérifier que les cubes gelés dans des moules n'avaient pas subi de phénomène de cristallisation particulier comme l'eau pure.	
17 oct.	0°	17	Bloc ayant séjourné une heure à l'air libre.	
17 oct.	0°	24	Ce bloc a été moins longtemps exposé à l'air.	
17 oct.	entre 0° et 5°	43	Blocs ayant séjourné un quart d'heure à l'air et ne présentant pas encore de trace de dégel.	
17 oct.		43		
17 oct.		33	Ce bloc est dans les mêmes conditions, mais il est cylindrique.	

La plupart des ruptures se sont produites comme celles dont le croquis est donné.

Ces blocs n'ont pas, à proprement parler, subi de rupture, mais ils s'aplatissent sans présenter de fissures sous une pression qui restait à peu près constante au manomètre.

VI. — RÉSULTATS DES ESSAIS A LA TRACTION DE BRIQUETTES CONGELÉES.

Mélanges de sable et d'eau.

84

DATES	TEMPÉRATURES	NOMBRE de kilogrammes par cent. carré	OBSERVATIONS	CROQUIS ET REMARQUES
1885 16 octobre.	entre -11° et -15°.	34,5 25 23 29 30,5 35 29	Les sept briquettes avaient été formées avec un mélange à proportions non définies, mais où le sable paraissait saturé d'eau. Les écarts n'ont rien de surprenant; d'ailleurs les bulles d'air qui avaient pu séjourner dans la masse suffisaient à expliquer ces variations.	Les briquettes, après avoir été cassées, étaient portées sous la presse hydraulique; les résultats donnés par ces essais sont de peu de précision. Mais ils suffisent pour indiquer le rapport entre les résistances à l'écrasement du sable à divers degrés d'humidité. Nous avons constaté que lorsque la proportion d'eau variait de la saturation à la proportion de 100 grammes d'eau pour 1 kilogramme de sable, la résistance variait dans le rapport de 3 à 2, et lorsque la proportion d'eau tombait à 50 grammes d'eau pour 1 kilogramme de sable à peu près dans le rapport de 3 à 1. Ces indications nous ont dispensé de multiplier les essais de cubes.
		35,5 41,5 32 43	Mélange de 1 kilogramme de sable avec 200 grammes d'eau; l'eau en excès s'écoulait par les fentes du moule.	
		25 28,5 24 22	Mélange de 1 kilogramme de sable avec 100 grammes d'eau.	
		3,5	Le mélange de 1 kilogramme de sable avec 50 grammes d'eau n'offre qu'une faible résistance; la plupart des huit briquettes préparées se sont brisées pendant qu'on les fixait dans l'appareil; la seule qu'on soit parvenu à fixer s'est brisée sous la plus faible charge additionnelle; le maximum de la résistance qu'on puisse attribuer à cette matière dans ces conditions est celle qui est inscrite.	

NOTE SUR DES EXPÉRIENCES

VII. — RÉSULTATS DES ESSAIS A LA COMPRESSION DE CUBES CONGELÉS.

Mélanges de sable, eau et argile.

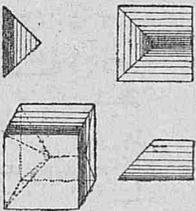
DATES.	TEMPÉRATURES.	RÉSISTANCE pour 1,01 <sup>2</sup> en kilogr.	OBSERVATIONS.	CROQUIS ET REMARQUES.
1885 9 oct.	-15°	80 70 63 65	Quatre cubes d'argile pure. (Glaize à modeler.)	<p>Argile pure. </p> <p>(1) Elévation selon A B   Plan.</p> <p>(2) Elévisions   (2)</p> <p>(3) selon deux faces   (3)</p> <p>(4) perpendiculaires.   (4)</p> <p>Dans les blocs où il y avait plus de 200 gr. d'eau pour 1 kilogr. de sable, la rupture s'est produite par fentes verticales (croquis 2). Les fissures inclinées se sont montrées lorsque la proportion d'eau est arrivée dans les environs de 200 gr. et est descendue au-dessous.</p>
10 oct.	-15° -15° -15° -15° -15° -15° -15° -15°	84 100 93 104 104 104 104 84	Deux cubes dont la proportion était pour 1 k. de sable, 200 gr. d'eau et 200 gr. d'argile. Proportion pour 1 kilogr. de sable: 125 gr. d'eau, 125 gr. de glaize. 1 kilogr. sable, 100 gr. eau, 100 gr. argile. X 1 kilogr. sable, 50 gr. eau, 50 gr. argile. X	
12 oct.	-17° -17° -17°	94 (1) 94 (2) 104	1 kilogr. sable, 2 kilogr. eau, 2 kilogr. argile. 1 kilogr. sable, 2 kilogr. eau, 1 kilogr. argile.	
	-17°	104	1 kilogr. sable, 500 gr. eau, 500 gr. argile.	
	-17°	109	1 kilogr. sable, 333 gr. eau, 333 gr. argile.	
	-17°	113	1 kilogr. sable, 333 gr. eau, 333 gr. argile.	
	-17°	122	1 kilogr. sable, 200 gr. eau, 200 gr. argile.	
	-17°	118	1 kilogr. sable, 200 gr. eau, 200 gr. argile.	
	-17°	122	1 kilogr. sable, 125 gr. eau, 125 gr. argile.	
	-17°	118	1 kilogr. sable, 125 gr. eau, 125 gr. argile.	
	-17°	122 (3) 130	1 kilogr. sable, 100 gr. eau, 100 gr. argile.	
	-17°	80 (4) 70	1 kilogr. sable, 50 gr. eau, 50 gr. argile. X	
17 oct.	-14° -14°	78 74	Moitié argile, moitié eau. 1 kilogr. sable, 500 gr. eau, 500 gr. argile.	

DE CONGÉLATION DES TERRAINS.

85

## VIII. — RÉSULTATS DES ESSAIS A LA TRACTION DE BRIQUETTES CONGELÉES.

*Mélanges de sable, d'eau et d'argile.*

DATES.	TEMPÉRA- TURES.	RÉSISTANCE par 0,01 <sup>2</sup> en kilogr.	OBSERVATIONS.	CROQUIS ET REMARQUES.
1885 16 octobre	Entre — 11° et — 13°	22,5 22 17 23,50	Quatre briquettes de terre glaise à modeler. La texture des briquettes était schisteuse dans la partie brisée.	Décomposition du cube de glace pure. 
		11,5 12,5 13	Mélange de glaise avec poids égal d'eau. — Vase molle. Texture schisteuse à la cassure.	
		19 19,5 18 16	1 kilogr. de sable pour 500 grammes de glaise et 500 grammes d'eau.	
		10	Briquette en glace opaque.	

## NOTE SUR UN ACCIDENT

SURVENU LE 25 AVRIL 1885

## AU PUIS DE FONTANES

DE LA

CONCESSION HOULLÈRE DE ROCHEBELLE ET CENDRAS

PAR SUITE

D'UN DÉGAGEMENT INSTANTANÉ D'ACIDE CARBONIQUE

Par M. DE CASTELNAU, ingénieur des mines.

Le puits de Fontanes, des houillères de Rochebelle et Cendras, a été, le 25 avril 1885, le théâtre d'un dégagement instantané d'acide carbonique d'une violence extraordinaire qui a coûté la vie à cinq ouvriers.

Ce n'est pas la première fois qu'un phénomène de cette nature se produit dans ces travaux; le 28 juillet 1879, un premier dégagement de même espèce avait eu lieu, entraînant la mort des trois ouvriers qui travaillaient au chantier de l'irruption du gaz; il a été rendu compte de cet accident dans une note insérée aux *Annales des mines*, 7<sup>e</sup> série, tome XVIII. Le dégagement du 25 avril a été beaucoup plus considérable que le premier; cette fois, les ouvriers occupés au chantier de l'expansion ont eu la vie sauve, et ce sont des mineurs travaillant à des distances assez grandes de ce point qui ont péri.

Avant d'entrer dans le récit de l'accident du 25 avril

1885, il convient de faire connaître, en peu de mots, l'aménagement de la mine de Fontanes au point de vue de l'exploitation et de l'aérage.

Le puits n° 1 de Fontanes a 400 mètres de profondeur ; il n'a encore été, jusqu'ici, à vrai dire, qu'un travail de recherche et ne sert pas à l'exploitation.

Plusieurs recettes ont été ouvertes dans ce puits aux profondeurs suivantes :

93. . . . .	cote. . . .	+ 62
125. . . . .	cote. . . .	+ 29
246. . . . .	cote. . . .	- 90
300. . . . .	cote. . . .	- 145

En outre, il est en communication, par un travers-bancs, avec une galerie d'écoulement débouchant au niveau de la rivière le Gardon.

La recette de 93 ne fonctionne plus et est barrée par des ouvrages en maçonnerie.

Celle de 125 est en relation avec des travaux peu développés.

Celle de 246 a desservi une galerie et une remontée d'exploitation d'une couche : c'est à l'avancement de cette remontée qu'a eu lieu le dégagement instantané du 28 juillet 1879.

Enfin, la recette de 300 dessert un travers-bancs, dit Sainte-Barbe, marchant vers le sud-ouest, destiné à sortir du quartier bouleversé de Fontanes et à recouper en profondeur les faisceaux de couches de Cendras et de Rochebelle superposés stratigraphiquement à celui de Fontanes et exploités à des niveaux supérieurs : ce travers-bancs avait, au moment de l'accident, une longueur de 226 mètres.

A 32 mètres à l'est du puits n° 1, se trouve le puits n° 2, de 125 mètres de profondeur, servant à l'extraction et dans lequel trois recettes sont ouvertes, l'une au niveau d'écoulement, l'autre à la profondeur de 93 et la troi-

sième à celle de 125 mètres. La recette 93 et celle du niveau d'écoulement desservent une série de chantiers d'exploitation ouverts dans les couches 3 et 4, auxquels les ouvriers accèdent par des galeries débouchant au jour.

A l'époque de l'accident, plusieurs portes interceptaient la communication entre les puits 1 et 2 à la hauteur de la galerie d'écoulement et au niveau de 125.

Nous n'avons pas à parler des travaux situés au niveau de la galerie d'écoulement ou au-dessus, car l'invasion d'acide carbonique ne les a pas atteints ; quant à ceux qui, dans la nuit du 24 au 25 avril 1885, étaient en activité entre ce niveau et celui de 93 (voir le plan, *fig. 1*, Pl. III), nous nous bornerons à dire qu'ils se trouvaient tous dans la couche 3, au nord du plan incliné établi dans cette couche, à l'exception d'un seul situé au sud, savoir : une descente de reconnaissance *dd* marchant vers le niveau 125. Ce niveau, par suite de l'insuccès des explorations qui y avaient été entreprises, était resté longtemps inactif ; au mois de mars 1885, on avait commencé, à 270 mètres du puits n° 1, un travers-bancs *tt* marchant à la rencontre de la descente précitée.

L'aérage de ces divers travaux s'effectuait comme il suit :

Il est établi, sur la place même du puits de Fontanes, un ventilateur à force centrifuge enveloppé de 2<sup>m</sup>,20 de diamètre et du système de ceux de la Grand'Combe : cet appareil est, à part quelques modifications qu'il a subies depuis lors, le même que celui qu'on installa lors de l'accident de 1879 sur les bords du puits. Il aspire, à la vitesse d'environ 170 tours par minute, 8 à 10 mètres cubes d'air à la seconde.

Il servait exclusivement à l'aérage de l'avancement du travers-bancs du niveau 300 : à cet effet, une cloison bouvetée et recouverte d'une toile goudronnée est établie dans le puits n° 1 et le divise en deux compartiments et,

dans le travers-bancs, un galandage en maçonnerie s'approche le plus possible du front de taille. L'air descendant dans le puits n° 1 par le compartiment d'extraction parcourait la galerie, arrivait à l'extrémité du galandage, remontait par le compartiment de retour jusqu'au niveau 125, s'engageait dans un boyau qui l'amenait dans la galerie en direction ouverte vers le nord à ce niveau, passait de cette galerie dans un travers-bancs  $t_1t_1$  divisé en deux par une maçonnerie, montait par une cheminée dans la couche 4 et suivait une remontée tortueuse qui l'amenait au ventilateur.

A la recette 125, dans une niche, séparée du puits par deux portes, a été installée une pompe Tangye, alimentée au moyen d'une conduite prenant la vapeur au jour.

L'échappement de cette vapeur s'effectue dans une remontée, communiquant avec une autre remontée parallèle, qui rejoint une suite de cheminées et de remontées successives finissant par déboucher au jour au point O.

Les deux premières de ces remontées sont connues sous le nom de *remontées jumelles*.

L'échappement de la pompe Tangye produit un appel énergétique et détermine un courant d'air très vif. Le parcours de ce courant était, au moment de l'accident, le suivant : l'air descendait par le puits n° 2 jusqu'à la recette 93, parcourait la galerie de ce niveau vers le nord, la descente  $d_1d_1$  et arrivait ainsi dans le travers-bancs  $t_1t_1$ . Là, il parcourait le second compartiment de ce travers-bancs, parvenait dans la galerie en direction vers le nord du niveau 125, aéraït par diffusion l'avancement du travers-bancs  $tt$  et, montant par des cheminées et des galeries plus ou moins sinueuses, arrivait dans les remontées jumelles et de là revenait au jour. On voit que ce courant était séparé de celui du ventilateur soit par des portes, soit par des barrages en maçonnerie.

Enfin, le troisième courant d'air s'effectuait par voie

naturelle : il entrait par le puits n° 2 jusqu'à la recette 93, parcourait vers le nord la galerie en direction de ce niveau, montait par le plan incliné  $ii$  jusqu'au niveau 90, passait à l'entrée de la descente  $dd$ , parvenait dans les chantiers du nord, montait par ces chantiers dans les niveaux supérieurs et sortait au jour par des galeries plus élevées que celle d'introduction des remblais.

Le travers-bancs du niveau 300, commencé en août 1884, et pratiqué à la perforation mécanique, recoupa à 95 mètres du puits une couche de houille, d'aspect très luisant, de qualité maigre (8 à 9 p. 100 de matières volatiles), assez propre, de laquelle l'acide carbonique se dégagea avec assez d'intensité.

Le 3 novembre 1884, un phénomène bien plus violent que ceux qui s'étaient déjà manifestés se produisit. La couche avait été coupée par un rejet très oblique sur la direction du travers-bancs ; le rocher avait donc, peu à peu, augmenté d'épaisseur au front de taille et le charbon, qui s'était maintenu sur 12<sup>m</sup>,50 de longueur sur le parement de droite, avait fini par disparaître (voir les plans et coupes, *fig. 2, 3, 4 et 5*, Pl. III).

Le jour précité, on avait effectué un forage composé de 25 trous au rocher, sauf le plus bas du côté droit qui avait traversé la faille par son toit et recoupé le charbon. Ce trou laissait dégager de l'acide carbonique, car la lampe approchée de son orifice s'éteignait, mais ce dégagement se faisait sans pression. Le tirage des premières volées ne donna lieu à aucun incident : à 1 heure 1/2 après midi, il restait cinq coups, dits *de patte*, à tirer au pied du chantier. Ces cinq coups furent tirés et immédiatement suivis, dirent les ouvriers, de 10 à 15 coups sourds se succédant très rapidement. En même temps l'acide carbonique envahissait le travers-bancs, arrivait au puits aussi vite que le bruit de ces coups et s'élevait même dans celui-ci sur 50 mètres de hauteur.

On ne put revenir au chantier que 3 jours après et l'on constata, non sans surprise, qu'il était remblayé de menu charbon sur 5 à 6 mètres de longueur. Ce tas de charbon avait, grossièrement, la forme d'un cône dont le sommet était appliqué sur le parement de gauche, ce qui indiquait que la projection venait du côté droit; de plus, sur 13 mètres en arrière du pied du talus, le sol était recouvert, sur plusieurs millimètres d'épaisseur, d'une poussière de charbon extrêmement fine ressemblant à de la suie. Le déblayage de ce chantier fut exécuté du 18 au 21 novembre et permit de découvrir, sur le parement de droite, une ouverture de 0<sup>m</sup>,50 de largeur sur 0<sup>m</sup>,25 de hauteur, portant sur l'un de ses côtés la trace du coup de mine qui avait traversé le toit de la faille et avait pénétré dans la couche. C'est par cette ouverture qu'avaient passées, pour ainsi dire en *se laminant*, les 25 tonnes de charbon pulvérisé qui avaient envahi la galerie. Le trou fut agrandi à la main afin de pouvoir pénétrer dans l'excavation et l'on se trouva en présence d'un vide s'étendant, suivant le plan de la faille, jusqu'à son intersection avec le toit de la couche et ayant 6<sup>m</sup>,10 de longueur, 2 mètres de largeur moyenne et 1 mètre de hauteur. Du côté gauche, on voyait du charbon pilé, serré contre la faille et paraissant en place; du côté droit, le charbon était plus résistant; au sol de l'excavation, la couche présentait plusieurs crevasses par où s'échappait encore de l'acide carbonique. Le calcul montre que le vide produit aurait été comblé et au delà par le charbon projeté; cette observation vient à l'appui de l'hypothèse que j'émettais, lors de l'accident de 1879, au sujet de l'accumulation de l'acide carbonique. Je disais à cette époque et je persiste à penser que ce gaz n'est point enfermé et comprimé dans des vides ou poches, mais que c'est la masse même du charbon qui contient l'acide carbonique à une pression extrêmement élevée.

Tant que la paroi qui sépare l'avancement de ce charbon explosif est suffisamment résistante, l'expansion ne se produit pas, mais si la résistance de cette paroi devient insuffisante, alors le dégagement s'effectue et le gaz fait violemment irruption en lançant au loin et pulvérisant le charbon qui le contenait. Il a été fait à l'ouverture de l'excavation une prise de gaz dans deux flacons et M. Péchiney, directeur de la Société des produits chimiques de Salindres et de la Camargue, a été prié de faire analyser ces gaz dans son laboratoire de l'usine de Salindres.

M. Péchiney a très gracieusement accueilli cette demande et voici les résultats de cette analyse :

	1 <sup>er</sup> flacon,	2 <sup>e</sup> flacon.
CO <sup>2</sup> . . . . .	62,78 . . . . .	56,05
HS . . . . .	0,64 . . . . .	0,82
O } Air . . . . .	{ 7,68 . . . . .	{ 7,68
Az } . . . . .	{ 28,90 . . . . .	{ 34,08
	<hr/>	<hr/>
	100,00	100,00

Il est à peine besoin de faire remarquer que l'air contenu dans ces flacons avait pénétré par diffusion dans le vide produit par l'expulsion du charbon.

Le gaz de Fontanes est donc de l'acide carbonique avec de très faibles quantités d'acide sulfhydrique; ce dernier gaz avait, d'ailleurs, révélé sa présence par son odeur pendant les opérations de déblaiement du chantier.

Ce déblaiement terminé, l'avancement fut repris au rocher; 5 mètres plus loin, on recoupa une couche de 0<sup>m</sup>,70 d'épaisseur. Ce banc charbonneux laissa bien dégager de l'acide carbonique, absolument comme dans les mines grisouteuses le grisou sort des couches que l'on rencontre, mais aucun phénomène de dégagement intense ne se produisit. Malheureusement, à 90 mètres de cette deuxième veine, soit à 218 mètres du puits, le charbon fut recoupé pour la troisième fois et le travers-bancs pé-

nétra dans une puissante couche se présentant obliquement et ayant une pente de 27° environ vers le sud-est (*fig. 3 et 4, Pl. IV*).

Rien de bien particulier ne se produisit tout d'abord, l'acide carbonique se dégageait dans les mêmes conditions normales que dans les premiers mètres de la traversée de la première couche. Mais l'intensité du dégagement alla progressivement en augmentant. Le 23 avril, après le tirage d'une volée de coups de mines, l'acide carbonique envahit la galerie jusqu'à 15 mètres du puits et rendit le chantier inabordable pendant 5 heures. Lorsqu'on put y revenir, on remarqua, sur la droite, une excavation d'environ 1 mètre cube dans la couche, comme si une légère projection avait eu lieu.

Le 24, l'avancement atteignait 8 mètres dans le charbon; le poste de 6 heures à 2 heures du soir effectua trois coups de sonde dans le charbon et 8 coups de mine dans le rocher. Les coups de sonde ne donnèrent aucune indication particulière et le tirage s'effectua sans aucun incident.

Le poste de 2 heures à 10 heures du soir débaya le chantier et le laissa propre et bien affranchi, après avoir placé le chemin de fer et approché la perforatrice prête à fonctionner. Le 3<sup>e</sup> poste commença son travail à 10 heures du soir. Il était composé, comme chacun des trois postes de cet avancement, de quatre ouvriers dont un remplissant les fonctions de chef de poste.

Depuis la troisième rencontre du charbon, la couche avait monté progressivement jusqu'à 1 ou 2 mètres en arrière du front de taille; le charbon n'avait, toutefois, jamais atteint le toit de la galerie, et on constatait à l'avancement un changement d'allure, une inflexion vers l'ouest.

Ce dernier poste pratiqua 6 coups de mines dans les schistes et 5 dans le charbon, dont un de 3 mètres ser-

vant de trou de sonde. D'après les déclarations du chef de poste, l'acide carbonique sortait avec grande abondance de ces trous et il y formait des bouchons qui en rendaient le curage très difficile. On essaya de faire un second trou de sonde, mais la tige s'y engagea et l'on dut y renoncer.

Au dire de l'un des ouvriers, vieux mineur expérimenté, qui a vu l'accident de 1879 et le dégagement du 3 novembre, on sentait très bien que l'on était dans le voisinage immédiat d'une masse explosive; ses camarades et lui, ne songeant qu'à leur propre sécurité, n'avaient qu'une seule préoccupation, qu'un seul désir, terminer le plus tôt possible leur travail et remonter au jour. Aussi les trous une fois pratiqués, se hâtèrent-ils d'en faire la charge. Ils choisirent tout d'abord les 5 trous au charbon et y mirent 40 cartouches de dynamite dont 10 dans le trou de sonde. Cette charge s'effectua péniblement; en effet, phénomène extraordinaire et inconnu jusqu'alors, l'acide carbonique résistait à l'enfoncement des cartouches et les repoussait au point qu'il fallait les coincer au fond pour les y maintenir.

Avant de poser les cartouches-amorces, le chef de poste fit prévenir le machiniste d'avoir à se tenir prêt à monter rapidement le poste au jour. Quand il se fut assuré que son avertissement avait été compris, il plaça les 5 cartouches-amorces portant chacune une mèche de 2<sup>m</sup>,50 de longueur, y mit le feu, courut au puits et se fit enlever avec ses ouvriers. Dans leur ascension, ils comptèrent distinctement leurs 5 coups de mine et immédiatement après, tandis qu'ils étaient à peu près à la profondeur de 166 mètres, ils entendirent, disent-ils, « comme un vent d'orage » qui passait avec une violence extrême dans le compartiment de sortie d'air: ce coup de vent fut aussitôt suivi de plusieurs autres qui se firent sentir dans le compartiment d'extraction avec une telle intensité,

que la benne sur laquelle étaient ces hommes fut soulevée à plusieurs reprises ainsi que l'étrier qui la supportait. En même temps, on entendit le bruit des portes fermant le niveau 125 qui battaient violemment dans les puits.

« Ahi au jour, ahi au jour ! » crièrent aussitôt ces ouvriers qui se crurent perdus, et ils arrivèrent sur le bord du puits au milieu d'une colonne de fumée et de poussières charbonneuses qui montait jusqu'aux molettes du chevalement. Ils avaient à peine mis pied à terre que l'acide carbonique sortait du puits à gueule-bée et, emporté par le vent, retombait du côté des chaudières où il se faisait sentir des ouvriers qui s'y trouvaient à ce moment.

Le chef de poste comprit, à l'effroyable intensité du dégagement qui venait de se produire, les dangers que courait le personnel occupé dans les travaux. Il fit aussitôt descendre la benne au niveau 125 où il savait que le malheureux ouvrier chargé de la pompe Tangye se trouvait et donna ordre aux trois ouvriers qui étaient avec lui de descendre dans la mine par la galerie d'introduction des remblais et d'en faire remonter tous les ouvriers : il était à ce moment 3 heures précises du matin.

Quant à lui, il courut au ventilateur faire doubler la vitesse, prévint le maître-mineur et envoya un express à l'ingénieur, M. Lange. Cet ingénieur, occupé à surveiller une recherche importante dans l'intérieur de sa section, avait dû passer la nuit au lieu même de ce travail : dès qu'il fut informé de la catastrophe, il accourut au puits où il prit la plus large part à toutes les opérations subséquentes.

Cependant, le chef de poste et le maître-mineur étaient revenus ensemble au puits, ils firent descendre des lampes dans le puits n° 1, ensuite dans le puits n° 2 et

constatèrent que des deux côtés elles s'éteignaient au même niveau, soit à 25 mètres de l'orifice ; il n'était encore que 3<sup>h</sup> 20<sup>m</sup> ; on peut juger par là de la rapidité avec laquelle l'invasion s'était propagée.

Toute tentative de sauvetage par les puits était donc impossible.

Les trois ouvriers envoyés par le chef de poste dans la mine y avaient pénétré par la galerie d'introduction des remblais et avaient donné l'alarme sur leur passage. Arrivés vers le milieu du plan incliné de la couche n° 3, l'un d'eux s'arrêta pour surveiller la marche de l'air et ses deux camarades descendirent avec prudence au fond du plan, avec l'intention de s'engager dans la galerie du niveau 90, l'un vers le nord, l'autre vers le sud.

Ils venaient à peine d'arriver à ce niveau, que celui qui était resté en arrière entendit, dans la traverse de gauche, des ouvriers qui venaient vers lui précipitamment ; ils lui firent connaître qu'ils avaient été envahis par le mauvais air, et que leurs lampes s'étant éteintes, ils fuyaient vers le jour. Ceux-ci rappelèrent aussitôt les deux ouvriers qui étaient descendus dans le plan et ils revinrent tous ensemble à l'entrée de la mine.

Les ouvriers dont les trois sauveteurs avaient fait la rencontre, étaient ceux des chantiers situés au nord du plan incliné. A l'avancement du niveau de fond se trouvaient un mineur et son manœuvre. Ce dernier travaillait au bas du chantier : il avait suspendu sa lampe au toit et était en train de faire un coup de mine lorsque le mineur descendit vers lui pour allumer sa lampe qui s'était éteinte. Le manœuvre se plaignit alors de bourdonnements dans les oreilles, de maux de tête et d'estomac, et comme il abaissait sa lampe pour donner du feu à son chef de chantier, celle-ci s'éteignit. Le chef de chantier, ouvrier ancien et expérimenté, comprit aussitôt le danger et se sentant indisposé lui-même, donna par ses cris l'alarme à

tout le quartier. Il était d'ailleurs bien temps, car non seulement leurs lampes, mais encore successivement celles des ouvriers qui travaillaient dans les chantiers voisins s'éteignirent; le mauvais air atteignait donc déjà le deuxième niveau du plan.

Lorsque cette petite troupe arriva au jour, elle se compta et constata l'absence des deux ouvriers qui travaillaient à la descente de reconnaissance au sud du plan incliné. Il en fut rendu compte au maître-mineur qui constata qu'il lui manquait 5 ouvriers, savoir : le pompier de la recette 125, les 2 ouvriers du travers-bancs du même niveau et ceux de la descente du niveau 90. Il pénétra dans la mine accompagné de plusieurs ouvriers, par la galerie d'introduction des remblais, en laissant ouverte la porte qui d'ordinaire ferme cette galerie et, marchant ainsi en suivant le sens du courant d'air, il arriva avec peine au sommet de la descente où il trouva le corps du manœuvre froid et inanimé.

La position de ce corps indiquait bien comment ce malheureux avait été pris. Cet ouvrier venait de monter un panier de charbon qu'il avait déchargé dans la benne, ainsi que l'indiquait la position du chariot et du panier vide. Puis se sentant fatigué et ressentant probablement déjà les effets du gaz qui commençait à charger le courant d'air, cet ouvrier qui était, paraît-il, délicat de corps et d'ailleurs peu avisé, au lieu de prévenir son chef de chantier et de fuir, s'était assis sur le bord de la remontrée, se plongeant ainsi encore davantage dans le gaz et était probablement aussitôt tombé asphyxié.

L'état de l'atmosphère ne permit pas au maître-mineur d'aller plus loin; il remonta au jour. M. de Place, directeur de la compagnie, et ses ingénieurs venaient d'arriver sur les lieux. Ces messieurs, accompagnés du maître-mineur et d'un certain nombre d'ouvriers, firent une descente dans les travaux par la galerie d'introduction

des remblais; ils passèrent devant le corps du manœuvre de la descente du niveau 90, descendirent le second plan incliné, arrivèrent ainsi au niveau 93, et prenant la descente *d, d<sub>1</sub>*, purent atteindre et parcourir le travers-bancs du niveau 125.

Mais au point d'intersection de ce travers-bancs et du niveau, ils furent arrêtés par l'acide carbonique qui remplissait toute la galerie du 125 et remontèrent au jour. Là, ils trouvèrent le personnel du service des mines ayant à sa tête M. Rigaud, ingénieur en chef des mines, qui prit la direction des opérations ayant pour but d'arriver aux corps des cinq victimes et de les remonter au jour. Pour cela, on essaya d'abord de rechef de descendre dans le puits; dans une première descente, on constata que l'acide carbonique atteignait encore la couronne de la recette du 125. On le refoula par de violentes chasses d'eau et bientôt après, il fut possible d'arriver à la recette du 125. Les deux portes fermant cette recette étaient ouvertes et au delà de la seconde, se trouvait, couché en travers de la galerie, le corps du pompier. On constata qu'à cette heure encore, le retour d'air du travers-bancs Sainte-Barbe, au niveau 125, était chargé d'acide carbonique au point d'éteindre les lampes. Il fut décidé de continuer les chasses d'eau de manière à faire baisser le gaz à une dizaine de mètres au moins au-dessous du 125 et de pratiquer ensuite, à 7 ou 8 mètres de cette recette, une brèche dans la cloison de manière à isoler le gaz restant dans les parties inférieures des travaux.

Ces opérations effectuées, on pénétra dans la mine par la galerie d'introduction des remblais, et on put sans difficulté arriver au point de rencontre du travers-bancs d'aérage avec le niveau 125. On trouva bon air dans ce niveau et on parvint à l'avancement du travers-bancs dans lequel travaillaient la nuit précédente deux ouvriers

mineurs. Mais ils ne furent pas trouvés au front de taille. On s'engagea dans le cul-de-sac CC à l'extrémité duquel les cadavres de ces malheureux furent rencontrés. Dans le travers-bancs, tous leurs outils étaient soigneusement rangés à une certaine distance de l'avancement, et cet avancement était encombré de déblais. Ces constatations permettent de penser que ces deux ouvriers venaient de tirer leurs coups de mine et se trouvaient dans le niveau 125, lorsque l'acide carbonique a envahi le courant qui les aéraient. Ils fuirent devant l'invasion et cherchèrent un refuge dans le cul-de-sac, mais l'invasion continua son œuvre et par diffusion le gaz dut les atteindre très rapidement et les asphyxier.

Il restait encore à sortir de la descente *dd*, au niveau 90, le corps du mineur qui travaillait à son extrémité. Pour cela, on se servit d'un ventilateur soufflant et d'une ligne de tuyaux qu'on allongeait progressivement au fur et à mesure des progrès de la ventilation. Cette opération fut difficile; elle dura environ trois heures: au bout de ce temps, on atteignit et retira le cadavre qui se trouvait à 15 mètres environ de l'entrée de cette descente, couché sur le ventre la tête vers la sortie.

L'enlèvement des corps était terminé à huit heures du soir.

Le dégagement instantané d'acide carbonique qui a été la cause originaire de cet accident, a eu une intensité absolument inconnue jusqu'à ce jour. Ce dégagement a été si formidable et s'est effectué à une pression tellement élevée que le gaz a violemment refoulé le courant d'air, a subitement rempli tout le puits et s'est élevé jusqu'aux molettes du chevalement. Il est sorti par le ventilateur avec une telle abondance, qu'il a envahi le logement dans lequel se trouve la locomobile qui met en marche cet appareil et l'écurie voisine.

Le machiniste et le palefrenier ont subi ses atteintes

au point que le chef de poste a trouvé le machiniste presque sans connaissance et que le palefrenier, tout suffoqué, errait en titubant dans l'écurie lorsqu'on lui a ouvert la porte et qu'on l'a fait sortir. C'est également sous pression que le gaz a subitement envahi le retour d'air et a fait violemment irruption dans les travaux supérieurs en passant par toutes les fissures, par les fentes de toutes les portes qui séparaient les travaux du puits n° 1 des travaux supérieurs et par la rigole de la galerie d'écoulement, qui se vida quelques minutes après l'expansion, à la suite de l'arrêt de la pompe Tangye. C'est ainsi que l'acide carbonique a envahi le puits n° 2 où l'on a constaté qu'il se tenait au même niveau que dans le puits n° 1.

Le mélange irrespirable a dépassé la recette 93 et s'est répandu par cette recette dans la mine; aidé par la marche naturelle du courant d'air, il s'est élevé dans les travaux, y a atteint la cote 126, 20 minutes environ après son irruption au niveau 300 et a asphyxié les deux malheureux ouvriers de la descente. Continuant son chemin, il est parvenu aux chantiers du Nord et y aurait probablement fait d'autres victimes si l'un des ouvriers, reconnaissant l'ennemi, n'avait vivement battu en retraite en entraînant tous ses camarades.

C'est également à l'introduction du gaz dans le niveau 93 par l'invasion du puits n° 2 et aussi à l'expansion de l'acide carbonique au delà de la porte P<sub>2</sub>, par les fuites de cette porte, qu'il faut attribuer l'asphyxie des deux ouvriers qui travaillaient dans le travers-bancs du niveau 125.

Quant au malheureux pompier, l'invasion lui est arrivée de tous les côtés.

Ce n'est que trois jours après l'accident que l'on put pénétrer dans le travers-bancs Sainte-Barbe; on le trouva rempli sur la plus grande partie de sa longueur par de

la houille projetée. Le sol était couvert jusqu'à la recette par une poussière impalpable de charbon ressemblant à de la suie et dont l'épaisseur allait graduellement en augmentant. Ce n'est qu'à 90 mètres du puits que la houille commençait à être grenue; à 110 mètres, elle remplissait la galerie au point de ne laisser, au toit, qu'un vide de 0<sup>m</sup>,30 à 0<sup>m</sup>,40 et il en a été ainsi jusqu'à l'avancement, c'est-à-dire sur 117 mètres de longueur. La cloison d'aérage avait été partiellement détruite et au milieu du charbon menu et poussiéreux qui formait la masse des matières qui remplissaient la galerie, on ramassait les briques de cette cloison entraînées loin de la position qu'elles avaient occupée, des mottes de houille et des blocs de rocher qui pesaient jusqu'à 50 kilogrammes.

Grâce à un bon aérage, ce déblaiement s'effectua sans difficulté spéciale; la traversée de la couche qui avait été l'origine du dégagement ne présenta tout d'abord rien de particulier et put être facilement rétablie. Mais à 3<sup>m</sup>,20 de l'extrémité du travers-bancs, on commença à découvrir, sur le parement de droite, dans le charbon, une ouverture donnant accès dans un vide qui s'étendait en amont-pendage dans la couche et en suivait le toit (voir les *fig.* 6, 7, 8, Pl. III). Cette ouverture se continuait jusqu'à l'avancement: elle avait une hauteur variant de 0 à 0<sup>m</sup>,80. L'excavation, d'une largeur moyenne de 2 mètres, avait, dans les 10 premiers mètres, la direction de la pente de la couche, puis elle obliquait un peu sur la droite pour prendre une direction presque perpendiculaire à celle du travers-bancs.

Les parements étaient constitués comme il suit: à droite, la couche en place mais fortement fissurée et ébranlée; à gauche, du charbon menu s'élevant jusqu'au toit. On essaya de pénétrer dans ce vide, ou y monta jusqu'à 16 mètres de distance de la galerie, mais le vide

allant toujours en se rétrécissant et l'acide carbonique ne cessant pas d'en descendre, on ne put monter plus haut et force fut d'abandonner cette exploration. Examinée du point limite où l'on parvint, l'excavation se continuait encore en amont-pendage et il fut impossible d'en apercevoir le bout. A l'extrémité du travers-bancs, le rocher du toit de la couche était en place et l'on retrouva les 14 trous de mine qui y avaient été forés; audessous le charbon était broyé et une sonde de 3 mètres de longueur put y être enfoncée sans toucher le massif.

Tel était donc l'orifice par lequel était sortie la masse de charbon qui avait rempli la galerie; le déblaiement de ce travers-bancs a donné lieu à une extraction de 1.158 bennes représentant au minimum 405 tonnes de charbon. Si l'on voulait avoir la quantité totale de charbon broyé par suite de l'expansion du gaz, il faudrait ajouter à ce chiffre celui de la quantité, impossible à évaluer exactement, de charbon broyé formant le parement gauche et le sol de l'excavation.

Ces constatations faites, les exploitants, craignant qu'un éboulement du toit dans ce vide ne vint à se produire et ne refoulât violemment sur les ouvriers l'acide carbonique qui ne cessait de s'en dégager, abandonnèrent le lieu de l'expansion, et établirent, à 23 mètres en arrière, un barrage en maçonnerie de 2 mètres d'épaisseur emprisonnant la couche à partir du point où elle avait été recoupée par le travers-bancs, dont l'avancement a été ultérieurement repris en obliquant sur la gauche.

Il est impossible de calculer avec quelque exactitude le volume d'acide carbonique qui s'est subitement dégagé de l'avancement du niveau 300 en un torrent si impétueux qu'il a envahi presque toute la mine. En effet, ce n'est point seulement l'orifice du puits 1 qui a servi

à l'écoulement du gaz, mais aussi et surtout celui du ventilateur qui tournait avec une grande vitesse et qui chassait encore de l'acide carbonique presque pur deux heures et demie après l'accident; neuf heures après, l'air qui sortait de la cheminée de cet appareil en renfermait encore une très notable proportion. Toutefois, on peut arriver à déterminer un chiffre minimum de ce volume en cubant les travaux qui ont été envahis en 20 minutes au plus, au point que l'atmosphère était irrespirable : on obtient ainsi le chiffre de 16.600 mètres cubes. Ainsi donc au moins 16.600<sup>m³</sup> de gaz subitement dégagés, 117 mètres de galerie remblayés, projection de houille grenue atteignant 136 mètres, 400 tonnes de charbon broyé et projeté, 5 ouvriers asphyxiés dans les travaux supérieurs, tel est le bilan de ce terrible coup d'acide carbonique.

Les couches de houille des mines de Rochebelle sont connues pour renfermer de l'acide carbonique comme d'autres du grisou. Il existe entre les conditions de gisement dans ces couches et de dégagement de l'acide carbonique et du grisou une similitude si frappante, que l'on est en droit de se demander si cette ressemblance n'existe pas aussi dans l'origine et le mode de formation de ces deux gaz. Or, on sait que, d'après une hypothèse généralement admise, le grisou serait contemporain de la formation de la couche de houille et serait le résultat de la décomposition des débris des végétaux constitutifs de la houille sous l'action de la chaleur de la pression et de l'humidité.

En outre, en présence des phénomènes si puissants et si extraordinaires d'expansion que nous venons de relater, on est amené à rechercher sous quel état l'acide carbonique se trouve dans les couches à dégagement instantané.

On connaît les dégagements instantanés de grisou qui

se produisent dans les mines belges; ces accidents ont donné lieu de la part de M. Arnould, ingénieur principal du corps des mines belge, à une très intéressante étude dans laquelle il émet l'opinion que le grisou se trouve à l'état liquide dans la houille.

La violence des phénomènes qui se manifestent dans les dégagements instantanés de Fontanes, l'énormité du volume du gaz qui fait subitement irruption dans ces mines, l'élévation très considérable de sa pression dénotée par la projection de grandes quantités de houille, permettent de penser qu'il en est de l'acide carbonique comme du grisou et que s'il est admis que ce dernier gaz peut exister dans la masse charbonneuse à l'état de vésicules liquides, il n'y a pas de motifs pour ne point émettre la même hypothèse au sujet de l'état sous lequel l'acide carbonique existe dans les couches de Fontanes.

Il est intéressant de constater qu'à Fontanes comme en Belgique, c'est sur les points où la couche est accidentée par suite du voisinage d'une faille, ou par un changement de pendage que les phénomènes de dégagement instantané se produisent. La coupe de la galerie Sainte-Barbe indique bien la nature très tourmentée du terrain qu'elle traverse et montre que la couche affectait la forme d'une selle à l'avancement. Il est également intéressant de constater qu'ici comme là, les couches à dégagements instantanés renferment du charbon daloïde.

Nous avons recherché si la faille contre laquelle le dégagement du 3 novembre a eu lieu n'avait joué aucun rôle dans l'accident du 28 juillet 1879; pour cela, le plan de cette faille, supposée d'inclinaison régulière, a été prolongé jusqu'à la rencontre des travaux effectués au niveau 246. (Pl. IV, *fig.* 1 et 2.)

La construction géométrique faite dans ce but montre que cette faille passerait précisément à l'extrémité ou

dans le voisinage immédiat du chantier d'où l'expansion de 1879 est venue. Si l'on prolonge la trace horizontale de cette cassure jusqu'à l'avancement du travers-bancs et que l'on cherche à quelle distance de cet avancement, cette cassure, toujours supposée d'inclinaison régulière, rencontre la couche, on trouve que sa trace passerait à 10 mètres de distance horizontale de l'avancement et que la rencontre de cet accident avec la couche aurait lieu à 30 mètres seulement de la galerie, cette distance étant mesurée suivant le toit de la couche. Cette faille aurait donc joué un rôle important dans les trois dégagements instantanés qui se sont produits dans son voisinage immédiat et on peut penser que le vide trouvé dans la couche et dont on n'a pu voir l'extrémité s'étend jusqu'à cette cassure.

La couche dans laquelle le dégagement du 25 avril s'est produit n'est autre que celle qui a donné lieu au dégagement du 3 novembre 1884, ramenée au niveau du travers-bancs par une série de rejets et de plissements.

De plus, il paraît démontré que cette couche est celle que l'on a recoupée dans le puits à 361 mètres de profondeur et qui a eu 10 mètres de puissance en charbon ou schistes intercalés. A sa traversée dans le puits, l'acide carbonique s'en était dégagé avec grande abondance et avait là encore gêné et retardé le travail. Il suffisait de toucher au charbon vif avec le pic pour que ce gaz, sortant avec intensité des parois nouvellement mises à nu, finit bientôt par rendre la présence au chantier impossible; quant aux coups de mines, ils donnaient presque toujours lieu par leur explosion à un envahissement du puits par ce gaz sur une hauteur plus ou moins grande; en outre, pendant le déblayage, les ouvriers entendaient de temps en temps des bruits sous leurs pieds, ressemblant à de sourdes détonations. Les

détonations sourdes paraissent d'ailleurs caractéristiques des couches à acide carbonique sous pression; elles ont été signalées à la traversée du charbon au niveau 300 et aussi, fort rarement il est vrai, pendant les opérations de déblaiement. Le phénomène le plus curieux qui se soit produit à la traversée de cette couche dans le puits, est le suivant: le 7 août 1881, on avait fini de déblayer le fonds du puits du charbon produit par le tirage de plusieurs coups de mine, on essaya de toucher au charbon vif, mais aussitôt l'acide carbonique se dégagea avec telle abondance que le personnel dut remonter au jour.

Malgré le ventilateur aspirant établi au jour aidé par un ventilateur soufflant système Bodard installé dans le puits, l'acide carbonique s'éleva dans le puits jusqu'à 45 mètres de hauteur, et quand, le 11 août, on put revenir au fond, on remarqua que ce fond, qui avait été laissé ayant la forme d'un chaudron irrégulier, s'était soulevé, avait pris une forme convexe au point que le centre dépassait les bords de 0<sup>m</sup>,50; on constata de plus que des fissures nombreuses et larges dans lesquelles on pouvait introduire la main divisaient la masse du charbon et que, par ces fentes, l'acide carbonique s'échappait encore.

Nous avons fait remarquer en commençant qu'il existe dans les conséquences qu'ont eues le dégagement instantané du 28 juillet 1879 et celui du 25 avril 1885 une différence capitale.

En 1879, ce furent les ouvriers travaillant au chantier même de l'expansion qui furent surpris par le dégagement et périrent asphyxiés et ensevelis sous le charbon projeté. Il n'en a pas été ainsi en 1885; les ouvriers du chantier de l'expansion étaient à peu près en sécurité lorsque l'irruption de gaz carbonique a eu lieu; les victimes faites par ce gaz étaient éloignées du point où

il s'est dégagé, et pour que ces ouvriers aient été atteints il a fallu que l'acide carbonique se soit dégagé avec une si effroyable intensité, que les obstacles qui séparaient les divers courants d'air de la mine ont été insuffisants et que la mine entière a été envahie. Le salut des hommes du travers-bancs Sainte-Barbe est dû aux mesures prises dès le mois de novembre 1884, c'est-à-dire dès l'apparition de l'acide carbonique en quantité notable.

Ces mesures sont les suivantes :

Interdiction du travail au pic, tirage des coups de mine à l'électricité, de l'orifice du puits, après sortie préalable de tous les ouvriers.

Cette seconde mesure ne fut pas appliquée le jour de l'accident parce que les ouvriers s'étaient plaints de la proportion des coups ratés ; on avait toléré l'usage de la mèche à la condition que la mèche fut assez longue pour laisser aux ouvriers à peu près le temps d'être hors du puits au moment de l'explosion du coup de mine ; on verra tout à l'heure que cette tolérance, qui n'a pas été sans faire courir quelque danger à ces ouvriers, est aujourd'hui absolument proscrite.

L'interdiction du travail au pic constitue, à notre avis, l'une des précautions les plus importantes et les plus efficaces. Qu'on se représente, en effet, ce que nous appellerons volontiers le quartier explosif d'une couche de houille à dégagement instantané et une galerie marchant vers ce quartier. Tant que l'épaisseur du terrain qui sépare l'ouvrier travaillant à l'avancement du quartier explosif est assez grande pour résister à la poussée qui en provient, aucun phénomène dynamique ne se produit, mais cette épaisseur diminuant, la résistance s'affaiblit et la haute pression de l'acide carbonique finit par briser l'obstacle qui s'oppose à son expansion. Or l'ouvrier qui travaille au pic est présent au chantier pendant l'abatage, c'est-à-dire au moment où l'épaisseur de la paroi résis-

tante est affaiblie par l'avancement même de la galerie et peut devenir insuffisante. Au contraire, le percement d'un coup de mine peut être comparé à l'ouverture d'une soupape dans une chaudière à vapeur ; cet orifice ayant des dimensions restreintes peut être largement ouvert sans le moindre danger, et il en serait tout autrement s'il venait subitement à manquer à la chaudière une fraction notable de sa surface.

Dans l'espèce, il est incontestable que les ouvriers se sont, dans la nuit du 25 avril, trouvés en plein quartier explosif ; ils ont cependant pu y percer leurs coups de mines et les charger ; si au lieu de faire sauter le charbon à la dynamite, ils l'avaient abattu au pic, il ne nous paraît pas douteux qu'ils auraient, comme leurs camarades en 1879, reçu le choc de la masse projetée par l'irruption violente de l'acide carbonique et auraient été ensevelis sous cette masse.

Aussi l'Administration supérieure n'a-t-elle pas cru devoir interdire la reprise du travers-bancs Sainte-Barbe ; mais après avoir entendu les exploitants, elle a homologué un ensemble de mesures destinées à protéger les ouvriers contre les dégagements de gaz, les seules que l'expérience et la pratique aient encore indiquées pour lutter contre des dangers aussi redoutables.

Ces mesures sont les suivantes :

1° Isolement complet au moyen de forts barrages en maçonnerie des travaux inférieurs du puits n° 1 de Fontanes de ceux de la mine de ce nom ;

2° Installation d'un aérage puissant et spécial au travers-bancs Sainte-Barbe ;

3° Interdiction du travail au pic à l'avancement du travers-bancs ;

4° Exécution, à l'avancement, de trous de sonde de 3 mètres au moins de longueur dans lesquels la pression de l'acide carbonique doit être attentivement surveillée ;

5° Tirage des coups de mine à l'électricité après sortie préalable de tous les ouvriers du puits;

6° Établissement d'un système de signaux perfectionnés et permettant de correspondre non seulement du fond au jour, mais encore du jour au fond.

La première de ces mesures n'a besoin d'aucune justification; l'accident du 25 avril 1885 a montré que des portes, même restant fermées, sont impuissantes, en raison des pertes auxquelles elles donnent lieu, à arrêter une invasion considérable d'acide carbonique.

Quant à l'installation d'un aérage énergique, plus l'aérage sera puissant, moins les ouvriers souffriront des dégagements ordinaires de mauvais air; en cas de dégagement anormal, l'enlèvement rapide du gaz par un fort courant d'air pourra éviter des accidents. Les exploitants ont installé, dans ce but, à côté du puits, un ventilateur à force centrifuge enveloppé, système Guibal, de 4 mètres de diamètre, 1 mètre de largeur, portant 12 palettes. La trompe ou cheminée de ce ventilateur est horizontale et tournée dans le sens opposé à celui du puits, afin de dégager le mauvais air en l'éloignant de l'orifice d'extraction. Ce ventilateur a été calculé de manière à pouvoir fournir à la vitesse de 223 tours à la minute, 6 mètres cubes d'air à l'avancement lorsque le travers-bancs aura sa plus grande longueur.

Nous ne reviendrons pas ici sur le but et l'avantage de l'interdiction du travail au pic. L'avancement doit donc être effectué à coups de mine. Mais si l'on peut en sécurité procéder au percement des trous, il est nécessaire d'éviter la présence des ouvriers dans les travaux au moment du sautage des coups, c'est-à-dire lorsque l'épaisseur de la paroi qui résiste à la pression du quartier explosif est brusquement affaiblie. De là, la prescription du tirage à l'électricité, à partir du jour et après la sortie préalable de tous les ouvriers.

Ce tirage s'effectue au puits de Fontanes au moyen d'une forte machine Bornhardt.

On a vu ci-dessus que pendant la traversée de la couche qui a donné lieu à l'accident du 25 avril, l'intensité du dégagement d'acide carbonique à l'avancement est allée en augmentant progressivement et que le gaz sortait finalement avec assez de force des trous de mines pour faire sentir sa pression pendant l'enfoncement des cartouches.

L'exécution de trous de sonde précédant l'avancement et la détermination de la pression du gaz dans ces trous pourront donc fournir d'utiles indications; il est permis d'espérer que l'on pourra de la sorte être averti de l'approche des quartiers dangereux. Les exploitants des mines de Fontanes se servent, dans ce but, d'un tube conique en fer de 0<sup>m</sup>,50 de longueur qu'ils enfoncent jusqu'à refus dans le trou. Ce tube porte une tubulure latérale communiquant avec un manomètre métallique que le chef de poste est chargé d'examiner de temps en temps.

Enfin, il a paru nécessaire, dans un travail aussi délicat, de donner aux ouvriers du fond des moyens de communication avec le jour, plus commodes, plus rapides, plus sûrs et plus complets que le simple appel au moyen d'une cloche ou d'un timbre installé sur les bords du puits et mis en branle par un fil de fer ayant une longueur égale à toute la profondeur du puits. On a imposé au nouveau système à établir la condition de permettre de communiquer non seulement du fond au jour, mais encore du jour au fond. De cette façon, on peut, du jour, suivre, pour ainsi dire pas à pas, le travail de l'avancement, prévenir l'équipe du fond de toute circonstance qui l'intéresserait, telle qu'un dérangement subit dans le ventilateur et dans les engins d'extraction, interroger à volonté le personnel de l'intérieur et, par conséquent, en cas de

défaut de réponse, pouvoir porter secours aux hommes du fond, empêchés pour un motif quelconque de donner signe de vie.

Ces conditions ont été réalisées au moyen d'une transmission de signaux et d'une communication électriques étudiées et installées par la maison Bréguet. L'étude et la description complète de ces appareils et de leur installation sortiraient des cadres de cette note; nous nous bornerons à en dire quelques mots de manière à faire comprendre le fonctionnement de ces signaux et les services qu'on peut en attendre. Au surplus, les appareils installés à Fontanes sont, comme mécanisme, semblables à ceux qui ont été établis par la maison Bréguet dans les mines de Marles (Pas-de-Calais) et dont la construction et le fonctionnement ont été décrits par M. A. Soubeiran, dans *La Lumière électrique* (tome XV, n° 11 du 14 mars 1885, 7<sup>e</sup> année). A Fontanes, les cadrans indicateurs sont au nombre de deux; l'un est établi à la recette du jour, à l'orifice du puits; l'autre à la recette du fond, au niveau 300. Ils portent 14 signaux (voir le croquis du cadran, Pl. V, *fig. 2*). Chaque cadran ou indicateur est muni d'un bouton pour la transmission des signaux et d'une sonnerie électrique qui fonctionne chaque fois que l'on presse le bouton indicateur. Le cadran du haut porte un deuxième bouton pour la remise à la croix de l'aiguille indicatrice des deux cadrans. Le cadran du bas est muni d'une deuxième sonnerie électrique, d'un deuxième bouton et d'un commutateur double permettant de communiquer avec le téléphone dont il sera question ci-dessous.

Ces cadrans sont reliés l'un à l'autre au moyen de trois fils ou lignes établis dans une gaine en plomb, savoir:

La ligne du fond au jour;

Celle du jour au fond;

Celle de la remise à la croix.

La pile est composée de 30 éléments Leclanché, savoir: 15 au jour et 15 au fond.

Pour donner un signal déterminé, indiqué sur le cadran, il suffit de presser sur le bouton indicateur un nombre de fois égal au numéro du rang qu'occupe ledit signal sur le cadran, chaque pression exercée sur le bouton fait marcher d'un cran l'aiguille indicatrice.

Comme à Marles, ces signaux sont automatiquement renvoyés au poste qui les transmet par suite du jeu du mécanisme du cadran indicateur du poste qui les reçoit. Une fois les signaux transmis et approuvés, la remise à la croix est effectuée par le poste du haut en pressant le bouton spécial à ce destiné.

Ces signaux électriques sont complétés par un téléphone permettant au personnel du jour et à celui du fond de transmettre des communications à la voix.

Cette installation téléphonique comprend un poste Bréguet établi au jour, ayant la même sonnerie que celle du cadran indicateur de la recette supérieure, et un poste Bœtcher établi dans la galerie du niveau 300 et muni de deux sonneries, l'une au poste même et l'autre à côté de celle du cadran indicateur de la recette inférieure.

Le téléphone Bœtcher est installé dans une niche à une certaine distance (150 à 250 mètres) de l'avancement. Il est évident qu'à cette distance, les ouvriers du chantier n'en entendraient pas les sonneries; mais à cet appareil est reliée une troisième sonnerie ou trembleuse posée près de l'extrémité de la galerie et que l'on déplace très aisément, de manière à lui faire suivre d'aussi près que possible l'avancement. Actuellement (juillet 1886) le poste Bœtcher est installé à 160 mètres du puits; l'avancement en est à une distance de 400; une nouvelle niche va être pratiquée à 300 mètres de la recette; on va y transporter le téléphone afin de le rapprocher le plus possible des ouvriers qui ont à s'en servir, tout en le mettant à l'abri

des dégradations pouvant résulter des effets destructeurs des ébranlements produits par le tirage simultané à l'électricité de coups de mines fortement chargés.

Cette installation téléphonique comprend deux piles : l'une de trois éléments au jour au poste Bréguet, et l'autre de six au fond au poste Bœtcher.

Nous devons à l'obligeance de M. Lange, ingénieur aux mines de Fontanes, la communication d'un diagramme permettant de se rendre compte de la marche des divers courants qui mettent en œuvre ces signaux (Pl. V, fig. 1).

Ainsi, si l'on presse le bouton indicateur du cadran de la recette inférieure, le circuit de la pile établie à cette recette est fermé ; le courant passant par la ligne du fond au jour pénètre dans l'électro E et attire la palette  $p$ . Le contact  $c$  de cette palette touche alors le bouton  $b$ , ce qui a pour résultat de fermer le circuit de la pile établie au jour, d'un côté sur la sonnerie S, et de l'autre, par la ligne du jour au fond, sur l'électro-aimant  $E_1$  du cadran du bas. La palette  $p_1$  est donc attirée ; or, elle porte deux contacts  $C'_1$  et  $C''_1$ , correspondant à deux boutons  $b'_1$  et  $b''_1$ . La mise en contact de  $c'_1$  et  $b'_1$  ferme le circuit de la pile inférieure sur la sonnerie  $S_1$ . Ainsi donc, les deux sonneries fonctionnent et c'est par l'indicateur du poste récepteur que le signal est renvoyé automatiquement au poste expéditeur.

Si, maintenant, on presse le bouton de la remise à la croix, le circuit de la pile du jour est fermé sur les électro-aimants  $E'$  et  $E''$ , et l'attraction des palettes correspondantes produit le déclenchement qui ramène l'aiguille à la croix.

Pour envoyer un signal du jour au fond, on presse le bouton indicateur du cadran de l'orifice du puits. On ferme ainsi le courant de la pile du jour par la ligne du jour au fond sur l'électro-aimant  $E_1$  du cadran du bas. La palette  $p_1$  est attirée et, par son double contact, ferme le cir-

cuit de la pile du bas, d'un côté, sur la sonnerie  $S_1$ , et, de l'autre, par la ligne du fond au jour sur l'électro-aimant E du cadran de l'orifice ; la palette  $p$  est attirée et ferme le circuit de la pile du jour sur la sonnerie S.

Supposons, maintenant, que du jour on veuille parler au moyen du téléphone aux ouvriers de l'avancement : le receveur du jour fait à celui du bas le signal : *Téléphone*.

Le receveur du bas presse le bouton du téléphone et détermine ainsi un courant qui, partant de la pile inférieure, va au poste Bœtcher, fait sonner la sonnerie établie à ce poste, aussi bien que celle installée tout près de l'avancement. Les ouvriers de l'avancement se rendent alors au poste Bœtcher et répondent en pressant le bouton  $b_3$  ; le circuit de la pile établie au poste Bœtcher est ainsi fermé sur la deuxième sonnerie établie près du cadran de la recette du bas. Le receveur tourne alors le commutateur sur la ligne du téléphone et la conversation entre le jour et le fond peut s'engager. Les deux postes Bréguet et Bœtcher sont munis chacun d'un commutateur à bascule ; il suffit pour établir la communication téléphonique de décrocher les récepteurs. Pendant la conversation, l'aiguille reste sur *Téléphone* ; le receveur du jour indique à celui du fond qu'elle est terminée et que les manœuvres peuvent être reprises en remettant l'aiguille à la croix.

Il en est de même quand les ouvriers de l'avancement veulent correspondre au moyen du téléphone avec les ouvriers du jour ; ils pressent le bouton du poste Bœtcher et ferment ainsi le circuit de la pile établie à ce poste, dont le courant met en branle la deuxième sonnerie du cadran du fond. Le receveur transmet alors le signal *Téléphone* au receveur du jour, puis tourne le commutateur. Le commutateur est toujours placé, toutes les fois qu'on ne manœuvre pas, de manière à donner la communication téléphonique entre le jour et le fond ; il suffit

alors au receveur du jour, lorsqu'il veut parler au personnel du fond, de presser le bouton du poste Bréguet, soit même le bouton indicateur du cadran du jour; il ferme ainsi le circuit de la pile du jour qui fait sonner la sonnerie du poste Bœtcher et celle de l'avancement; inversement, en pressant le bouton du poste Bœtcher, les ouvriers du fond ferment le circuit de la pile de ce poste sur la sonnerie du jour.

Pour éviter toute erreur dans la position du commutateur, il porte un écran qui cache les deux boutons d'appel quand la communication est sur *Téléphone*. Le receveur du bas est donc de toute nécessité obligé de placer le commutateur dans sa position normale lorsqu'il veut faire des signaux.

Cette intéressante installation, après les tâtonnements du début, est aujourd'hui en fonctionnement d'une manière normale et régulière, et donne pleine satisfaction aux exploitants.

Toutefois, nous ferons remarquer qu'il serait préférable d'avoir un fil spécial pour la communication téléphonique. Il peut arriver, en effet, que l'on oublie, une fois les manœuvres d'extraction terminées, de placer sur *Téléphone* le commutateur double; or, il n'y a pas continuellement un receveur à la recette du fond; il n'en est pas besoin, par exemple, pendant la période du forage. Dans ce cas, les appels au téléphone soit du poste Bréguet, soit du poste Bœtcher, seraient infructueux. L'établissement d'un fil spécial aurait pour avantage essentiel de rendre l'installation et le fonctionnement de la communication téléphonique complètement indépendantes de ceux des signaux et de supprimer le commutateur double, pièce qui demande quelque entretien. La deuxième sonnerie établie à la recette inférieure auprès de celle de l'indicateur deviendrait inutile sur ce point et serait établie, au jour, au poste Bréguet.

## NOTE

SUR UN

## PROCÉDÉ D'EXÉCUTION DE TRAVAUX DE SAUVETAGE

Par M. LÉON LÉVY, Ingénieur des mines.

Le manuel intitulé *École de mines*, répandu dans les écoles régimentaires du génie, renferme des instructions sur la construction des puits et galeries, dont les ingénieurs des mines peuvent tirer profit dans plusieurs circonstances, notamment dans l'établissement d'ouvrages de faibles dimensions et essentiellement provisoires, comme certains travaux de reconnaissance ou de sauvetage qui demandent à être exécutés rapidement. Dans le courant de l'année 1884, j'ai eu l'occasion de mettre en pratique un des procédés décrits dans ce manuel. Ce procédé est spécialement préconisé pour les sauvetages de puisatiers ensevelis sous un éboulement dans des terrains sablonneux (\*). Il s'agissait de rechercher le corps d'un ouvrier pris sous un éboulement de 15 mètres au fond d'un puits pratiqué dans les sables de Fontainebleau et dont le revêtement, formé d'une chemise de plâtre de 2 à 3 centimètres, avait cédé sous la pression du terrain. La nature de ces sables, extrêmement maigres et fluides, exigeait des précautions particulières dans la construction

(\*) *École de mines*, page 364.

du puits et du rameau de sauvetage, et l'application des moyens mis en œuvre a donné des résultats assez satisfaisants pour motiver ici la reproduction presque littérale des principaux passages du manuel qui y ont trait.

Le procédé est connu sous le nom de *fonçage de puits à la Boule* (\*).

On commence par établir à la surface du terrain rendu horizontal un cadre à oreilles de  $0^m,80/0^m,80$  dans œuvre, composé de quatre pièces équarries de  $0^m,10$  environ de côté: deux semelles S et S' à oreilles, assemblées à tiers bois avec les chapeaux H et H' (Pl. V, *fig. 3*). On assure tout le système avec de la terre et on le consolide au moyen de piquets placés aux bouts et sur les côtés des oreilles. On fouille ensuite d'environ  $0^m,30$  et on place un premier cadre jointivement au cadre à oreilles (*fig. 4*). On continue la fouille en lui donnant autant que possible une largeur égale au hors œuvre des cadres, que l'on place au fur et à mesure de l'approfondissement. Ils sont composés chacun de quatre planches qui sont assemblées de champ au moyen d'entailles de la moitié de leur largeur (*fig. 5*). Ces planches ont de  $0^m,25$  à  $0^m,30$  de largeur et  $0^m,02$  et  $0^m,03$  d'épaisseur. Elles portent, comme les pièces du cadre à oreilles, des coches au trait de scie en leur milieu. Au moment de la pose de chaque cadre, on laisse descendre successivement un fil à plomb de chacune des coches du cadre à oreilles et l'on fait varier, au moyen de coins, la position du cadre que l'on pose, jusqu'à ce que le fil à plomb couvre exactement les coches correspondantes des différentes pièces. On consolide le système en rattachant par des tringles en bois clouées les faces correspondantes des cadres. Ces tringles ont communément  $1^m,10$  à  $1^m,20$  de longueur,  $0^m,06$  à  $0^m,07$  de largeur et  $0^m,02$  à  $0^m,03$  d'épaisseur.

(\*) *École de mines*, pages 49, 50; 15 et 16.

Lorsque le puits doit être construit rapidement, on ne s'astreint pas à conduire la fouille exactement suivant le hors œuvre des cadres, on la tient un peu plus large et l'on consolide les cadres au moyen de coins ou de gazons que l'on introduit entre eux et les terres.

Il arrive souvent que, le puits se trouvant creusé à la profondeur nécessaire, on soit obligé de déboucher en rameau pour marcher vers les ouvriers à retirer. L'expérience nous conduit également à recommander le procédé suivant (\*\*). Il est fondé sur l'emploi de châssis coffrants disposés jointivement.

Le châssis ordinaire se compose de quatre pièces formées de planches de  $0^m,03$  à  $0^m,05$  d'épaisseur et de  $0^m,25$  à  $0^m,30$  de largeur assemblées à l'aide de trois tenons et d'un coin (*fig. 6*). Le chapeau porte à ses extrémités deux entailles ayant pour largeur le tiers de la largeur de la planche et une profondeur égale à l'épaisseur du bois. La semelle porte également deux entailles de même épaisseur, mais dont l'une est de  $0^m,03$  plus longue que l'autre. L'un des montants se termine par un tenon à chacune de ses extrémités; l'autre ne porte qu'un seul tenon à sa partie supérieure. Pour maintenir ce dernier montant qu'on place du côté de la semelle où se trouve l'entaille la plus profonde, on enfonce dans cette entaille un coin long et mince (*fig. 6 bis*).

Le milieu de la face inférieure du chapeau et celui de la face supérieure de la semelle sont indiqués par un trait de scie. Les quatre pièces d'un même châssis doivent porter un numéro d'ordre.

Pour changer de direction, on emploie des châssis tournants dans lesquels les montants sont de largeur

(\*) Dans les circonstances dont il a été question, on s'est servi de gazons; les cadres étaient placés jointifs en raison de la fluidité des sables.

(\*\*) *Op. cit.*, pages 87 et suiv.

inégal : il en résulte que la semelle et le chapeau semblables entre eux présentent la figure d'un trapèze (*fig. 7*). On gagne la nouvelle direction par l'emploi d'un ou de plusieurs de ces châssis.

Pour établir l'ouvrage, on enlève, s'il est nécessaire, le dernier cadre coffrant posé, on déblaie l'emplacement de la semelle du premier châssis et on la pose de manière qu'elle soit bien de niveau, sa coche exactement dans l'axe du rameau et la face antérieure affleurant dans l'œuvre du puits. On achève la fouille en enlevant, au besoin, un nouveau cadre à la Boule, et on procède à l'assemblage du châssis. A cet effet, on pose celui des montants qui a deux tenons, puis le chapeau, dont on engage l'entaille dans le tenon supérieur du montant placé. Le mineur, soutenant alors ce chapeau avec la tête et les épaules, saisit le deuxième montant qu'on lui passe, engage son tenon supérieur dans l'entaille du chapeau et achève de le mettre en place en s'aidant de ses outils jusqu'à ce que le montant soit à peu près vertical. Il ne reste plus qu'à enfoncer dans l'entaille de la semelle le petit coin qui sert à maintenir le montant dans sa position.

Le premier châssis posé, on pose les suivants jointifs au fur et à mesure que leur emplacement est préparé, et de manière que les coches des semelles soient exactement dans l'axe du rameau et que leur face supérieure se trouve dans un même plan. On assure les semelles dans cette position en damant fortement les terres.

On voit que l'exécution de ces ouvrages ne comporte que des ressources en bois et en main-d'œuvre que l'on trouve réunies dans presque toutes les localités. C'est là un nouvel avantage susceptible d'en étendre l'application.

SUR LA

## THÉORIE DU PLANIMÈTRE D'AMSLER

Par M. A. THIRÉ,

professeur à l'École des mines d'Ouro-Preto (Brésil).

Les *Annales des Mines* ont déjà donné la description et l'usage du planimètre d'Amsler et ont publié diverses théories de cet ingénieux instrument (\*). Je me propose d'en présenter ici une théorie, basée sur une méthode assez simple, et qui conduit accessoirement à quelques propriétés géométriques du planimètre.

Je rappellerai que le planimètre se compose essentiellement (*fig. 8*, Pl. V) de deux branches CI, AIB, articulées en I, et d'une roulette B dont l'axe est la branche AIB. Les extrémités C et A des deux branches sont munies de pointes. Quand l'instrument est placé sur un dessin, ses trois points d'appui sont les pointes C, A et la roulette B. Les branches CI, AIB sont parallèles au plan du dessin; les pointes C et A lui sont perpendiculaires; le plan moyen de la roulette lui est aussi perpendiculaire. La pointe C est aiguë; on peut la fixer en l'enfonçant légèrement dans le dessin et même dans la planchette sur laquelle est collé le dessin: c'est le *pôle* du planimètre. La pointe A est une simple pointe sèche ou style, destinée à suivre le contour d'une figure tracée sur le des-

(\*) *Ann. des mines*, 6<sup>e</sup> série, t. XIX, 1871; 8<sup>e</sup> série, t. I, 1882; 8<sup>e</sup> série, t. III, 1883.

sin. Lorsque, maintenant fixe la pointe C, on fait parcourir à la pointe A un arc de courbe quelconque, on détermine un certain roulement de la roulette; la valeur de ce roulement et l'aire de certaines surfaces qui dépendent de l'arc de courbe parcouru sont liées par une relation assez simple que nous établirons et d'où se déduit la théorie du planimètre.

Soient (*fig. 9*, Pl. V) :

C le pôle du planimètre,

A la pointe mobile,

CI, AIB les deux branches du planimètre, articulées en I.

La roulette a son centre en B à l'extrémité de la branche AIB.

Je désignerai par  $a$  la longueur IA,  $b$  la longueur IB,  $c$  la longueur IC,  $\rho$  le rayon vecteur variable CA.

Dans le triangle CIA, on a

$$a - c < \rho < a + c.$$

Il en résulte que, si l'on décrit deux circonférences du même centre C avec les rayons  $(a - c)$  et  $(a + c)$ , la pointe mobile A se mouvra nécessairement dans l'espace annulaire compris entre ces deux circonférences limites que je représente en  $\lambda\lambda$  et  $\lambda'\lambda'$ . J'appellerai cet espace annulaire la *zone d'action* du planimètre. Pour que l'on puisse faire suivre à la pointe A un certain arc de courbe, il faut que cet arc soit tout entier contenu dans cette zone d'action.

Imaginons que la branche CI reste fixe et que la branche AIB tourne autour de l'articulation I. La pointe A décrira un cercle, et la roulette B roulera sans glisser. J'appellerai *cercles de roulement* tous les cercles qui, lorsqu'ils sont ainsi décrits par la pointe A, conduisent à un mouvement de roulement sans glissement de la roulette.

Quant la pointe A décrit un cercle de roulement, le point de contact de la roulette décrit sur le papier un cercle concentrique  $\gamma$ . Imaginons les trajectoires orthogonales des cercles  $\gamma$ . Quand le point de contact de la roulette décrit sur le papier une de ces trajectoires orthogonales, la pointe A décrit une courbe que j'appellerai *courbe de glissement* : il y a alors glissement sans roulement de la roulette.

Construisons la tangente en A à la courbe de glissement qui passe par ce point. Pour cela, déterminons le centre instantané de rotation de la branche AIB lorsque la pointe A décrit un élément de courbe de glissement. Ce centre instantané est le point d'intersection H de la branche IC et de la perpendiculaire à BA menée par le point B. En joignant HA, nous aurons en HA la normale en A à la courbe de glissement. AT perpendiculaire à AH est la tangente en A à cette courbe.

Soit CAIB (*fig. 10*, Pl. V) la position actuelle du planimètre. Considérons un second planimètre CA'T'B' de mêmes dimensions que le premier, ayant même pôle C, ayant sa branche CI' dans le prolongement du rayon vecteur CA et ayant son rayon vecteur CA' dans le prolongement de la branche CI. A chaque position du planimètre CAIB correspond une position du planimètre CA'T'B'. Il est clair que la position du premier planimètre se déduit de la position du second, de la même façon que la position du second se déduit de la position du premier. Nous appellerons ces deux planimètres *conjugués*. Lorsque la pointe A du premier planimètre décrit une courbe, la pointe A' du planimètre conjugué décrit une courbe que nous appellerons *conjuguée* de la première. Les points correspondants de ces deux courbes se rapportent à des positions correspondantes des pointes A et A'; nous appellerons ces points *conjugués*. Enfin nous appellerons *surfaces conjuguées* et *figures conjuguées* deux surfaces ou

deux figures dont tous les points seront deux à deux conjugués.

Une droite passant par le pôle C a évidemment pour conjuguée la circonférence d'un cercle de roulement, et inversement. Un arc de cercle ayant son centre au pôle C a pour conjugué un arc de cercle égal appartenant à la même circonférence.

Deux surfaces conjuguées sont limitées par des courbes de forme différente, mais ont des aires égales. En effet, décomposons ces surfaces conjuguées en tranches courbes infiniment minces par une série de cercles concentriques, de centre C, infiniment rapprochés les uns des autres. Dans les deux surfaces, ces tranches courbes infiniment minces se correspondent et sont conjuguées deux à deux. Deux tranches infiniment minces conjuguées ont évidemment même épaisseur et même longueur, et, par conséquent, ont des aires égales.

Cette égalité des aires de deux surfaces conjuguées nous sera utile plus loin.

Lorsque la pointe A du planimètre se déplace d'une manière quelconque, le roulement de la roulette correspond à chaque instant à la composante, suivant une perpendiculaire à la branche BA, du chemin suivi par cette roulette. Établissons l'expression du roulement de la roulette pour un déplacement quelconque de la pointe A.

Rapportons les positions de la branche CI à une direction fixe, et appelons  $\omega$  l'angle variable que la branche CI fait avec cette direction fixe.

Appelons  $\theta$  l'angle variable CIB.

Considérons d'abord un déplacement infiniment petit de la pointe A du planimètre.

Soient, pour ce déplacement infiniment petit,  $dz$  le roulement de la roulette,  $d\theta$  l'accroissement de  $\theta$ ,  $d\omega$  l'accroissement de  $\omega$ .

Le déplacement infiniment petit de la pointe A peut

être décomposé en deux déplacements suivant un cercle de roulement et une courbe de glissement.

Soit  $d\theta'$  l'accroissement de  $\theta$  relatif au déplacement composant suivant un cercle de roulement.

Soit  $d\theta''$  l'accroissement relatif au déplacement composant suivant une courbe de glissement.

On a

$$(1) \quad d\theta = d\theta' + d\theta''.$$

Des deux déplacements composants, un seul fait rouler la roulette : c'est le déplacement suivant un cercle de roulement. Le roulement correspondant  $dz$  de la roulette a pour valeur absolue

$$bd\theta'.$$

Pour fixer le signe à attribuer à cette valeur, il faut fixer, pour la roulette, le sens des rotations positives. Nous prendrons pour sens positif des rotations de la roulette le sens opposé à celui du mouvement des aiguilles d'une montre par rapport à un observateur placé en I. Avec cette convention, nous aurons, en grandeur et en signe,

$$(2) \quad dz = -bd\theta'.$$

Cherchons maintenant l'expression de  $d\theta''$ .

Pendant le déplacement composant suivant la courbe de glissement, CI tourne autour de C de l'angle  $d\omega$ . La branche BA tourne autour du centre instantané de rotation H d'un angle facile à déterminer : en effet, I décrit pendant ce déplacement l'arc  $cd\omega$ , et par conséquent l'angle de la rotation autour de H est

$$\frac{cd\omega}{IH}$$

ou

$$\frac{c \cos \theta d\omega}{b}.$$

L'accroissement  $d\theta''$  de l'angle  $\theta$  résulte des déplacements angulaires des deux côtés IB, IC de cet angle et a évidemment pour expression la différence des déplacements angulaires de ces côtés. On a donc

$$(3) \quad d\theta'' = \frac{c \cos \theta d\omega}{b} - d\omega.$$

Éliminons  $d\theta'$  et  $d\theta''$  entre (1), (2) et (3). Il vient

$$(4) \quad dz = c \cos \theta d\omega - b(d\theta + d\omega).$$

Or, dans le triangle CIA, on a

$$\rho^2 = a^2 + c^2 + 2ac \cos \theta,$$

d'où

$$c \cos \theta = \frac{\rho^2 - a^2 - c^2}{2a}.$$

Portons cette valeur de  $c \cos \theta$  dans (4). Il vient :

$$adz = \frac{\rho^2 - a^2 - c^2}{2} d\omega - ab(d\theta + d\omega),$$

ou

$$(5) \quad adz = \frac{1}{2} \rho^2 d\omega - \frac{a^2 + c^2 + 2ab}{2} d\omega - abd\theta.$$

Cette équation (5) est relative à un déplacement élémentaire quelconque de la pointe A du planimètre. Appliquons-la à un déplacement fini quelconque de cette pointe A. Pour cela, intégrons. Il vient, en appelant  $z$  le roulement total de la roulette.

$$(6) \quad az = \frac{1}{2} \int \rho^2 d\omega - \frac{a^2 + c^2 + 2ab}{2} \int d\omega - ab \int d\theta.$$

Cette équation fondamentale donne directement la théorie du planimètre, comme je vais le montrer un peu plus loin.

Ordinairement, les divisions marquées sur la roulette du planimètre d'Amsler et sur le compteur qui enregistre le nombre de tours correspondent au roulement

vrai  $z$  multiplié par la longueur  $a$  de la branche IA de l'instrument. On lit donc directement sur l'instrument la valeur du produit  $az$  qui représente le premier membre de l'équation (6); c'est ce que nous appellerons le *roulement accusé* par l'instrument.

Remarquons que le terme  $\frac{1}{2} \int \rho^2 d\omega$  représente l'aire d'un secteur limité à deux rayons rectilignes issus de C et à la courbe conjuguée de la courbe décrite par la pointe A du planimètre; car le rayon vecteur CA' du planimètre conjugué est constamment égal au rayon vecteur CA ou  $\rho$  du planimètre CAIB; en outre, les déplacements angulaires successifs de CA' sont égaux aux déplacements angulaires successifs  $d\omega$  de la branche CI dans le prolongement de laquelle il se trouve.

Appliquons la formule fondamentale (6) à divers cas.

PREMIER CAS : *Courbe fermée, le pôle étant à l'extérieur de cette courbe.* — Si la pointe A parcourt une courbe fermée qui laisse le pôle en dehors de la surface limitée par cette courbe, l'équation (6) se réduit à

$$az = \frac{1}{2} \int \rho^2 d\omega.$$

Or,  $\frac{1}{2} \int \rho^2 d\omega$  est l'aire de la surface conjuguée de la surface limitée par la courbe fermée décrite par la pointe A du planimètre. A cause de l'égalité des aires de deux surfaces conjuguées, on conclut que, dans ce cas, le *roulement accusé par le planimètre représente l'aire limitée par la courbe fermée décrite par la pointe de l'instrument.*

DEUXIÈME CAS : *Courbe fermée, le pôle étant à l'intérieur de cette courbe.* — Dans ce cas la branche CI effectue une révolution complète, et  $\int d\omega$  a, par consé-

quent, pour valeur  $2\pi$ . L'équation (6) se réduit alors à

$$az = \frac{1}{2} \int \rho^2 d\omega - \pi(a^2 + c^2 + 2ab)$$

ou

$$\frac{1}{2} \int \rho^2 d\omega = az + \pi(a^2 + c^2 + 2ab).$$

On en conclut que, dans ce cas, l'aire limitée par la courbe fermée décrite par la pointe du planimètre a pour valeur le roulement accusé par l'instrument, augmenté de la constante  $\pi(a^2 + c^2 + 2ab)$ .

TROISIÈME CAS : Arc de courbe dont les extrémités sont à égale distance du pôle. — Considérons, d'un part, le secteur limité à cet arc et à deux rayons issus du pôle, et, d'autre part, le secteur limité à l'arc conjugué et à deux rayons issus du pôle. On vérifie aisément que ces deux secteurs sont même surface, en les décomposant en tranches infiniment minces par des cercles concentriques ayant le pôle pour centre.

Appliquons la formule (6) à l'arc du premier secteur. Les extrémités de cet arc étant à la même distance du pôle, les valeurs initiale et finale de  $\theta$  sont égales, et l'on a

$$\int d\theta = 0.$$

En appelant  $\Omega$  l'angle au centre de ce secteur, on a

$$\int d\omega = \Omega.$$

La formule (6) devient donc

$$az = \frac{1}{2} \int \rho^2 d\omega - \frac{a^2 + c^2 + 2ab}{2} \Omega,$$

ou

$$\frac{1}{2} \int \rho^2 d\omega = az + \frac{a^2 + c^2 + 2ab}{2} \Omega$$

$\frac{1}{2} \int \rho^2 d\omega$  représente indifféremment la surface de l'un ou l'autre des deux secteurs que nous avons considérés et dont les aires sont égales. De cette dernière équation on conclut que l'aire du secteur limité par un arc de courbe dont les extrémités sont à égale distance du pôle a pour valeur le roulement accusé par le planimètre (lorsque la pointe de l'instrument parcourt cet arc) augmenté du terme  $\frac{a^2 + c^2 + 2ab}{2} \Omega$  qui est proportionnel à l'angle au centre du secteur.

QUATRIÈME CAS : Arc de courbe quelconque. — Pour un arc de courbe ouvert quelconque, l'équation (6) donne

$$az = \frac{1}{2} \int \rho^2 d\omega - \frac{a^2 + c^2 + 2ab}{2} (\omega_2 - \omega_1) - ab(\theta_2 - \theta_1),$$

$\omega_1$  et  $\theta_1$  étant les valeurs initiales de  $\omega$  et  $\theta$ ,  $\omega_2$  et  $\theta_2$  étant leurs valeurs finales.

Si l'on pose

$$\begin{aligned} r^2 &= a^2 + c^2 + 2ab, \\ r'^2 &= 2ab, \end{aligned}$$

on arrive à cet énoncé :

*Le roulement accusé par le planimètre, lorsque la pointe parcourt un arc de courbe quelconque, représente l'aire du secteur limité à l'arc conjugué et à deux rayons issus du pôle, diminué de la somme des aires de deux secteurs circulaires ayant l'un pour rayon  $r$  et pour angle au centre l'accroissement  $(\omega_2 - \omega_1)$  de  $\omega$ , l'autre pour rayon  $r'$  et pour angle au centre l'accroissement  $(\theta_2 - \theta_1)$  de  $\theta$ .*

Des trois termes qui figurent dans l'expression de  $az$  les deux derniers dépendent seulement des positions initiale et finale du planimètre; le premier terme dépend

des positions intermédiaires par lesquelles passe l'instrument.

Soit  $M_1NM_2$  (fig. 11, Pl. V) l'arc de courbe quelconque décrit par la pointe du planimètre. Considérons le secteur limité à l'arc  $M_1NM_2$  et aux deux rayons vecteurs mixtilignes  $CD_1M_1$ ,  $CD_2M_2$ , formés par les rayons  $CD_1$ ,  $CD_2$  du cercle  $\lambda\lambda$  [cercle de centre C et de rayon  $(a-c)$ ] et par les cercles de roulement  $D_1M_1$ ,  $D_2M_2$ . On voit aisément que la surface S de ce secteur est égale à la surface du secteur limité à l'arc de courbe conjugué, et qui a pour expression  $\frac{1}{2} \int \rho^2 d\omega$ . On a donc, pour nouvelle expression du roulement de la roulette

$$az = S - \frac{1}{2} r^2 (\omega_2 - \omega_1) - \frac{1}{2} r'^2 (\theta_2 - \theta_1).$$

CINQUIÈME CAS : *La pointe de l'instrument parcourt, suivant la direction d'un rayon, la largeur entière EF de la zone d'action du planimètre (fig. 11).* — La courbe conjuguée du chemin parcouru EF est une demi-circonférence de cercle de roulement. Le secteur, dont l'aire a pour valeur  $\frac{1}{2} \int \rho^2 d\omega$ , est un demi-cercle de rayon  $a$ . On a donc, dans ce cas particulier :

$$\frac{1}{2} \int \rho^2 d\omega = \frac{\pi a^2}{2};$$

$\omega$  variant de 0 à  $\pi$ , et  $\theta$  variant de  $\pi$  à 0, on a :

$$\int d\omega = \pi,$$

$$\int d\theta = -\pi.$$

L'expression de  $az$  devient ainsi

$$az = \frac{\pi a^2}{2} - \frac{a^2 + c^2 + 2ab}{2} \pi + ab \pi,$$

ou, en simplifiant,

$$z = -\frac{\pi c^2}{2a}.$$

Il convient d'observer que ce roulement  $z$  est indépendant de  $b$ , et, par conséquent, qu'il est le même, quelle que soit la position de la roulette sur la barre AI.

De là on déduit accessoirement le théorème suivant :

*Dans le mouvement d'une manivelle CI et d'une bielle IA dont l'extrémité A se meut suivant une direction passant par le centre C de la manivelle, si diverses roulettes de même rayon sont montées en divers points de la bielle IA qui leur sert d'axe commun, de façon qu'elles puissent rouler sur un plan P parallèle au plan de la manivelle et de la bielle, le roulement de toutes ces roulettes est le même pour une demi-révolution de la manivelle entre ses deux points morts : ce roulement commun aux diverses roulettes a pour expression :*

$$\frac{\pi CI^2}{2AI}.$$

NOTE  
SUR L'ÉTABLISSEMENT DES CANAUX  
POUR LA CRÉATION DE CHUTES MOTRICES

Par M. ARTHUR THIRÉ,  
professeur à l'École des mines d'Ouro-Preto (Brésil).

Lorsqu'on se propose de dériver un cours d'eau à l'aide d'un canal, pour créer une chute d'eau motrice, la question de l'établissement du canal présente ordinairement, comme on sait (\*), une large indétermination, parce que les éléments de la question (débit, vitesse, aire de la section, forme de la section, pente) sont reliés entre eux par un nombre d'équations inférieur au nombre de ces éléments ou quantités. De là résulte une latitude qui, d'une part, permet de se plier, suivant les cas, aux circonstances variables dans lesquelles peut se présenter le problème, mais qui, d'autre part, peut donner lieu à des incertitudes et à des hésitations, dans l'impossibilité où l'on est d'assigner, d'une manière générale, à ces diverses quantités le rôle d'inconnues ou de données.

Dans un cas qui se présente assez fréquemment dans les districts miniers où l'on a recours exclusivement à l'emploi de la force motrice hydraulique, cette indétermination disparaît, par l'application d'une règle qui permet

(\*) Haton de la Goupillière. *Cours de Machines*, t. 1, p. 455.

de fixer la valeur de la pente à donner au canal. C'est cette règle que je me propose ici d'établir.

Le cas auquel s'applique cette règle est celui d'un canal construit pour dériver une partie seulement des eaux d'une rivière ou d'un cours d'eau, dans le but de créer, par cet emprunt, une chute motrice.

Soient :

- A le point où l'on veut créer une chute d'eau;
- B le point, situé en amont, d'où l'on se propose de prélever une partie des eaux du cours d'eau au moyen d'un canal de longueur  $l$ ;
- H la différence de niveau entre le point B et le bief d'aval en A.

Une partie de la hauteur de chute *totale* H sera absorbée par la pente du canal.

En appelant

- $i$  la pente du canal;
- $h$  la chute disponible *utilisable* en A, à l'extrémité du canal;
- Q le débit du canal;

nous aurons évidemment

$$(1) \quad H = h + li,$$

et le travail moteur disponible en A a pour expression

$$Qh.$$

Considérons un canal de longueur donnée  $l$ , de section donnée  $\Omega$ , partant de B et aboutissant en A avec une pente provisoirement indéterminée. Cherchons la valeur qu'il faut donner à cette pente pour rendre maximum le travail moteur disponible  $Qh$ .

La quantité à rendre maximum peut s'écrire en vertu de (1)

$$Q(H - li).$$

Appelons  $u$  la vitesse moyenne de l'eau dans le canal.

On a

$$(2) \quad Q = \Omega u$$

et

$$(3) \quad i = mu^2,$$

$m$  étant un coefficient qui dépend de la section du canal et de la nature des parois, et qui, par conséquent, est constant dans la recherche de notre maximum.

D'après (2) et (3), la quantité à rendre maximum peut s'écrire

$$\Omega u(H - lmu^2).$$

Or,  $u$  étant la variable, il faut pour le maximum

$$H = 3lmu^2$$

ou, d'après (3)

$$li = \frac{1}{3}H.$$

Or,  $li$  est la hauteur perdue par la pente du canal. Donc de tous les canaux ayant une section et une longueur données, celui qui fournit à son extrémité la force motrice maximum est celui dont la pente sacrifie le tiers de la hauteur de chute totale  $H$  et laisse disponible à l'extrémité du canal les deux tiers de cette chute totale  $H$ .

D'après cela, cette pente est la plus avantageuse et celle qu'il convient d'adopter, puisque, à égalité de longueur et de section du canal, elle correspond au travail moteur disponible maximum.

*Remarques.* — 1° Si, au lieu d'un emprunt partiel, il s'agissait de prélever par un canal la totalité des eaux d'un cours d'eau, il est évident que cette règle ne s'appliquerait plus : car, le débit étant alors donné, il conviendrait, au point de vue du travail moteur maximum, de

restreindre la pente au strict nécessaire, afin de conserver, au point d'arrivée, la plus grande chute possible.

2° Si la pente, calculée d'après la règle précédente, créait une vitesse dépassant la valeur-limite compatible avec la conservation des berges et exposait le canal à un régime torrentiel, il faudrait se borner à adopter, pour la pente, la valeur-limite compatible, dans chaque cas, avec la nature des terrains traversés.

3° Dans la pratique, un canal n'a pas une pente constante sur toute sa longueur. Dans les traversées de terrain où l'exécution du canal est difficile et dispendieuse, on augmente la pente, pour réduire la section et diminuer la dépense d'exécution; au contraire, dans les traversées faciles et où l'exécution est plus économique, on diminue la pente pour regagner sur elle, dans ces parties, ce qu'on avait perdu dans les autres. Dans le cas d'un canal à pente variable, la règle posée plus haut fournira, sinon une base mathématiquement exacte, au moins une indication approximative et utile sur la valeur qu'il conviendra d'adopter pour la pente moyenne.

NOTE SUR L'ÉTAT ACTUEL  
DE LA MINE ET DE L'USINE D'ALMADEN  
(ESPAGNE)

Par M. KUSS, ingénieur des mines

Nous avons publié dans les *Annales des mines* (\*), en 1878 et 1879, un mémoire étendu sur la mine et l'usine à mercure d'Almaden. Ayant eu, tout récemment, l'occasion de visiter à nouveau ces établissements, nous avons pensé que les lecteurs des *Annales* pourraient trouver quelque intérêt à des renseignements précis sur leur situation actuelle.

Nous rappelons qu'on exploite à Almaden trois gîtes rapprochés, à peu près verticaux, minéralisés sur 180 à 200 mètres de longueur, ayant ensemble une puissance utile de 12 mètres environ, encaissés dans les schistes et quartzites siluriens et formés de quartzite blanc ou noir imprégné de cinabre. L'examen nouveau que nous avons fait du remplissage métallifère nous décide à considérer les gîtes, avec M. Oyarzabal, l'éminent directeur d'Almaden, comme des filons-couches, minéralisés par voie hydro-thermale. On y trouve en effet, sur divers points, de véritables brèches à éléments quartzeux ou schisteux, cimentés par du cinabre, de la dolomie, du sulfate de baryte; on y rencontre des géodes tapissées de cristaux

(\*) *Annales*, 7<sup>e</sup> série, XIII, p. 39, 1878 et XV, p. 524, 1879.

de dolomie et de barytine. Or, si le cinabre est volatil, il n'en est pas de même de la dolomie et de la barytine : l'hypothèse du dépôt du cinabre par simple sublimation nous paraît dès lors difficile à admettre. N'est-il pas plus simple d'attribuer la minéralisation à des sources où le sulfure de mercure aurait été tenu en dissolution sous l'influence d'une pression et d'une température élevées et grâce à la présence d'un excès d'hydrogène sulfuré, conditions dans lesquelles, on le sait, Sénarmont réussit à faire dissoudre les sulfures de fer, de zinc et de plomb?

Les filons d'Almaden s'enrichissent sensiblement en profondeur. Un 11<sup>e</sup> étage a été tracé depuis dix ans, à la profondeur de 315 mètres environ : les gîtes y ont plus de 200 mètres de longueur exploitable et leur puissance y dépasse 12 mètres; le minerai pur y abonde, surtout dans la région ouest; le rendement moyen s'est élevé, dans les dix dernières années, à 10 p. 100 environ.

La méthode d'exploitation est bien connue. Elle a reçu quelques améliorations à partir du 10<sup>e</sup> étage. A ce niveau et au suivant, on a tracé, dans le massif stérile qui sépare les deux groupes de filons, de grandes galeries de roulage centrales communiquant avec eux de 40 en 40 mètres par des traverses. Les transports sont ainsi devenus beaucoup plus faciles et le travail dans les chantiers au minerai plus aisé et plus régulier. L'abatage est toujours divisé en trois périodes :

1<sup>o</sup> Enlèvement complet de la zone centrale de chaque massif, avec boisage provisoire;

2<sup>o</sup> Enlèvement, en travers, de colonnes de minerai de part et d'autre de la zone centrale et remblayage par des massifs de maçonnerie, soutenus par des arcs allant d'une éponte à l'autre;

3<sup>o</sup> Enlèvement des colonnes réservées pendant la deuxième période.

L'abatage de la zone centrale (1<sup>re</sup> période) se faisait

autrefois au moyen d'une série de foncées rapprochées, reliées par des gradins ; aujourd'hui il se fait plus simplement par des gradins renversés partant de cheminées espacées de 40 mètres l'une de l'autre.

C'est, comme l'on sait, l'emploi de la maçonnerie appareillée pour le soutènement qui constitue la caractéristique de la méthode d'Almaden. Mais, contrairement à une opinion fort répandue, l'exécution de cette maçonnerie n'entre que pour une part relativement faible dans le total du prix de revient. Celui-ci est incontestablement fort élevé : on verra par les chiffres que nous donnerons tout à l'heure qu'il est de 60 francs environ par tonne de minerai, si l'on répartit les frais généraux, dans une juste proportion, entre la mine et l'usine. Or, dans ce prix, le soutènement figure pour moins de 10 francs, dont moitié à peine pour le muraillement, qui coûte moins cher que le boisage provisoire. Ce qui fait en réalité l'élévation du prix de revient, c'est avant tout, plus encore que la dureté du minerai, l'insalubrité extrême de la mine. Quoique l'aérage y soit excellent, le piqueur, payé de 4 à 5 francs par jour, ne peut y travailler effectivement que 4 heures ou 4 h. 1/2 ; dans cette journée réduite, mais payée comme une journée complète, il excave en moyenne de 80 à 90 décimètres cubes de minerai : aussi l'abatage proprement dit du minerai revient-il à 50 francs environ le mètre cube ou à plus de 15 francs la tonne. Et encore l'ouvrier, travaillant ainsi de 4 heures à 4 h. 1/2 par journée, ne peut-il, sans compromettre très rapidement sa santé, faire plus de 7 ou 8 journées dans le mois. Il en est de même pour les rouleurs, les surveillants, etc. : d'où la nécessité d'entretenir un personnel en apparence hors de toute proportion avec la production et une très forte augmentation des frais généraux et des frais permanents (pensions, secours, etc.). Si l'on veut comparer, au point de vue technique, le prix de revient d'Almaden à celui d'autres

mines métalliques placées dans des conditions ordinaires de salubrité, il convient de tenir compte de cette situation et de se rappeler que la main-d'œuvre dans la mine d'Almaden est au moins deux fois plus chère que dans la plupart des autres mines. La journée de 10 heures y reviendrait en réalité à 10 francs à peu près.

Le minerai, au sortir de la mine, est amené à un atelier de préparation mécanique ou plutôt de classification où il subit un classement par grosseur, puis un triage à la main par qualité. Les gros vont aux fours à aludels, ainsi qu'une partie des menus ; la majeure partie de ceux-ci est aujourd'hui traitée dans deux fours Livermore, qui ont été mis à feu à la fin de 1885.

L'ancien four à aludels est trop connu pour qu'il y ait intérêt à le décrire à nouveau ; nous rappellerons seulement que la cuve y a 2 mètres de diamètre sur 6<sup>m</sup>,50 de hauteur totale ; que la charge y est de 10 à 12 tonnes par opération et la durée de l'opération de trois jours ; chaque four a 12 files de 48 aludels. Jusqu'en ces dernières années, le combustible employé était le bois. Deux modifications ont été récemment introduites, l'une générale, l'autre concernant quelques fours seulement. On a renoncé au chauffage au bois pour adopter la houille comme seul combustible : il a suffi pour cela de disposer une grille dans le foyer. Tandis que l'on consommait autrefois, pendant les dix à douze heures de la période de feu, 2.500 kilogrammes environ de bois et de broussailles, la consommation actuelle de houille est de 700 kilogrammes par opération. Au prix de 25 francs la tonne ; on dépense donc, en combustible, de 24 à 25 francs par opération ; c'est à peu près ce que l'on payait autrefois pour le bois. Mais, si la houille ne procure aucune économie importante, elle a l'avantage d'être moins encombrante et plus facile à approvisionner et à brûler ; la marche de l'opération a gagné en régularité depuis qu'elle a remplacé le

bois. Tous les fours à aludels sont disposés aujourd'hui pour brûler de la houille.

Une autre modification, datant de 1885, n'intéresse jusqu'ici que deux des onze paires de fours à aludels que possède actuellement l'usine. Pensant que la calcination serait plus parfaite si l'on en augmentait la durée, et ayant constaté notamment que l'on ouvrait parfois le four, au milieu de la troisième journée, pour le laisser refroidir, avant que le dégagement des vapeurs mercurielles fût entièrement terminé, on s'est décidé à porter, dans quatre des fours, la durée de la calcination de trois à quatre jours; en même temps, on a agrandi les dimensions des fours et augmenté le poids de la charge dans la proportion de 3 à 4, de manière à continuer à avoir la même production qu'autrefois par four. La consommation du charbon, dans ces fours agrandis, est de 900 kilogrammes de houille par opération, au lieu de 700 kilogrammes. Le nombre des files d'aludels a été porté de 12 à 16.

Le groupe des deux fours à chambres de condensation, dits *fours d'Idria*, n'a subi aucune transformation; on continue, jusqu'à nouvel ordre, à y brûler du bois.

La principale cause de perte, dans le four à aludels, est le dégagement par les cheminées de vapeurs mercurielles non condensées. Quelques expériences ont été faites à ce sujet en 1884-85, en disposant à l'orifice des cheminées une feuille d'or pur de 1 décimètre carré de surface et de 34 grammes de poids. En 48 heures, on a recueilli sur cette feuille, à l'état d'amalgame :

Sur un 1 <sup>er</sup> four. . . . .	0 <sup>sr</sup> ,724	de mercure.
Sur un 2 <sup>e</sup> — . . . . .	0,600	—
Sur un 3 <sup>e</sup> — . . . . .	0,575	—
Sur un 4 <sup>e</sup> — . . . . .	0,500	—
Sur un 5 <sup>e</sup> — . . . . .	0,402	—

On continue à considérer que la perte du traitement ne dépasse pas 5 p. 100 du mercure contenu dans le mine-

rai, la teneur de celui-ci étant déterminée par le procédé Eschka, seul employé aujourd'hui. Nous rappelons que ce procédé d'essai, d'une élégance et d'une simplicité irréprochables, consiste dans la calcination, dans un creuset en porcelaine fermé par un couvercle concave en or, constamment refroidi par quelques gouttes d'eau, de une partie de minerai avec deux parties de limaille de fer et une partie de minium (pour brûler les matières bitumineuses). Le mélange, recouvert d'un peu de limaille de fer et de minium, est chauffé pendant dix minutes, au rouge sombre, sur une lampe à alcool. L'augmentation de poids du couvercle donne, très exactement, le mercure contenu.

Les grenailles et les menus non transformés en briquettes sont traités dans deux fours continus, système Livermore : ce sont des réverbères à sole inclinée et très allongée, divisée en une série de couloirs parallèles et indépendants où le minerai descend au contact du courant ascendant de flammes; la rapidité de la descente est limitée par des briques horizontales disposées en travers du four qui provoquent en outre, chaque fois que l'on tire des *scories* au bas des couloirs, le retournement automatique des matières et le renouvellement des surfaces exposées aux flammes.

L'un des fours Livermore, destiné aux grenailles, a une sole plane; l'autre, servant au traitement des menus, a la sole disposée en escalier. Le premier a dix couloirs, le second en a douze. Dans l'un et dans l'autre, la sole a 7 mètres de longueur et 47° de pente. L'air servant à la combustion du charbon sur la grille s'échauffe d'abord en passant sous la partie inférieure de la sole : on utilise ainsi partiellement la chaleur perdue des *scories*. Les condenseurs ne sont pas identiques aux deux fours : le n° 1 (grenailles) a 20 chambres en briques communiquant les unes avec les autres par des ouvertures alternativement au haut et au bas, à l'avant et à l'arrière des parois

communes, de manière à allonger le trajet des gaz et vapeurs; le four n° 2 (menus) n'a que 18 chambres en briques, avec ouvertures uniformément médianes, situées alternativement au haut et au bas des parois. Le sol des premières chambres est en briques; celui des suivantes est constitué par deux plaques soit de forte tôle, soit plutôt aujourd'hui d'ardoise, formant gouttière. Au four n° 2, les parois des chambres, de trois en trois, sont creuses et refroidies par un courant d'air. A la suite des chambres de condensation sont disposés des condenseurs en bois et verre; les gaz sortant de ceux-ci se rendent à une cheminée d'appel.

Le four n° 1 (grenailles), à 10 couloirs, passe 8 tonnes environ par jour; la durée de la calcination de chaque fragment de minerai est de 8 à 10 heures. La consommation est de 250 à 300 kilogrammes de houille par 24 heures. On essaie tous les jours les *scories*: leur teneur en mercure ne dépasse jamais 0,03 p. 100, les minerais passés tenant de 7 à 10 p. 100; la calcination est donc très satisfaisante. Le four n° 2 (12 couloirs) ne passe que de 5 tonnes à 5 tonnes 1/2 de menus fins par jour; la consommation de houille est de 300 à 350 kilogrammes. La teneur des *scories* est sensiblement nulle.

Chacun des fours emploie un chauffeur et deux enfants; on travaille à trois postes. On peut en conséquence évaluer comme suit les frais par jour et par tonne:

	FOUR à grenailles	FOUR à menus
	fr.	fr.
Main-d'œuvre: 3 journées d'homme. . . . .	9,00	9,00
— 6 journées d'enfants. . . . .	7,50	7,50
Charbon, à 35 francs la tonne. . . . .	9,80	11,37
Entretien du four, estimé à 1.000 francs par an (250 jours de travail). . . . .	4,00	4,00
<b>Totaux . . . . .</b>	<b>30,30</b>	<b>31,87</b>
Par tonne passée. . . . .	3,79	6,37

Ce sont, à peu près, les mêmes totaux que ceux donnés par M. Rolland (\*), pour les fours Livermore de Redington (Californie), bien que la main-d'œuvre soit beaucoup moins chère à l'usine d'Almaden qu'aux États-Unis; mais on remarquera que la production, par couloir, est beaucoup plus faible à Almaden qu'à Redington, où l'on calcine 20 tonnes par jour dans un four à 11 couloirs; on s'attache, en effet, à y obtenir une calcination irréprochable.

La condensation n'est pas moins satisfaisante que la calcination. Des expériences prolongées pendant toute l'année 1886 ont montré qu'en moyenne la température était:

De 700 à 800° . . . . .	dans le foyer,
De 200° . . . . .	dans la 1 <sup>re</sup> chambre,
De 50° . . . . .	dans la 8 <sup>e</sup> ;

et que, dès la 10<sup>e</sup>, elle ne dépassait plus la température ambiante que de 6° ou 7°. A la sortie des condenseurs en bois et verre, elle est à peine suffisante pour maintenir le tirage. La presque totalité du mercure se dépose dans les chambres de briques; les condenseurs à parois vitrées n'ont produit en 1886 que les 9/1000 de la production totale des fours Livermore. La perte finale est certainement très faible; on est convaincu à Almaden qu'elle n'atteint pas 5 p. 100 et nous croyons que l'on est dans le vrai.

Nous terminerons ces notes par quelques indications sur les prix de revient actuels et par quelques renseignements statistiques. En faisant abstraction des variations des stocks de minerais et de matières de toute na-

(\*) G. Rolland, La métallurgie du mercure en Californie (*Bull. de la soc. d'encouragement pour l'ind. nationale*; 77<sup>e</sup> année, 3<sup>e</sup> série, t. V, p. 487, sept. 1878).

ture, le prix de revient, par tonne de minerai traitée dans l'usine s'établit, comme suit pour chacune des trois dernières campagnes :

NATURE DES DÉPENSES	1883-84		1884-85		1885-86	
	fr.	fr.	fr.	fr.	fr.	fr.
Abatage . . . . .	22,11		24,58		25,57	
Boisage et muraillement . . . . .	8,85		9,66		9,27	
Épuisement . . . . .	0,10		0,11		0,20	
Extraction et transports . . . . .	2,32		3,92		4,23	
Matériaux et fournitures pour l'exploitation . . . . .	8,62		8,04		8,15	
Ateliers . . . . .	1,81		1,66		1,70	
Total des frais d'exploitation . . . . .	43,81	43,81	47,97	47,97	49,12	49,12
Frais de distillation et de mise en bouteilles . . . . .		28,72		29,55		27,76
Personnel, frais de bureau . . . . .	10,24		11,37		11,00	
Pension, secours aux ouvriers, etc. . . . .	9,68		10,17		9,77	
Divers, hôpital, chapelle, etc. . . . .	4,68		4,72		4,70	
Total des frais généraux . . . . .	24,60	24,60	26,26	26,26	25,47	25,47
Totaux généraux, par tonne . . . . .		97,13		103,78		102,35

Les quantités traitées ont été dans ces trois campagnes de 17.268 tonnes, 16.265 tonnes et 16.978 tonnes; les rendements de 95<sup>k</sup>,38; 94<sup>k</sup>,95 et 97<sup>k</sup>,25 par tonne de minerai. On voit que la tonne de mercure est revenue à Almaden, logement compris :

En 1885-84, à . . . . .	1.018 <sup>k</sup> ,84
En 1884-85, à . . . . .	1.092,99
En 1885-86, à . . . . .	1.052,44.

L'élévation des frais généraux s'explique, d'une part, par ce fait que les établissements d'Almaden appartiennent à l'État et sont exploités par lui, et, d'autre part, par l'importance des secours accordés, directement ou indirectement, à de très nombreux ouvriers ou anciens ouvriers, victimes de l'insalubrité de la mine et de l'usine.

Les frais de distillation et de mise en bouteilles, estimés ci-dessus de 27 à 30 francs, se sont décomposés comme suit pour chacune des trois campagnes :

Surveillance et main-d'œuvre dans l'usine . . . . .	8 <sup>k</sup> ,60	8 <sup>k</sup> ,96	9 <sup>k</sup> ,28
Combustible . . . . .	2,43	2,61	2,37
Autres fournitures diverses . . . . .	2,42	3,32	2,62
Achat de bouteilles en fer . . . . .	15,27	14,66	13,49
Totaux . . . . .	28 <sup>k</sup> ,72	29 <sup>k</sup> ,55	27 <sup>k</sup> ,76

Le tableau ci-après indique le poids de minerai traité, la production et le rendement des onze dernières années :

	POIDS des minerais traités	MERCURE produit	RENDEMENT des 100 kilogr. de minerai
	tonnes	tonnes	kilogr.
Campagne 1875-76 . . . . .	17.077	1.255	7.341
— 1876-77 . . . . .	18.400	1.325	7.203
— 1877-78 . . . . .	15.410	1.406	9.126
— 1878-79 . . . . .	17.085	1.447	8.468
— 1879-80 . . . . .	16.943	1.557	9.191
— 1880-81 . . . . .	15.274	1.573	10.299
— 1881-82 . . . . .	15.248	1.592	10.441
— 1882-83 . . . . .	15.704	1.609	10.242
— 1883-84 . . . . .	17.268	1.647	9.538
— 1884-85 . . . . .	16.265	1.544	9.495
— 1885-86 . . . . .	16.978	1.651	9.725

Pour la campagne 1886-87, qui va prendre fin, la production dépassera 50.000 bouteilles (1.725 tonnes) : c'est la plus forte que l'on ait jamais obtenue à Almaden. On remarquera, dans le tableau ci-dessus, l'accroissement très marqué du rendement depuis quelques années; de 1870 à 1875, le rendement avait varié de 5,90 à 7,47 p. 100 : il est maintenant compris entre 9 et 10 p. 100. Cet accroissement est dû, en majeure partie, à l'augmentation de la richesse du minerai en profondeur; le mérite en revient aussi, en partie, aux soins éclairés, et toujours plus minutieux, apportés au traitement métallurgique.

Nous terminerons ces notes en faisant connaître par quelques chiffres l'importance relative actuelle d'Almaden. Nous les empruntons au *Tableau comparatif de la production métallurgique des principaux pays*, annexé à la Statistique de l'industrie minérale en France et en

Algérie pour l'année 1885, et à un article très substantiel de M. Habich, l'éminent directeur de l'École des mines de Lima, publié dans le n° II du *Boletín de minas*, édité par cette École.

La production annuelle du monde entier en mercure métallique pourrait s'estimer, d'après la statistique française, comme suit :

Espagne. . . . .	1.564 tonnes (en 1884)
États-Unis d'Amérique. . . . .	974 — (en 1885)
Autriche. . . . .	487 — (en 1885)
Italie . . . . .	267 — (en 1884)

Total. . . . . 3.292 tonnes ou 95.400 bouteilles.

D'après M. Habich, déduction faite de la partie de la production autrichienne qui est transformée immédiatement en vermillon, on peut évaluer à 88.000 bouteilles ou 3.050 tonnes la quantité annuelle de mercure métallique livrée actuellement à la consommation. La production des États-Unis n'étant plus que de 30.000 bouteilles environ, alors qu'elle avait dépassé 79.000 en 1877, 58.000 bouteilles à peu près sont fournies par l'Europe. L'Angleterre, par où passe presque tout le commerce du mercure, en a importé, en 1886, 58.968 bouteilles et exporté 66.109, qui ont été dirigées sur les pays suivants :

Chine (Hong-Kong) . . . . .	21.515 bouteilles.
États-Unis d'Amérique. . . . .	12.311 —
Mexique. . . . .	10.592 —
France. . . . .	4.553 —
Allemagne . . . . .	3.557 —
Pérou . . . . .	3.188 —
Chili. . . . .	2.297 —
Autres pays. . . . .	8.096 —

Total. . . . . 66.109 bouteilles.

Le prix du mercure, à Londres, a varié, en 1886, depuis un minimum de 5 £,15 jusqu'à un maximum de 7 £,10 avec une moyenne de 7 £,5 par bouteille.

Avril 1887.

## NOTE SUR L'OZOKÉRITE

### SES GISEMENTS, SON EXPLOITATION A BORYSLAW

#### ET SON TRAITEMENT INDUSTRIEL

Par M. A. RATEAU, ingénieur des mines.

L'ozokérite est un minéral intéressant à bien des égards. On n'en connaît qu'un très petit nombre de gisements. C'est à Boryslaw, dans la Galicie orientale, à 12 kilomètres au sud-ouest de Drohobycz, qu'on l'a trouvée, pour la première fois, en quantité suffisante pour donner lieu à une exploitation. Cette exploitation, commencée timidement en 1860, a pris rapidement une importance exceptionnelle. Aujourd'hui, elle représente une valeur annuelle de plus de 10 millions de francs. Pour cette valeur seulement, l'ozokérite, qui était presque totalement inconnue il y a vingt-cinq ans, mériterait qu'on s'occupât d'elle.

Les notes qui vont suivre ont été recueillies au mois d'août 1885, pendant un voyage d'étude.

Il y a peu de publications en langue française sur l'ozokérite. Ce sont les mémoires de M. l'ingénieur des mines Heurteau, dans les *Annales des mines* de 1871, et de M. Syroczyński, dans la *Revue universelle* de Liège de 1885. Ces deux mémoires parlent du pétrole en Galicie et accessoirement de l'ozokérite.

### I. Propriétés et usages de l'ozokérite.

On peut définir l'ozokérite : un pétrole solide. C'est en effet un mélange, en proportions variables, d'hydrocarbures simples. Elle renferme environ 85,7 p. 100 de carbone et 14,3 p. 100 d'hydrogène et, par conséquent, peut être représentée par un symbole chimique de la forme :  $C^n H^{2n}$  (notations atomiques).

Wagner (\*) dit qu'on peut admettre, en gros, la formule :



tandis que le pétrole répondrait à peu près à  $C^{12}H^{26}$ .

L'ozokérite présente de nombreuses variétés intermédiaires entre une substance très molle, qui serait du pétrole riche en paraffine, et une substance noire, dure comme du gypse. Mais l'ozokérite ordinaire, de bonne qualité, celle qui est employée pour la fabrication de la *cérésine*, a les propriétés suivantes. Elle est molle, plastique. Sa cassure est extrêmement fibreuse. Sa couleur varie du jaune clair au brun foncé, sa densité de 0,85 à 0,95. A mesure qu'on la chauffe, elle devient de plus en plus plastique. Elle fond aux environs de 62° centigrades et donne, à la distillation, les produits suivants :

Benzine. . . . .	2 à 8 p. 100
Naphte. . . . .	15 à 20 —
Paraffine. . . . .	36 à 50 —
Huiles lourdes. . . . .	15 à 20 —
Résidu fixe. . . . .	10 à 20 —

(on remarquera la quantité considérable de paraffine.)

L'ozokérite est soluble dans la benzine, l'essence de térébenthine, le pétrole.

(\*) Wagner, *Jahrbuch*.

Certains échantillons sont dichroïques : vert foncé par réflexion et jaune par transparence.

Enfin, propriété importante, au point de vue électrique, c'est un isolant qui peut remplacer la gutta-percha. Il y a là de quoi rassurer ceux qui craignent de voir s'épuiser cette dernière substance. MM. Latimer Clarke et Muirhead ont déjà employé, pour isoler leurs câbles, un mélange de deux parties d'ozokérite et une partie de caoutchouc.

Mais l'usage principal de l'ozokérite c'est la préparation de la paraffine et surtout la préparation d'un hydrocarbure blanc, appelé *cérésine*, qui peut remplacer la cire d'abeilles dans toutes ses applications. Pour cela il faut blanchir l'ozokérite et isoler la partie paraffineuse. J'indiquerai plus loin le traitement industriel.

### II. Gisements de l'ozokérite.

L'ozokérite est un compagnon du pétrole. Les gisements connus sont encore peu nombreux. Les principaux sont dans les régions pétrolifères des Karpathes et du Caucase.

Les Karpathes renferment des traces d'ozokérite en beaucoup de points, mais les exploitations ne se font qu'à Boryslaw (20.000 tonnes par an), à Dwiniacz et Starunia, au sud de Stanislawow (Galicie orientale), et à Slanik en Moldavie.

Dans le Caucase, on cite les gîtes du territoire de Kuban au nord de la chaîne, et ceux des îles Swjatoï et Tscheleken, dans la mer Caspienne. En Amérique, l'Utah méridional et l'Arizona renferment, d'après Clayton (\*), des gisements importants.

(\*) *Engineering and mining journal*, 14 mars 1885.

Tous ces points, maintenant que l'ozokérite est activement recherchée, présentent déjà de petites exploitations qui pourront se développer beaucoup dans l'avenir; mais la seule exploitation régulière est à Boryslaw.

Dans quels terrains se trouve l'ozokérite? A-t-elle une tendance marquée à préférer certains étages géologiques? Il est difficile de répondre à ces questions avec précision. Le nombre des gisements connus est encore trop faible et leur étude trop incomplète pour que, de leur comparaison, on puisse tirer quelques résultats certains.

Cependant, l'ozokérite n'étant en définitive qu'un pétrole dont le point de solidification est un peu élevé, il semble raisonnable d'admettre que les conditions de gisement sont les mêmes que pour le pétrole ordinaire. En tout cas on peut, dès maintenant, dire que l'ozokérite se rencontre dans plusieurs étages géologiques, mais de préférence dans les terrains tertiaire et crétacé.

Les grands gisements karpathiques de Boryslaw, Dwiniacz, Starunia sont dans le miocène, mais on en a vu aussi dans les schistes de Teschen et les couches de Wernsdorf (néocomien), dans les trachytes-grünstein des environs de Parad, dans des marnes et des conglomérats de calcaires et de quartz grenus au voisinage de grünstein et de variolite près de Neutitschein.

Les gites du territoire de Kuban sont à la limite du tertiaire inférieur et du crétacé supérieur.

A l'île Tscheleken, l'ozokérite se trouve avec le pétrole, en nids de dimensions très variables, dans des couches de sable au-dessus des argiles schisteuses et du muschelkalk de la formation aralo-caspienne.

Dans l'Utah méridional et l'Arizona, l'ozokérite se rencontre dans le terrain tertiaire, probablement miocène.

Pour bien comprendre les conditions du gîte de Boryslaw, il est nécessaire de jeter un coup d'œil rapide sur la géologie des Karpathes. On peut consulter, à cet égard,

le mémoire de M. Heurteau et la conférence de M. l'ingénieur Noth (\*).

### III. Géologie des Karpathes.

Les plaines de la Hongrie et de la Galicie voisines des Karpathes sont constituées par des couches, pliocènes et miocènes, d'argiles, de schistes et de grès, contenant de nombreux et importants gisements de sel gemme (Wiełiczka, Bochnia, etc...). Les Allemands appellent ces couches *Salzthongruppe* et les rangent dans la formation néogène.

Ces couches, dans un état de dislocation déjà fort prononcé, recouvrent des terrains plus anciens, encore plus disloqués, composés de schistes et de ce fameux grès des Karpathes, qui a donné lieu à tant de discussions entre les géologues. Ces grès karpathiques paraissent devoir être définitivement classés dans l'éocène inférieur et le crétacé supérieur. Les roches du Salzthongruppe leur ressemblent beaucoup; on ne les distingue que parce qu'elles sont en stratification discordante et renferment du gypse et du sel.

Au-dessous des grès karpathiques, se montrent des terrains plus anciens, mais d'un intérêt secondaire pour nous. De distance en distance, on remarque aussi des percées de matières éruptives récentes: trachytes, rhyolithes, etc...

Les Karpathes sont formés de chaînons parallèles à la crête générale de la chaîne. De même, à part quelques rares exceptions, les couches sont orientées parallèlement à cette crête et sont relevées de son côté; de telle

(\*) *Ueber die bisher erzielten Resultate und die Aussichten von Petroleum-Schürfungen in Ungarn.* — Budapest, 1885.

sorte que les terrains les plus anciens viennent affleurer près de l'axe de la chaîne.

Les fossiles sont rares. C'est ce qui rend difficile la classification des puissantes formations des grès karpatiques. Cependant quelques Inocérames ont permis de ranger la partie inférieure de ces grès dans l'étage crétacé, au-dessus du néocomien.

A Boryslaw on ne voit guère que des débris de poissons dans les schistes à ménillites.

Les gisements de pétrole se groupent suivant deux longues bandes, de part et d'autre de la chaîne des Karpathes. Mais il y a lieu de faire entre ces deux bandes une distinction capitale. La bande hongroise, longeant la concavité de la chaîne, est courte et ne contient que des gîtes peu importants, n'ayant donné lieu encore à aucune exploitation, tandis que la bande qui longe la concavité va d'un bout à l'autre de la chaîne, depuis la Silésie jusqu'à l'ouest de la Roumanie, et renferme des gîtes considérables, exploités en de nombreux endroits. Cette remarque peut avoir une portée dans la théorie de la genèse des pétroles.

Dans le tableau qui suit, emprunté à la conférence de M. l'ingénieur Noth (\*), on verra le détail des terrains pétrolifères et des principaux gîtes de pétrole en Hongrie et en Galicie.

Il y a lieu aussi de signaler un curieux gisement de pétrole à Röczk; là, il imprègne une roche trachytique.

(\*) *Loc. cit.*

FORMATIONS	ÉTAGES	NOMS LOCAUX	GITES DE PÉTROLE	
			HONGRIE	GALICIE-BUKOVINE
Néogène . . . . .	Salzhongruppe . . . . .		Recz, Kovac, Garbonac, Dragomer, Soósmezö.	Boryslaw, Starunia-Dwiniacz.
	Supérieur . . . . .	Couches de Szilp. Grès } de Kliwa. } de Magura.	Haute-Hongrie et Transylvanie.	Partout où le Miniltschiefer prend un caractère gréseux.
	Moyen . . . . .	Schiste à ménillites.	Smilno, Szinna, Marmaros, Iod, Dragomer,	Libusza, Bobrka, Barvineck, Polany Baryslaw Wyszkw. Moldawitza.
Eocène . . . . .	Inférieur . . . . .	Grès de Libusza.	Marmaros, Zibo, Udvarhely, Soósmezö.	Libusza, Harlowa, Bobrka, Sanok, Polany.
	Grès calcaires à nummulites.	Couches supérieures à Hiéroglyphes et fucoides.	Konyha, Sacsal.	Mankova, Ustrzyki, Pohar Sloboda rungurska, Polany.
Néocomien . . . . .	Supérieur . . . . . Moyen . . . . . Inférieur . . . . .	Couches inférieures à Hiéroglyphes et fucoides. Couches de Ropianka. Couches de Wernsdorf. Schistes de Teschen.	Przolina, Soósmezö, Mikowa, Luch, Komarnik, Arva, Liptau.	Schodnica, Maldawitza, Mraznica, Barwinek, Ropianka, Siary, Ropa, Kowali, Brzisko, Kleczany, Biala Kimpolung.

Si maintenant nous passons à l'étude des matières qui composent les terrains pétrolifères, nous voyons que ce sont des argiles schisteuses et marneuses avec intercalations de couches de grès épaisses de quelques pieds. Les matières accessoires caractéristiques sont, outre le pétrole et le sel gemme, le gypse, le soufre natif et plusieurs sulfures : blende, pyrites, galène. Fréquemment aussi on rencontre des sources sulfureuses avec beaucoup d'hydrogène sulfuré libre. Le sel gemme et le gypse se rencontrent isolés à l'état presque pur ; mais le plus souvent ils imprègnent les argiles. C'est ce qui arrive à Boryslaw, où l'ozokérite même est imprégnée de sel et de gypse.

Un exemple remarquable et souvent cité de cette association de minéraux se trouve à Truskawiec, près de Boryslaw. Là, dans le voisinage de sources minérales fréquentées, on voit un gisement de soufre natif et de sulfures (galène argentifère, blende, calamine), mélangés de gypse, d'ozokérite, de pétrole. Le terrain encaissant se compose d'argiles schisteuses de couleur gris bleu, mélangées de sable et de marne. Ce gisement est assez considérable pour avoir donné lieu à des exploitations de soufre, de plomb et de zinc.

M. Heurteau a signalé la présence de l'iode dans les terrains de Boryslaw. On a remarqué aussi quelquefois la présence du brome ; mais ce qui doit particulièrement être mentionné, c'est l'association constante dans les Karpathes, comme partout ailleurs, du pétrole et du sel gemme, ou plutôt des hydrocarbures et du sel gemme, car il y a des mines de sel où l'on ne voit pas de pétrole, mais où il y a d'abondants dégagements d'hydrocarbures gazeux (gaz des marais surtout).

Le sol des Karpathes renferme aussi, dans des cavités, des quantités souvent considérables de gaz (hydrocarbures et acide carbonique, quelquefois hydrogène sulfuré

et acide sulfureux). Ces gaz sont à des pressions très fortes, plusieurs dizaines d'atmosphères. Ce sont eux qui sortent d'abord des trous de sonde quand ceux-ci atteignent le niveau pétrolifère. Ces irruptions violentes de gaz, sur lesquelles je reviendrai, produisent fréquemment des accidents.

Après ces préliminaires généraux, je vais plus spécialement décrire le gisement d'ozokérite de Boryslaw et l'exploitation industrielle.

#### IV. Description du gîte d'ozokérite de Boryslaw.

Boryslaw est une ville de 20.000 habitants située au pied et sur le versant nord des Karpathes, par  $49^{\circ}17'3$  de latitude, à 12 kilomètres sud-ouest de Drohobycz.

La vallée est au niveau de 360 mètres au-dessus de la mer. Elle est entourée par de petites montagnes ne s'élevant pas à plus de 400 mètres d'altitude relative. Elle est traversée par une petite rivière, la Tys'mienica, qui s'y divise en plusieurs bras. A 1 kilomètre à l'est de Boryslaw se trouve le village de Wolanka. (Voir la carte, fig. 1, Pl. VI).

Le sol de la vallée est constitué par une couche de diluvium de quelques mètres d'épaisseur. A partir de la surface, on rencontre d'abord des argiles jaunes, puis des cailloux roulés et du gravier, puis des argiles plastiques. Au-dessous de ce diluvium sont des alternances de grès et de schistes bleus excessivement disloqués. Ces couches, classées dans le terrain miocène, s'étendent au loin dans la plaine, mais, à Boryslaw, elles se relèvent vers le sud. Leur puissance maximum est d'environ 200 mètres. Ce sont elles qui renferment l'ozokérite.

Ce terrain miocène repose sur une cuvette de schistes à ménilites pétrolifères, classés dans l'éocène moyen. Ces schistes affleurent au sud de Boryslaw avec un pendage

presque vertical, mais dirigé vers le sud, ce qui montre bien le renversement des couches. Celles-ci se composent de bancs de grès à gros grains, de marne verte, de grès à grains fins, traversés par des veines de calcite, de schistes foncés alternant avec des schistes sableux gris et passant insensiblement à de puissantes couches de grès et de schistes qui ne contiennent plus de pétrole. La coupe théorique, dirigée du nord-est au sud-est (*fig. 2*, Pl. VI), empruntée à la conférence de M. l'ingénieur Noth, montre nettement la cuvette que forment ces schistes à ménilites.

Les formations de schistes et de grès reposent sur les grès karpathiques, fortement imprégnés de pétrole et d'autant plus qu'ils sont plus anciens. Ces grès forment de puissantes couches qu'on classe maintenant, après de longues discussions, dans l'éocène inférieur (grès nummulitiques) et le crétacé supérieur. Ils sont cassés, plissés, hachés, considérablement bouleversés.

Il faut remarquer que la cuvette des schistes à ménilites et des couches de schistes et de grès qui les suivent est interrompue au-dessous de Boryslaw par une grande fracture remplie par les roches miocènes qui viennent ainsi se mettre en contact avec les grès karpathiques et se mélangent même intimement avec eux. Il est naturel d'admettre que c'est par cette fracture que le pétrole et l'ozokérite sont arrivés pour se répandre ensuite dans le terrain miocène.

Sans cette fracture, les émanations hydrocarbonurées auraient été arrêtées par les couches de schistes et de grès placés entre les grès karpathiques et les schistes à ménilites. Ces couches ne sont pas, en effet, favorables à la circulation des hydrocarbures, puisqu'elles ne s'imprègnent pas, alors que toutes les couches voisines sont imprégnées.

Ces inductions, tout à fait vraisemblables, permettent

de supposer que l'on aurait beaucoup plus de pétrole si l'on poussait les sondages jusqu'à la couche des grès karpathiques inférieurs, c'est-à-dire à 400 ou 500 mètres. Le succès de l'avenir est là.

Les autres exploitations d'ozokérite, à Dwiniacz et Starunia, sont dans des conditions analogues. L'ozokérite y est mélangée de beaucoup de pétrole et n'est exploitée que comme produit accessoire, mais son gisement est identique à celui de Boryslaw. Le sol se compose d'argiles diluviales grises et rouges, puis d'une couche de gravier reposant sur le terrain miocène qui contient l'ozokérite et le pétrole. Ceux-ci sont associés au soufre natif, à la pyrite de fer, à la blende. Dans ce terrain miocène on trouve de nombreux débris de végétaux. Au-dessous est une roche calcaire très poreuse, dont les cavités sont remplies de pétrole, d'eau sulfureuse, et bordées de calcite, puis une marne gypseuse et les argiles salifères (*Salzthongruppe*) dépourvues de pétrole et d'ozokérite.

J'ai dit qu'à Boryslaw l'ozokérite se trouvait dans les schistes et les grès miocènes. Elle y forme généralement des filons d'une épaisseur variable de quelques millimètres à quelques pieds. Elle est accompagnée d'une quantité plus ou moins grande de pétrole et de gaz hydrocarbonurés. Les filons, remplissant complètement les innombrables fentes de la roche, forment comme un réseau à mailles serrées. Les *fig. 3 à 3 ter* de la Pl. VI montrent des coupes relevées avec soin. On y voit les filons prendre des formes très capricieuses, mais suivre de préférence la direction des lits de schistes et de grès.

On a remarqué que l'ozokérite devenait de plus en plus plastique à mesure qu'on s'enfonçait, et cela n'est pas seulement un effet de l'accroissement de température avec la profondeur, c'est bien un état de plus en plus imparfait de l'ozokérite.

La région, où se trouve l'ozokérite, présente une disposition tout à fait remarquable (\*). La partie imprégnée, dans l'horizon supérieur, est représentée par des hachures sur la *fig. 1*, Pl. VI. On voit qu'elle est pyriforme. L'axe est dirigé E. 30° S. Boryslaw est bâti sur le renflement de la poire, tandis que la pointe s'étend du côté de Wolanka.

Les hachures distinguent une zone extérieure entourant une zone intérieure. C'est qu'en effet il y a une distinction à faire. La zone intérieure offre l'ozokérite en grande quantité, les puits qui y ont été creusés deviennent de plus en plus productifs à mesure qu'ils descendent. Au contraire la zone extérieure ne renferme que de rares filons, quelquefois minces comme du papier, et les puits deviennent stériles aux profondeurs de 10 à 30 mètres. Dans les horizons supérieurs, la zone intérieure a une longueur de 1.000 mètres et une largeur maximum de 350 m. avec une superficie d'environ 21 hectares; la zone extérieure a une longueur de 1.500 mètres et une largeur maximum de 560 mètres entre les deux bords extrêmes; ce qui fait une superficie de 60 hectares environ pour les deux zones.

On observe que la zone intérieure s'amincit dans la profondeur, jusqu'à n'avoir plus qu'une centaine de mètres de largeur au niveau de 200 mètres. Cette constitution indique bien que l'ozokérite est venue du fond (probablement par la cassure dont j'ai parlé plus haut) et qu'elle s'est de plus en plus épanouie à mesure qu'elle montait, pour enfin s'étaler en nappe mince au niveau supérieur.

Le terrain à ozokérite est lui-même imprégné de pétrole. Il est entouré d'une région pétrolifère, mais seule-

(\*) Leo Strippelmann. *Die Petroleum-Industrie Oesterreich-Deutschlands*. Abtheilung II: Oesterreich. — Leipzig 1879.

ment au sud, à l'est et à l'ouest; la région nord en est absolument dépourvue.

C'est donc au sud seulement que se trouvent les puits à pétrole de Boryslaw. Tous ces puits présentent ce caractère qu'ils deviennent stériles au-dessous de 100 mètres de profondeur environ. C'est qu'ils entrent alors dans la formation stérile de schistes et de grès dont j'ai parlé plus haut.

La *fig. 1*, Pl. VI, indique, par un trait pointillé, la limite de la zone pétrolifère.

### V. Exploitation de l'ozokérite.

**Généralités.** — Le district de Boryslaw a souvent été appelé *la petite Californie galicienne*. On y voit un spectacle bien curieux. En vertu d'une décision souveraine du 22 janvier 1862, le droit d'exploiter le pétrole et l'ozokérite appartient aux propriétaires de la surface (\*). Chaque propriétaire peut ainsi à sa guise exploiter son champ. On le voit alors creuser un puits et, avec l'aide de sa femme et ses enfants, extraire, au prix de grands dangers, ce qu'il peut obtenir de pétrole et d'ozokérite. Il existe plus de 12.000 de ces puits.

Si on tient compte de l'âpreté au gain des juifs qui habitent ce pays, on comprendra que le spectacle de Boryslaw laisse sur le visiteur une impression ineffaçable. M. Heurteau(\*\*) a fait, en 1871, une peinture remarquable de Boryslaw et de ses juifs. Les choses ont un peu changé depuis lors. La civilisation a fait quelques progrès. Un embranchement de chemin de fer a relié Boryslaw à Drohobycz, permettant ainsi un écoulement facile des produits miniers.

(\*) Aguillon. *Législation des mines*, t. III, p. 158.

(\*\*) Heurteau. *Annales des mines* (*loc. cit.*).

Au point de vue de l'exploitation, une transformation considérable est en train de s'opérer.

L'extraction de l'ozokérite présente, comme on le verra plus loin, de grandes difficultés. Elle nécessiterait une exploitation régulière et soignée, plus peut-être qu'aucune autre substance. Elle devrait donc être l'objet de *concessions*. Malheureusement il n'en est pas ainsi. Il en résulte un gaspillage incroyable de ce minéral qu'on aurait tant d'intérêt pourtant à ménager, puisque ses gîtes connus sont très restreints.

Les petits propriétaires, au nombre d'environ 800 sur cet espace si resserré, sont jaloux les uns des autres et ne cèdent pas facilement un terrain qui contient de si grandes richesses.

« Il semble impossible de traiter une affaire sérieuse avec cette population hypocrite et voleuse, dans ce pays où la propriété est mal définie et son mode de transmission souvent incertain (\*). »

Depuis quelques années cependant, des compagnies, encore rares, ont réussi à acheter une surface de terrain assez importante pour permettre une bonne exploitation.

Actuellement les compagnies les plus importantes sont : *la Société de la banque galicienne du crédit* qui extrait annuellement 1.500 tonnes d'ozokérite, et *la Société française* qui extrait environ 1.000 tonnes.

Cette dernière, ayant une exploitation régulière véritable, nous occupera plus spécialement.

Quelle est la richesse totale en ozokérite du sol de Boryslaw? La zone extérieure a une teneur moyenne de 2 p. 100 en ozokérite, la zone intérieure contient certainement plus de 5 p. 100 en moyenne. En calculant, d'après ces données et celles indiquées plus haut comme dimensions des zones, on trouve que, jusqu'à la profon-

(\*) Heurteau (*loc. cit.*).

deur de 200 mètres, le terrain de Boryslaw contiendrait plus de 2 millions de tonnes d'ozokérite.

La valeur de la tonne est très variable. Strippelmann donne les chiffres suivants : 640 francs (\*) en 1876-77, et 560 à 610 francs en 1878.

En 1874-1875, où la production d'ozokérite trouvait un écoulement difficile, l'ozokérite était à 440 francs. En 1885, elle était à 600 ou 650 francs. Le prix de vente tend à remonter un peu, parce qu'on a créé de nouvelles usines.

En admettant seulement un prix moyen de 500 francs par tonne, on voit que le terrain renferme une richesse supérieure certainement à 1 milliard de francs.

Depuis le début de l'exploitation jusqu'à 1886 on a extrait environ 330.000 tonnes valant un peu moins de 200 millions de francs.

Actuellement l'exploitation annuelle est de 20.000 tonnes, valant 12 millions de francs.

Pour la production totale de la Galicie il faut ajouter 2.000 tonnes qui s'extrait annuellement à Dwiniacz et Starunia.

J'ai dit plus haut que les difficultés d'exploitation étaient considérables. Il y a à cela de nombreuses raisons.

Les dégagements de gaz hydrocarboné (grisou) obligent à se servir de lampes de sûreté, et encore arrive-t-il quand même des explosions. Ces dégagements sont d'ailleurs tellement abondants que l'air est vicié au point de gêner beaucoup la respiration, et cela est d'autant plus dangereux que l'action physiologique est agréable. On ressent des impressions enivrantes qui invitent à rester plutôt qu'à fuir l'asphyxie.

On a aussi à se défendre contre les pressions considé-

(\*) Pour les conversions j'ai pris le florin au cours actuel, c'est-à-dire à la valeur de 2 francs.

rables exercées par le terrain sur les boisages. Le pétrole et l'ozokérite semi-fluide se prêtent en effet très bien à la transmission des pressions, de telle sorte que celles-ci s'exercent d'autant plus qu'on s'enfonce plus profondément. Je ne crois pas qu'il y ait au monde une mine où les pressions soient plus à redouter qu'à Boryslaw : des pièces de chêne de plusieurs décimètres de côté sont brisées souvent comme des allumettes.

Un autre effet de ces pressions, c'est de produire fréquemment, dans les puits et les galeries, des irruptions violentes de gaz, de pétrole, et d'ozokérite, au point de remplir ces puits sur une hauteur atteignant parfois 100 mètres.

Ces irruptions, appelées *matka's*, se produisent si vite que quelquefois les ouvriers, n'ayant pas le temps de fuir, sont englobés par la masse fluide.

L'eau n'incommodé pas beaucoup, elle se rencontre seulement à la partie supérieure. On comprend en effet qu'elle aurait de la peine à traverser des roches dont les fentes sont absolument remplies de pétrole, d'ozokérite ou de gaz à haute pression.

Les accidents sont très fréquents. Aux causes précédentes, il faut ajouter la connaissance rudimentaire de l'art des mines et l'usage immodéré de l'eau-de-vie parmi les ouvriers.

La proportion des morts varie de 7 à 15 pour mille par an (\*) alors qu'elle est seulement de 1,88 pour mille dans les mines ordinaires (\*\*).

**Méthode ordinaire d'exploitation.** — La méthode ordinaire d'exploitation a été décrite par M. Heurteau. Je vais la rappeler rapidement : Elle consiste à percer

(\*) Strippelmann (*loc. cit.*).

(\*\*) *Statistique de l'industrie minière pour 1884*, p. 63.

de distance en distance des puits de 1<sup>m</sup>,50 de diamètre. Un homme travaille au fond pendant qu'on ventile très sommairement. Il perce de petites galeries horizontales aux endroits où il rencontre une bonne veine d'ozokérite. Mais, à cause de la pression, ces rameaux ne peuvent être bien longs. On admet que 5 mètres est un maximum qu'on ne peut dépasser sans danger imminent. On boise avec des cadres non jointifs. Les puits, profonds de 20 à 200 mètres, peuvent fournir 20 tonnes d'ozokérite par an et durent de cinq à dix ans. En les plaçant de 10 en 10 mètres on réussit à enlever au terrain les principales veines d'ozokérite.

L'extraction se fait par des seaux suspendus à un câble en fil de fer ou d'acier de 6 à 7 millimètres de diamètre. Ce câble s'enroule sur un treuil au jour.

Il y a à Boryslaw environ 1.000 puits creusés pour l'extraction de l'ozokérite, dont 7 à 800 sont encore en exploitation. Le sol est ainsi percé comme une écumoire. Il y a presque autant de propriétaires que de puits. On peut citer à peine 70 exploitations qui aient deux puits ou plus.

Comme on le voit facilement, cette méthode d'exploitation désordonnée ne peut mener qu'à un gaspillage général du gîte. Et ce qu'il y a de plus malheureux encore, c'est que les quelques sociétés qui ont réussi à acquérir du terrain pour mener une exploitation méthodique, se trouvent généralement sur la zone extérieure, pauvre en ozokérite, ou sur les bords de la zone intérieure. C'est ce qui arrive par exemple pour la *Société de la banque galicienne du Crédit* qui exploite au nord de Boryslaw. Cette Société possède environ 120 puits dont quelques-uns seulement sont en travail. Elle emploie la méthode décrite plus haut. Mais elle a déjà essayé d'introduire celle de la Compagnie française, qui va nous occuper bientôt. Elle rencontre cependant beaucoup de

difficultés pour opérer cette transformation. Les juifs se refusent à quitter leurs anciens puits. Leur routine égale leur cupidité.

**Société française.** — La Société française a acquis, il y a huit ou neuf ans, de l'ancienne compagnie Gartemberg un terrain de 6 hectares environ qui se trouve du côté de Wolanka à la pointe est de la région imprégnée. La plus grande partie est sur la zone extérieure, mais une petite partie est sur la zone intérieure.

On évalue à 2 p. 100 la quantité d'ozokérite contenue dans le sol. Malgré cette faible proportion, les résultats sont bons parce que, comme nous allons le voir, la méthode d'exploitation est excellente.

**Méthode d'exploitation.** — L'exploitation se fait par de petites galeries ou *rameaux* de 10 mètres de longueur seulement. Ces rameaux suivent les principaux filons et partent de grandes galeries B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, B<sub>3</sub> (*fig. 4*, Pl. VI), distantes entre elles de 20 mètres. Ces galeries aboutissent à une galerie transversale principale A qui mène au puits d'extraction.

On emploie la méthode par remblayage et voici comment on procède : quand, sur le parcours d'une galerie B, on rencontre un bon filon, c'est-à-dire ayant plus de 5 centimètres d'épaisseur, on bat au large de façon à faire de chaque côté un rameau CC de 5 mètres de longueur (*fig. 5*, Pl. VI). On monte ensuite de 4 mètres par des cheminées DD, puis on bat encore au large par des rameaux EE (La droite de la figure montre l'exploitation en cet état).

Quand deux tronçons EE, marchant au devant l'un de l'autre se sont rejoints, soit au-dessus des galeries B, soit au milieu de leur intervalle, on monte dans le toit d'une hauteur de 2 mètres et on fait des tailles chassantes FF, en déposant à mesure le remblai en GG, de façon à combler le rameau inférieur pendant qu'on avance

le travail de celui qui est au-dessus. On ménage toujours la partie qui correspond au montage DD, afin de laisser un passage pour le personnel et les matières extraites.

Il est facile de voir qu'en procédant ainsi on n'enlève pas tout le gîte. On laisse vierges des massifs de protection, l'un épais de 2 mètres au-dessus des galeries BB, l'autre épais de 4 mètres et long de 10 entre ces mêmes galeries. Ces massifs seront enlevés quand on abandonnera définitivement l'étage.

Cette méthode d'exploitation n'est au fond que la méthode par gradins renversés, mais avec ce caractère particulier que les rameaux sont très courts, 10 mètres au plus. C'est une conséquence de la pression des roches.

**Boisages.** — Les rameaux d'exploitation sont très étroits. Ils ont seulement 1<sup>m</sup>,50 de hauteur et 1 mètre de largeur. Comme ils sont destinés à une durée éphémère, on les boise aussi sommairement que possible. On est obligé néanmoins de se servir de cadres solides en sapin distants les uns des autres de 1 mètre. Quand on fait le remblayage on n'enlève pas ces cadres. Ils sont destinés à soutenir ceux que l'on placera dans le rameau supérieur.

Les galeries principales BB sont boisées avec grand soin par des cadres en chêne jointifs et on enfonce des picots partout où on le peut. La *fig. 6*, Pl. VI, indique les dimensions de ces cadres. Ils sont trapézoïdaux, constitués par deux montants, un chapeau et une semelle. Toutes ces pièces ont un fort écharissage de 50 × 50 centimètres. Elles laissent entre elles un vide de 1<sup>m</sup>,90 de hauteur et 1 mètre de largeur. Ce vide, déjà bien petit pour des galeries principales, est encore restreint par des pièces C'S' appliquées contre la semelle et le chapeau et destinées à consolider l'ensemble. Les montages sont aussi boisés en cadres jointifs superposés.

Malgré leurs dimensions peu habituelles, les bois sont

souvent tordus et brisés par l'énorme pression qu'ils supportent.

*Abatage.* — L'abatage se fait au pic. Il est relativement facile, car la roche est très tendre et déjà brisée en petits morceaux. Le tirage à la poudre est complètement prohibé à cause de l'inflammabilité des gaz hydrocarbonés qui se dégagent dans la mine.

Aussi on songe maintenant à remplacer le travail manuel par le bosseyage. Il serait difficile d'employer la bosseyeuse dans les petits rameaux. Elle passerait avec peine par les montages. Mais dans les galeries, il est probable que le travail mécanique donnerait d'excellents résultats. Cependant le prix de revient actuel n'est pas très élevé. On donne à l'ouvrier de 4 à 8 florins, c'est-à-dire 8 à 16 francs, par mètre courant de rameau, suivant la dureté de la roche. Avec ce prix les salaires journaliers montent à 2 ou 4 francs. La main-d'œuvre est donc très bon marché, étant données les difficultés du travail.

*Puits d'extraction.* — Le niveau actuel de l'exploitation est à 80 mètres au-dessous de la surface. Le puits d'extraction a 90 mètres de profondeur. Il est décidé qu'on va l'approfondir pour porter l'exploitation au niveau de 130 mètres.

Ce puits a 2 mètres de diamètre seulement. Il est boisé en cadres jointifs de haut en bas, excepté à la partie supérieure, où il est blindé, sur une longueur de 30 mètres, avec des panneaux cylindriques en fonte de 20 millimètres d'épaisseur. Ce cuvelage repose à sa base sur un socle en fonte solidement encastré dans le terrain.

*Extraction.* — L'extraction se fait par cages guidées attachées à des câbles ronds en acier de 49 millimètres de diamètre qui passent sur des molettes de 1<sup>m</sup>,30 de diamètre et vont s'enrouler sur deux tambours cylindriques.

La recette est placée à 6 mètres au-dessus du sol.

L'ozokérite est jetée sur des grilles trieuses par des culbuteurs tournant sur galets comme ceux qu'on rencontre dans les charbonnages.

*Éclairage, ventilation.* — Les gaz carburés qui souillent l'atmosphère de la mine obligent à se servir de lampes à toiles métalliques et à faire une active ventilation. Celle-ci est obtenue au moyen de deux ventilateurs centrifuges Scheele de 1 mètre de diamètre, tirant ensemble 300 mètres cubes d'air par minute et donnant une dépression de 10 à 12 centimètres d'eau. Le calcul donne pour « orifice équivalent » : 0<sup>m</sup>,2. C'est donc une mine « très étroite ».

L'air pur entre par le puits d'extraction, suit la grande galerie principale, se distribue dans la mine par les galeries B<sub>1</sub> B<sub>2</sub> B<sub>3</sub>, parcourt les rameaux comme le représentent les flèches de la fig. 5, Pl. VI, et sort par un deuxième puits de 1<sup>m</sup>,50 de diamètre pour aller aux ventilateurs. Ce puits n'est que provisoire.

*Épuisement.* — L'eau est assez abondante dans la mine. Cela tient à ce qu'elle se trouve sur le bord de la région imprégnée.

L'épuisement se fait par un puits spécial de 1<sup>m</sup>,50 de diamètre placé à côté de celui d'extraction (Voir le plan de la mine). Ce puits servira aussi plus tard au retour d'air, mais il n'est pas encore approfondi jusqu'au niveau de l'exploitation. On commence par y amener les eaux au moyen de deux pulsomètres qui montent chacun 500 litres d'eau par minute à 30 mètres de hauteur.

L'eau est ensuite montée, du niveau de 60 mètres à la surface, au moyen d'une pompe d'épuisement aspirante et foulante, disposée suivant le système Rittinger, de façon à élever l'eau à la descente et à la montée du piston.

La course étant de 1 mètre et le nombre de coups de

20 par minute, on peut monter 1 mètre cube d'eau par minute.

*Conclusion.* — La mine emploie 500 ouvriers et donne 1.000 tonnes d'ozokérite par an.

L'exploitation étant faite méthodiquement et rationnellement, avec les engins modernes, donne d'excellents résultats. Il serait à souhaiter qu'elle fût suivie partout. Malheureusement on n'en est pas encore là, tant s'en faut. Cependant la nouvelle loi du 11 mai 1884 (\*), qui tend à assimiler les mines d'ozokérite aux mines concessibles, facilitera les tentatives faites dans cette voie.

## VI. Traitement de l'ozokérite.

A Boryslaw même on soumet l'ozokérite à un premier traitement ayant pour but de la séparer de la gangue qui l'entoure plus ou moins. C'est une simple fusion à feu nu ou à la vapeur. L'ozokérite est coulée en pains qui s'expédient facilement par chemin de fer. C'est l'Autriche qui en reçoit la plus grande partie, mais on l'expédie aussi en Russie, en Allemagne, en Angleterre.

Les principales usines qui traitent l'ozokérite sont à Drohobycz, à Lemberg, à Stockerau près de Vienne, à Vienne, à Aussig, à Teplitz, à Elbeteinitz, à Battersea près de Londres, à Halle, à Francfort, à Hambourg.

L'usine de Stockerau a une grande importance. Celle de Lemberg est installée seulement depuis un an. Elle ne marchait pas encore quand j'y suis passé.

La fusion de l'ozokérite s'opère généralement par la vapeur surchauffée. On blanchit avec de l'acide sulfurique ou avec du noir animal, et on dissout quelquefois l'ozokérite avec de la benzine.

(\*) Aguillon (*loc. cit.*).

Voici, comme exemples, diverses formules de traitement :

*Usine de Battersea.* — « On met deux à trois tonnes d'ozokérite dans une chaudière. La masse, fondue par un courant de vapeur, s'écoule dans une cornue où on fait une distillation, d'abord à la vapeur, ensuite par chauffage à feu nu.

« La matière distillée coule dans des formes où elle se solidifie en masse paraffineuse imprégnée d'huile. On soumet alors les gâteaux à la presse hydraulique, puis on les fonde de nouveau pour les envoyer ensuite, à l'état liquide, dans une chaudière où on mélange avec une certaine quantité d'acide sulfurique. Cette chaudière est pourvue d'une chemise de vapeur et d'appareils mélangeurs mécaniques. Après un certain temps d'agitation, on laisse reposer la masse. L'acide sulfurique reste au fond en entraînant les matières colorantes. On tire ensuite la masse paraffineuse dans des vases où elle est fondue encore une fois. On coule enfin dans les formes définitives (\*). »

*Méthode Redl.* — Frédéric Redl a indiqué (\*\*) une méthode pour blanchir l'ozokérite sans emploi d'acide sulfurique, avec du noir animal seulement. Voici son procédé :

On fonde l'ozokérite avec 3 parties de noir animal ; après six heures, on extrait la masse en dissolvant avec du sulfure de carbone ou de la benzine, on sépare ensuite l'ozokérite et on obtient 90 p. 100 d'une cire blanche à cassure analogue à celle de l'ozokérite, contenant, outre la cérésine, tous les produits organiques que l'acide sulfurique désorganise par son action.

(\*) Wagner. *Jahrbuch*, 1878.

(\*\*) Hubner's *Zeitschrift für Paraffin und Mineralölindustrie*.

*Usine Minz et C<sup>e</sup> à Lemberg.* — Pour préparer la *cérésine* on mélange d'abord l'ozokérite à 5 ou 6 p. 100 d'acide sulfurique, puis à un poids égal de benzine. La dissolution est traitée par 25 p. 100 de noir animal dans des cylindres chauffés à la vapeur par des tuyaux. La solution décolorée est tirée, puis placée dans des alambics en cuivre afin d'extraire et de recouvrer la benzine, qui est immédiatement réemployée après séparation par l'eau.

Comme résidu dans l'alambic, on a la *cérésine* à l'état fondu.

La *paraffine* se prépare avec l'ozokérite qu'on ne peut employer à la fabrication de la *cérésine*, et de la même façon que celle-ci, à part quelques détails. Comme résidu de ces préparations, on a des huiles qui servent à faire de la *vaseline*.

Cette méthode de traitement est rationnelle; les déchets sont très faibles, les consommations d'acide sulfurique et de benzine très faibles aussi. Le seul inconvénient à signaler est la consommation importante de noir animal.

## RAPPORT

SUR LA

## NOUVELLE SOUPE DE SURETÉ BARÇON

Par M. MICHEL LÉVY, ingénieur en chef des mines.

**I. Description et fonctionnement de la soupe.**

M. Barçon, ingénieur aux forges de Fraisans (Jura), a transmis, à la date du 28 mars 1885, la description et les dessins d'une nouvelle soupe de sûreté *insurchargeable dite universelle*, à M. le ministre des travaux publics, en lui demandant d'émettre un avis favorable à son application.

M. l'ingénieur des mines Luuyt a étudié le fonctionnement du nouvel appareil et en rend compte dans un rapport du 8 juin 1885.

L'appareil, qui s'adapte sur le siège d'une soupe ordinaire de même dimension, comporte sommairement trois organes principaux : un plateau reposant sur le siège de la soupe, une cloche coiffant extérieurement la partie supérieure du plateau et sur laquelle s'appuie le levier à contrepoids ou à ressort, enfin une petite soupe tronçonnée traversant le centre du plateau et s'ouvrant de haut en bas (Pl. VII, fig. 1, 2).

**1° Plateau.** — Il repose exactement sur son siège et se trouve muni à sa partie inférieure de quatre ailettes, comme à l'ordinaire. Sa partie supérieure porte un manchon central dans lequel glisse la tige verticale de la pe-

tite soupape tronc-conique. De plus, ses bords extérieurs se relèvent en forme de cylindre formant comme le siège d'une seconde soupape, sur lequel peut venir s'appuyer un des rebords de la cloche extérieure.

2° **Cloche extérieure.** — Son mouvement est limité : vers le bas, par ce second siège ; vers le haut, par trois goujons fixés dans un repli de la cloche qui emboîte tout l'appareil, et glissant dans trois rainures pratiquées dans la partie extérieure du plateau. La cloche mobile repose sur le plateau par l'intermédiaire de deux couples superposés de ressorts en acier galvanisé, dits *rondelles Belleville*. On sait que ces ressorts ont une flèche limitée et présentent la propriété de se comprimer entièrement sans que leur élasticité soit altérée ; les disques d'acier dont ils sont composés viennent alors s'appuyer l'un sur l'autre et constituent un empilement jointif de rondelles superposées ; leur rupture est donc à peu près impossible.

3° **Soupape centrale tronc-conique.** — Elle traverse le plateau, au centre inférieur duquel elle ferme une petite ouverture communiquant avec l'intérieur de la cloche par des conduits évidés. Un petit ressort à boudin pousse sa tige de bas en haut et, d'ailleurs, en temps normal, la pression de la vapeur la maintient exactement appliquée contre son siège. Mais sa tige vient affleurer la partie supérieure de la cloche et le moindre mouvement de haut en bas de cette enveloppe ouvre la soupape tronc-conique. Dès lors, la vapeur pénètre dans l'intérieur de la cloche et en sort entre le plateau et le rebord intérieur de la cloche qui remplit l'office d'un timbre.

On conçoit, dès lors, le fonctionnement de l'appareil : lorsque le levier normalement chargé est horizontal, on dispose de la tension des ressorts Belleville de telle façon que la cloche soit en équilibre à l'extrémité supérieure de sa course possible ; la tige de la soupape tronc-conique a une

longueur telle qu'elle affleure alors le plafond de la cloche.

La moindre surcharge abaisse la cloche tout entière, qui ouvre la soupape tronc-conique, et le sifflement du timbre de l'appareil se fait entendre. Ainsi, une surcharge quelconque produit un appel et laisse échapper de la vapeur, même lorsque la pression est au-dessous de la pression normale.

Si les soupapes de sûreté ont été calées, l'appareil n'entre en jeu que lorsque la pression normale est dépassée ; alors les ressorts Belleville se compriment, et le plateau de la grande soupape se soulève en laissant échapper la vapeur ; mais, en outre, ce mouvement ouvre également la petite soupape tronc-conique et le timbre spécial résonne de nouveau.

M. l'ingénieur Luuyt a vu fonctionner un appareil Barçon, réglé pour une pression de 4 kilogrammes. Il a constaté que la plus légère surcharge, une simple pression du doigt, fait vibrer le signal d'alarme. Il a également constaté que, la soupape une fois calée, le moindre excès de pression laisse échapper la vapeur et produit le son avertisseur.

Il considère l'entretien du nouvel appareil comme facile, et croit que les ressorts Belleville galvanisés conserveront longtemps leur jeu normal. La soupape Barçon lui a paru bien fonctionner et présenter les conditions de simplicité, de sécurité et de solidité nécessaires à l'usage courant.

M. l'ingénieur en chef Delafond appuie ces conclusions ; la nouvelle invention mérite d'être encouragée ; il serait à souhaiter, d'après M. Delafond, que la soupape Barçon fût essayée pendant plusieurs mois sur des chaudières appartenant à l'État, et, si les résultats sont satisfaisants, il conviendrait de recommander le nouvel engin aux propriétaires d'appareils à vapeur, au moyen d'une note insérée dans les *Annales des mines*.

*Avis du rapporteur.* — Les avis favorables précédents paraissent justifiés au rapporteur ; la disposition de la soupape Barçon est ingénieuse ; le jeu de ses divers organes est simple et vraisemblablement susceptible d'un bon fonctionnement pratique.

Actuellement, un chauffeur qui veut paralyser le jeu d'une soupape de sûreté peut obtenir ce résultat dangereux en un tour de main. Il sera beaucoup plus compliqué à atteindre avec la soupape Barçon et le plus souvent la complicité du chef d'industrie sera nécessaire pour y parvenir.

Mais, avant de formuler un avis définitif, il convient de procéder à des essais pratiques, suffisamment prolongés. En conséquence, le rapporteur a l'honneur de soumettre à l'approbation de la Commission centrale l'avis suivant :

La soupape de sûreté dite *insurchargeable et universelle* de M. Barçon paraît ingénieusement combinée, en vue de signaler et d'éviter les dangers de la surcharge ou du calage des soupapes de sûreté. Il convient d'en essayer le fonctionnement pratique pendant un laps de temps suffisant, tant sur des chaudières appartenant à l'État ou à la Ville de Paris, qu'en recourant aux bons offices des associations de propriétaires d'appareils à vapeur.

*P.-S.* — Plusieurs membres de la Commission, notamment MM. Forquenot et Clérault, s'offrent pour les essais à intervenir.

*L'Ingénieur en chef des mines, Rapporteur,*

Signé : MICHEL LÉVY.

#### **Avis de la Commission centrale des machines à vapeur.**

La Commission centrale, dans sa séance du 28 juillet 1885, après avoir entendu l'exposé, les observations et les conclusions qui précèdent, et en avoir délibéré, a adopté l'avis proposé par le rapporteur.

#### **II. Essai de la soupape Barçon dans les ateliers de la Compagnie de l'Ouest.**

Les conclusions du précédent rapport, adoptées par la Commission, étaient que la nouvelle soupape paraît ingénieusement combinée en vue de signaler et d'éviter les dangers de la surcharge et du calage des soupapes de sûreté, et qu'il y avait lieu d'en essayer le fonctionnement pratique pendant un laps de temps suffisamment prolongé.

MM. Forquenot et Clérault avaient bien voulu s'offrir pour les essais à intervenir.

M. Clérault, ingénieur en chef des mines, ingénieur en chef du matériel et de la traction à l'Ouest, a bien voulu mettre à la disposition du rapporteur les renseignements recueillis, pendant huit mois de fonctionnement de la soupape Barçon sur une chaudière tubulaire Farcot, à foyer intérieur, de 52 mètres carrés de surface de chauffe, installée aux ateliers des Batignolles. Le rapporteur a pu constater lui-même l'état de la soupape et son fonctionnement, à la suite de cet essai prolongé.

Les essais, après huit mois de fonctionnement, ont porté sur les points suivants :

1° Fonctionnement général de la soupape, quand il n'y a ni surcharge ni calage ;

2° Fonctionnement de la soupape tronç-conique, quand il y a surcharge ; sensibilité de cet appareil à la surcharge, au double point de vue de l'échappement de la vapeur et du bruit caractéristique dû à la vibration du timbre ;

3° Fonctionnement, en cas de calage, quand la pression s'élève au-dessus du timbre de la chaudière et au double point de vue précédent.

La pression du timbre étant de 5<sup>k</sup>,500, les éléments de la soupape essayée étaient :

Diamètre . . . . .		85 <sup>mm</sup>	
Levier. . . . .	{	Petit bras . . . . .	50
		Grand bras. . . . .	48 <sup>5</sup>
Poids . . . . .	{	du contrepoids . . . . .	33 <sup>ks</sup>
		du levier. . . . .	1 ,425
		de la soupape. . . . .	1 ,980

*Fonctionnement général.* — 1° La soupape Barçon fonctionnait, sans surcharge ni calage, exactement comme la soupape ordinaire voisine; aucun inconvénient spécial au système nouveau n'a été relevé dans les divers essais.

*Surcharge.* — 2° A 5 kilogrammes de pression de vapeur, une surcharge de 0<sup>k</sup>,400 au bout du levier donne lieu à une légère émission de vapeur par la soupape tronç-conique; le timbre ne commence à résonner sensiblement qu'à 0<sup>k</sup>,800 de surcharge. D'après les observations des ingénieurs de la compagnie de l'Ouest, ce bruit caractéristique était légèrement plus intense, toutes choses égales d'ailleurs, durant les premiers mois des essais. Une forte surcharge (4 à 5 kilogrammes) fait sonner bruyamment le timbre.

*Calage.* — 3° Le levier de la soupape ayant été calé sans effort, la pression de la vapeur a été poussée au-dessus de celle du timbre. La soupape Barçon s'est soulevée comme la soupape ordinaire voisine et a laissé perdre sensiblement la même quantité de vapeur.

A 6 kilogrammes (timbre 5<sup>k</sup>,500), le timbre a commencé à résonner; il était nettement perceptible, malgré les bruits de l'atelier, à 6<sup>k</sup>,250.

D'une façon générale, quand le timbre a commencé à vibrer, il continue même quand la cause, surcharge ou calage avec excès de pression, a cessé d'agir. Il paraît évident que la soupape tronç-conique ne se referme pas alors hermétiquement, et qu'elle laisse échapper une très

petite quantité de vapeur qui suffit pour entretenir la vibration du timbre. Cette propriété n'est d'ailleurs pas, à proprement parler, un défaut. Elle peut mettre sur la voie d'une imprudence précédente du chauffeur.

Mais il convient de répéter que, sauf les cas de surcharge considérable, le bruit du timbre ne s'entend pas de loin, surtout au voisinage d'ateliers bruyants.

*Examen de la soupape démontée après huit mois d'essais.* — L'examen de la soupape, démontée après huit mois de fonctionnement, a permis de constater que ses organes n'avaient subi aucune avarie.

La soupape tronç-conique fonctionne facilement et n'est pas encrassée.

Les ressorts Belleville sont intacts et portent à peine, ainsi que la rondelle formant timbre, quelques traces superficielles de rouille.

Les trois vis; qui arrêtent le jeu de la cloche sur le clapet, ont dû être coupées.

*Possibilité d'un double calage.* — Il est facile, à froid, de caler le type actuel de la soupape Barçon, en introduisant des goujons entre la cloche et le clapet. Mais il convient d'ajouter que cette opération est beaucoup plus difficile à chaud, lorsque la soupape est en place sur un siège de niveau avec la surface extérieure de la chaudière.

Elle redeviendrait possible, même à chaud, sur certaines locomotives, dans lesquelles les sièges des soupapes sont portés sur des plates-formes surélevées.

En résumé, il ressort des expériences et des observations précédentes :

1° Que l'adaptation de la soupape Barçon aux sièges des anciennes soupapes se fait très facilement et ne présente aucun inconvénient pratique ;

2° Que, dans les types de chaudières où le siège des

souapes est de niveau avec une surface suffisamment étendue, il est très difficile de paralyser le jeu du nouvel appareil, tant que le générateur est en pression ;

3° Que le calage ou la surcharge n'empêche pas la soupape Barçon de se soulever au-dessus de la pression limite, comme le ferait une soupape ordinaire intacte ;

4° Que le fonctionnement du timbre avertisseur produit en général un bruit caractéristique, mais faible, qui se prolonge après que la cause (surcharge ou calage avec excès de pression) a cessé d'agir.

En conséquence, le rapporteur a l'honneur de soumettre à l'approbation de la Commission centrale l'avis suivant :

La soupape de sûreté Barçon est d'une construction simple et peu susceptible d'avaries ; elle s'applique facilement sur le siège des soupapes ordinaires.

Son fonctionnement prolongé n'a révélé aucun inconvénient spécial ; il présente des avantages notables sur celui des soupapes ordinaires et rend difficilement efficace, à chaud, le calage ou la surcharge.

Il y a donc lieu, par M. le ministre des travaux publics, d'en signaler l'emploi aux industriels par l'insertion, dans les *Annales des mines*, des rapports et des avis de la Commission centrale, en date des 28 juillet 1885 et 5 octobre 1886.

*L'Ingénieur en chef des mines, Rapporteur.*

Signé : MICHEL LÉVY.

#### Avis de la Commission centrale des machines à vapeur.

La Commission centrale, dans sa séance du 5 octobre 1886, après avoir entendu l'exposé, les observations et les conclusions qui précèdent et en avoir délibéré, a adopté l'avis proposé par le rapporteur.

## RAPPORT

SUR LA

## NOUVELLE SOUPE DE SURETÉ CORET

Par M. MICHEL LÉVY, ingénieur en chef des mines.

M. Coret, garde-mines à Bourges, a transmis à la date du 12 août 1886, à M. le Ministre des travaux publics, la description d'une nouvelle soupape de sûreté, dite incalable, en le priant de vouloir bien soumettre cet appareil à l'examen de la Commission centrale des machines à vapeur.

*Avis de l'ingénieur ordinaire.* — M. de Grossouvre, ingénieur des mines à Bourges, a étudié le fonctionnement de la soupape Coret et en rend compte dans un rapport du 16 août 1886.

Elle se compose sommairement d'un siège ordinaire et d'un clapet en bronze, chargé par un levier à l'extrémité duquel peut agir un poids ou un ressort-balance (Pl. VII, fig. 3).

Le clapet se décompose en deux parties pouvant glisser l'une sur l'autre. Il est en effet traversé, à son centre, par une deuxième soupape tronç-conique (fig. 3 et 4), s'ouvrant de haut en bas, et maintenue ordinairement fermée par un ressort à boudin, s'appuyant en bas sur le clapet même, en haut sur le fond supérieur d'un cylindre vissé dans le clapet.

Ce cylindre et la tige verticale de la soupape tronç-

conique sont évidés de façon à laisser échapper la vapeur lorsque cette soupape centrale s'entr'ouvre.

C'est sur le sommet de la tige de la soupape tronconique que s'appuie le levier de charge, qui n'agit ainsi sur le clapet que par l'intermédiaire du ressort à boudin.

On conçoit dès lors le fonctionnement de l'appareil. La tension du ressort est réglée de façon à contrebalancer exactement la charge du levier. S'il n'y a ni calage, ni surcharge, la soupape fonctionne à la façon des soupapes ordinaires. S'il y a calage ou surcharge, c'est le ressort qui se comprime; en cas de surcharge, il ouvre la soupape tronconique centrale; lorsqu'il y a calage simple, le clapet se soulève néanmoins quand la pression dépasse celle du timbre, la soupape tronconique seule se trouvant immobilisée par le calage.

M. de Grossouvre a assisté à des essais de la soupape Coret dans les ateliers de Vierzon; il a constaté que l'appareil est très sensible et que le but proposé paraît atteint d'une manière très satisfaisante.

*Avis de l'ingénieur en chef.* — M. l'ingénieur en chef Leseure estime qu'un essai prolongé est nécessaire pour vérifier que la soupape tronconique centrale conservera longtemps son étanchéité, et que le ressort gardera la même élasticité.

*Lettre d'envoi de M. l'inspecteur général.* — M. l'inspecteur général des mines Haton de la Goupillière, en adressant le dossier à M. le Ministre des travaux publics, et tout en réservant son opinion définitive, signale l'invention comme digne d'attention et d'intérêt.

*Avis du rapporteur.* — La nouvelle soupape est ingénieuse et rend beaucoup plus difficiles les cas de surcharge et de calage. Il est vraisemblable que son fonc-

tionnement pratique prolongé n'en fausserait pas les principaux organes; tout au plus y a-t-il lieu de remarquer que le calage du ressort à boudin, qui paralyserait l'appareil tout entier, n'est pas très difficile à obtenir à froid, même si l'on suppose qu'on donne à la partie supérieure du clapet une forme conique accentuée.

Mais le rapporteur doit signaler la grande analogie de principe de la soupape Coret avec la soupape Barçon, qui a déjà fait, à la date du 28 juillet 1885, l'objet d'une appréciation favorable de la Commission centrale.

La soupape Barçon prévient en outre du calage ou de la surcharge par un bruit spécial; la seule différence essentielle consiste dans l'emploi des rondelles-ressorts Belleville à la place du ressort à boudin de M. Coret. Il convient d'ajouter que, dans le système Coret, la tension du ressort à boudin est facilement réglée par un écrou, tandis que les rondelles Barçon doivent être choisies dès l'origine pour la tension convenable.

En conséquence, le rapporteur a l'honneur de soumettre à l'approbation de la Commission centrale l'avis suivant :

La soupape dite incalable, inventée par M. le garde-mines Coret, est ingénieuse et paraît appelée à remplir efficacement le but que s'est proposé l'inventeur.

Mais son analogie avec la soupape Barçon soulève une question de priorité dans laquelle l'administration n'a pas à intervenir.

Il y a donc lieu, par M. le Ministre des travaux publics, de faire à ce point de vue les réserves nécessaires, et il convient d'insérer le rapport précédent dans les *Annales des mines*, à la suite du rapport sur la soupape Barçon.

*L'Ingénieur en chef des mines, Rapporteur.*

Signé : MICHEL LÉVY.

**Avis de la Commission centrale des machines à vapeur.**

La Commission centrale, dans sa séance du 5 octobre 1886, après avoir entendu l'exposé, les observations et les conclusions qui précèdent et en avoir délibéré, a adopté l'avis proposé par le rapporteur.

## NOTE

SUR

## DEUX EXPLOSIONS DE CHAUDIÈRES A VAPEUR

AUX FORGES DE L'ADOUR (LANDES)

ET AU

PUITS MARSEILLE DE LA CONCESSION DE MONTRAMBERT  
(LOIRE)**I. Explosion des forges de l'Adour.**

Le 22 février 1886, un des générateurs de l'usine du Boucau a fait explosion; quatre hommes ont été tués et quatre blessés. Les dégâts matériels sont peu importants.

M. l'ingénieur des mines Beugey a rendu compte de l'accident.

*Description sommaire des lieux.* — La chaudière qui a fait explosion fait partie d'un groupe de trois générateurs situés dans le bâtiment des trains de laminoirs et chauffés chacun par les flammes perdues d'un four à réchauffer; elle est au milieu du groupe.

*Description de la chaudière.* — C'est une chaudière verticale, à quatre bouilleurs également verticaux, reliés au corps cylindrique par deux tubulures, l'une supé-

rieure, l'autre inférieure, se prolongeant hors de la maçonnerie et fermée par un bouchon de fonte portant lui-même un autoclave. C'est un de ces bouchons de fonte qui s'est brisé.

Les tôles sont garanties par des boucliers réfractaires, et les tubulures horizontales, qui supportent les bouilleurs, reposent elles-mêmes sur des voûtes en maçonnerie.

La hauteur totale du corps cylindrique est de 17 mètres.

Les tubulures horizontales en tôle s'y greffent à une hauteur telle que leur axe est à 3 mètres du sol. Elles ont un diamètre de 65 centimètres, une longueur de 1<sup>m</sup>,20, une épaisseur de 12 millimètres.

Les tampons en fonte, qui les bouchent, y pénètrent intérieurement sur 9 centimètres de longueur. La rivure en est faite à mi-distance, avec un demi-recouvrement de 45 millimètres; elle comprend une rangée circulaire simple de 36 rivets d'un diamètre de 21 millimètres, espacés d'axe en axe de 56<sup>mm</sup>,7.

L'épaisseur de la partie cylindrique du tampon de fonte, intéressée par la rivure, est de 30 millimètres.

*Origine. — Épreuves. — Entretien.* — Ces chaudières ont été construites par MM. Biétrex et C<sup>e</sup> à Saint-Étienne; éprouvé pour la première fois, le 27 juin 1883, pour une pression réglementaire de 5<sup>k</sup>,500, l'appareil qui a causé l'accident n'avait donné lieu à aucune observation. Aucune fuite ne s'était révélée pendant l'épreuve.

Les chaudières de l'usine sont très souvent nettoyées, piquées et goudronnées intérieurement. La dernière visite complète datait seulement du 4 janvier 1886, et en outre deux raclages extérieurs avaient été faits le 19 janvier et le 8 février.

*Appareils de sûreté.* — Les appareils de sûreté étaient au complet et en bon état de fonctionnement.

*Circonstances qui ont accompagné l'accident.* — Le 22 février, à six heures du soir, les équipes de nuit prirent le travail; vers sept heures et demie, on allait sortir les premiers lingots, quand un des tampons de la chaudière verticale n° 26, située au milieu des trois fours à réchauffer 25, 26, 27, fit explosion, et fut projeté derrière le four n° 25 où on l'a retrouvé en trois morceaux.

En même temps, la chaudière se vidait et les torrents d'eau chaude qui s'échappaient violemment par la tubulure débouchée, brûlaient mortellement quatre ouvriers occupés aux fours 25 et 26, et en blessaient grièvement quatre autres.

L'alimenteur-chef a aussitôt fermé les communications des chaudières 25 et 27, puis on a retiré les lingots, éteint les feux et vidé les chaudières.

*Examen des débris.* — Le bouchon en fonte s'est brisé circulairement au droit de la rivure qui le reliait à la tôle de la tubulure. Les rivets sont restés en place. La cassure de la fonte paraît uniformément fraîche et ne révèle aucun défaut apparent.

Mais la rivure a été faite dans des conditions telles qu'elle explique à elle seule l'accident. Sauf deux rivets diamétralement opposés, tous les autres ont été déviés et forcés, lors de la confection de la rivure, les trous forés dans la tôle et dans la fonte ne se correspondant absolument pas (Pl. VII, fig. 7). On a même dû singulièrement élargir les trous primitifs de la fonte; pour plusieurs d'entre eux, cet élargissement correspond à 50 p. 100 du diamètre primitif.

*Causes de l'accident.* — C'est donc à cette malfaçon évidente que M. l'ingénieur Beaughey rapporte l'accident

du 22 février; il fait observer que toutes les dépositions confirment que cet accident s'est produit en marche normale avec une alimentation suffisante et sans aucun excès de pression.

Le 20 février, une légère fuite s'était produite entre deux rivets du bouchon qui a sauté le 22; cette fuite avait été matée; peut-être indique-t-elle le point faible par où la brisure définitive a commencé à se produire.

*L'Ingénieur en chef des mines, Rapporteur.*

Signé : MICHEL LÉVY.

L'avis de la Commission centrale a été le suivant :

L'explosion du 22 février 1886 est due à la rupture d'un fond en fonte, rivé sur une tubulure latérale, d'un générateur à corps cylindrique vertical.

La cause de cet accident est à rapporter à une mal-façon dans la rivure qui réunissait le fond à la tubulure.

## II. Explosion du puits Marseille.

Le 14 août 1886, une chaudière à vapeur a fait explosion au puits Marseille, de la concession de Montrambert. Un ouvrier a été assez grièvement blessé; les dégâts matériels sont peu importants.

M. l'ingénieur des mines Tauzin a rendu compte de cette explosion.

*Description sommaire des lieux.* — Les générateurs du puits Marseille, au nombre de cinq, ont leur massif de maçonnerie à ciel ouvert, à demi-enterré, au pied du bâtiment qui contient la machine d'extraction. C'est la chaudière n° 2 de ce massif, située à peu de distance du mur du bâtiment et parallèle à ce dernier qui a fait explosion.

*Description de la chaudière.* — Elle est horizontale avec un seul bouilleur-réchauffeur latéral. Le corps principal d'une longueur de 12 mètres et d'un diamètre de 1<sup>m</sup>,30 est relié au réchauffeur par deux larges cuissards. Ce dernier, d'une longueur de 12 mètres et d'un diamètre de 1 mètre, reçoit l'alimentation à son extrémité antérieure. Il est fermé à l'avant par un gros bouchon en fonte portant le trou d'homme et sur lequel est rivée la tôle; c'est ce bouchon qui s'est brisé. Les dimensions constitutives de sa rivure (Pl. VII, fig. 8, 9) sont les suivantes :

Espacement entre deux rivets. . . . .	32 <sup>mm</sup>
Diamètre des rivets. . . . .	22
Épaisseur de la fonte. . . . .	45
— de la tôle . . . . .	11
Recouvrement. { Tôle à partir de l'axe des rivets. .	40
{ Fonte — — . . .	60

*Origine. — Épreuves. — Entretien.* — Le corps principal date de 1870; quant au bouilleur-réchauffeur, il a été construit et mis en place en avril 1886 par MM. Broyet et Delord, constructeurs à la Montat (Saint-Étienne), qui ont l'entreprise des réparations et de l'entretien des chaudières de la compagnie de Montrambert.

L'épreuve réglementaire a eu lieu le 22 avril 1886. Il convient de rappeler ici que la compagnie de Montrambert, à la suite d'un accident de chaudière survenu en 1885, s'est adressée à l'Association lyonnaise des propriétaires d'appareils à vapeur, dont les agents ont passé leur visite le 8 mars et le 8 avril 1886, avant la mise en place du nouveau réchauffeur.

*Circonstances qui ont accompagné l'accident.* — Le 14 août 1886, à 4 h. 50 du soir, le bouchon de fonte du réchauffeur a été violemment projeté, entraînant le tuyau d'alimentation, le contrepoids du registre et épar-

pillant les outils des chauffeurs dans toutes les directions. Des briques ont été projetées à 90 mètres de distance; quant au bouchon en fonte, il est venu heurter, à 4<sup>m</sup>,70, le mur du quai et est retombé le fond en bas.

Plusieurs ouvriers ont été renversés; un seul a reçu des brûlures assez graves, il est actuellement à peu près guéri.

La ligne de rupture de la fonte a suivi rigoureusement celle des rivets qui la fixaient sur la tôle, sur 2<sup>m</sup>,34 de développement (*fig. 8, 9*); sur les 0<sup>m</sup>,57 restants, elle est en pleine fonte (*fig. 8, 10*).

L'examen de la cassure permet immédiatement de fixer la cause de l'accident; sur le flanc gauche du bouchon de *a* en *b* (*fig. 8*), il existait une ancienne cassure s'étendant sur l'espace compris entre 21 rivets, et intéressant près de la moitié de la circonférence. La présence, sur le grain de la fonte, d'une couche terreuse ayant absolument le même aspect que le dépôt produit sur les parois intérieures du bouilleur, ne permet aucun doute à cet égard.

La fissure se propageait au delà, de *b* vers *d*, et intéressait encore 15 rivets, mais elle était plus serrée et sa trace ne peut être suivie que par la couleur noirâtre de la cassure.

Enfin, sur un peu plus du quart de la circonférence, de *c* en *d*, la cassure était nette et brillante.

Une pareille fissure devait donner naissance à des fuites; mais comme elles se produisaient à l'intérieur des carneaux, on ne les a pas découvertes. Cependant, le jour de l'accident, vers huit heures du matin, le chauffeur remarqua que la murette antérieure du bouilleur était mouillée; il enfonça même une brique pour se rendre compte de l'origine de cette fuite, mais ne poussa pas plus loin ses investigations.

Le soir, vers trois heures, l'humidité du mur s'accen-

tuant, il découvrit une fuite sur le côté gauche du bouchon; le chaudronnier fut appelé et mata la tôle, puis on ne s'occupa plus de cet incident jusqu'au moment de l'explosion.

Précisément au point où cette fuite avait été remarquée, M. Tauzin a constaté que la cassure était bulleuse et scoriacée (*x, fig. 8*).

Mais il rapporte surtout la fissure préexistante à la façon dont le bouchon de fonte a été coulé, et dont la rivure a été faite.

Il a pu constater que le moule de ce bouchon portait de petits noyaux de terre destinés à faire venir de fonte les trous des rivets; cette couronne, située à la partie supérieure du moule retient les traces de scorie que le fondeur laisse passer par inadvertance. Dès lors, cette scorie vient se loger dans l'espace de grillage formé par les noyaux de terre, et y reste engagée.

De plus, il est fort difficile, avec de pareilles pièces, de faire correspondre exactement les trous venus de fonte et ceux qui sont forés dans la tôle. On se sert alors d'une sorte de broche en acier, formant fuseau, qu'on enfonce de force pour amener la correspondance des trous. La tôle peut à la rigueur s'étirer; mais la fonte casse et l'on ne s'aperçoit pas toujours de sa rupture. Il est donc nécessaire de prohiber absolument le travail à la broche, et de se servir de l'alésoir.

M. Tauzin a constaté que les ouvriers de MM. Broyet et Delord se sont servis, dans l'espace, de la broche: les bords de certains trous sont en effet rugueux, et la tôle déborde dans les irrégularités des trous de la fonte.

*L'Ingénieur en chef des mines, Rapporteur.*

Signé: MICHEL LÉVY.

L'avis de la Commission centrale a été le suivant:

1° L'explosion du 14 août 1886 est due à la rupture d'un fond en fonte, rivé sur un bouilleur-réchauffeur. La cause de cet accident est à rapporter à une malfaçon de la rivure qui réunissait le fond en fonte au réchauffeur. Le diamètre de ce fond (1 mètre) était en outre exagéré.

La pratique qui consiste à faire venir de fonte les trous de la rivure et l'emploi exclusif de la broche, à défaut de l'alésoir, constituent des négligences susceptibles de suites dangereuses. Cette malfaçon engage la responsabilité du constructeur.

2° Il convient d'insérer, dans les *Annales des mines*, des extraits des rapports présentés à la Commission centrale des machines à vapeur au sujet des accidents survenus, les 22 février et 14 août 1886, dans les forges de l'Adour et au puits Marseille de la compagnie de Montrambert, pour mettre les constructeurs en garde contre les inconvénients de l'emploi de la broche dans la façon des rivures entre tôle et fonte.

## NOTE

SUR UN

SYSTÈME DE RALLUMAGE INTÉRIEUR  
DES LAMPES DE SURETÉ

Par M. L. JANET, ingénieur des mines.

Les explosions de grisou dans les mines sont souvent dues à l'imprudence des ouvriers, et une des causes qui suscitent cette imprudence est l'extinction très fréquente des lampes de sûreté dans les travaux.

Le mineur, privé de lumière par l'extinction de sa lampe, est généralement forcé d'aller lui-même, à un point souvent éloigné, prendre une lampe allumée en échange de la sienne, auprès du surveillant ou gamin préposé à ce service, ou même, si l'organisation de la mine ne comporte pas un agent de cette espèce, de se rendre jusqu'à l'accrochage pour faire rallumer sa lampe.

Dans cette situation, et bien qu'il ne le fasse souvent qu'avec crainte, il se décide, pour éviter une grande perte de temps, à ouvrir sa lampe, qui, souvent, n'est malheureusement munie que d'une fermeture dérisoire, et à la rallumer, soit en ouvrant celle d'un de ses compagnons de travail, soit simplement avec des allumettes.

Aussi, depuis longtemps, la question de la fermeture des lampes de sûreté préoccupe-t-elle les constructeurs. Il s'est établi une sorte de lutte entre la sagacité de l'inventeur et l'obstination fatale et trop habile de l'ouvrier, qui parvient souvent, au bout de peu de temps, à déjouer

les efforts qui sont faits pour sa préservation. Cependant, sans vouloir prétendre que la question soit entièrement résolue, on est maintenant en possession de plusieurs bons dispositifs, parmi lesquels nous citerons notamment le système électro-magnétique Villiers, employé à Saint-Étienne, et le système hydraulique ou pneumatique Cuvelier et Catrice, adopté par diverses mines du Nord et du Pas-de-Calais.

Mais si l'impossibilité absolue pour l'ouvrier d'ouvrir sa lampe est évidemment une grande garantie contre les explosions de grisou, elle n'est pas sans entraîner quelques inconvénients. C'est d'abord la perte de temps qu'occasionne le voyage jusqu'au poste où se trouvent les lampes de rechange; il est arrivé en outre quelquefois que, dans ce trajet, des ouvriers privés de feu, et connaissant insuffisamment la disposition des lieux, sont tombés dans des plans inclinés, ou dans des puits intérieurs, dont on avait, par mégarde, négligé de fermer la barrière protectrice.

L'idéal serait donc d'avoir une lampe dont l'ouverture fût absolument impossible aux ouvriers, mais qui fût en même temps munie d'un dispositif permettant de la rallumer sans l'ouvrir. C'est cette dernière lacune qu'a essayé de combler un ingénieur français, M. Catrice, habitant actuellement Péruwelz (Belgique), et déjà connu pour la fermeture hydraulique qu'il avait imaginée en collaboration avec M. Cuvelier.

Il est certain qu'un bon système de rallumage intérieur serait accepté volontiers par les exploitants; car outre qu'il couvrirait leur responsabilité en cas d'accident, il leur procurerait une réelle économie: 1° par la diminution du matériel lampes (les lampes de rechange étant supprimées) et la moindre quantité d'huile qui serait consommée; 2° par la suppression des gardiens et porteurs de lampes de rechange; et au besoin, 3° par

l'allumage par l'ouvrier lui-même de sa lampe, lorsqu'elle lui serait remise à la lampisterie. Ces économies peuvent couvrir en très peu de temps la dépense occasionnée par l'emploi de l'appareil Catrice, qui s'adapte aisément à toutes les variétés de lampes et dont le prix est relativement peu élevé (\*).

Cette question si intéressante du rallumage intérieur ne paraît pas avoir assez attiré l'attention des inventeurs. Nous avons seulement eu connaissance d'un système dû au docteur Wolff, sur lequel nous nous sommes efforcé récemment d'attirer l'attention, et qui se trouve décrit dans une communication de M. Haton de la Goupillière à la Société d'encouragement (séance du 26 février 1886), communication reproduite dans les comptes rendus mensuels de la Société de l'industrie minière.

Malheureusement ce système n'est applicable qu'à des lampes utilisant une huile minérale volatile (la benzine par exemple) pour leur alimentation. Les Allemands ne reculent pas devant cette mesure, et la lampe Wolff est actuellement employée dans plusieurs mines de Saxe et de Westphalie; mais nous pensons, néanmoins, que l'emploi de la benzine, étant une cause permanente d'accidents et d'explosions (il s'en est du reste déjà produit), en rendra l'usage très restreint.

L'appareil de rallumage intérieur, dû à M. Catrice, se compose d'une gaine A en laiton, de 20 millimètres de diamètre et 25 millimètres de hauteur environ (Pl. VII, fig. 11 à 13). Cette gaine est soudée sur une rondelle B, sur laquelle est fixé par un rivet C un obturateur P. Cet obturateur se referme circulairement sur la rondelle B, et s'arrête au taquet D, qui le maintient contre la rondelle.

(\*) D'après les renseignements que nous a fournis M. Catrice lui-même, le prix demandé pour munir une lampe quelconque de l'appareil de rallumage serait seulement de deux francs.

Sur l'obturateur se trouve un mamelon E, percé d'une ouverture F, par où l'on fait fonctionner l'appareil; une petite surélévation G, indique le côté correspondant au tube de sortie, et un petit logement *k* est destiné à recevoir le verrou qui maintient l'obturateur fermé. Sur la couverture supérieure de la gaine est disposé un tube carré L, en fer-blanc, qui correspond avec l'intérieur de la gaine par une ouverture circulaire d'environ 3 millimètres de diamètre.

Dans le tube L se trouve un ressort R, serré par le bas contre une des parois du tube. Ce ressort, qui est plat, porte à sa partie supérieure une espèce de râpe, faisant face à une des parois du tube L, également en forme de râpe.

Le long de l'appareil se trouve un petit tube H, destiné à recevoir un fort fil de fer S, faisant office de verrou, pour maintenir l'obturateur fermé.

La pièce T, est un petit barillet, semblable à celui d'un revolver, et entrant à frottement doux sur toutes ses faces. Les huit canons S sont destinés à recevoir de petites allumettes, d'environ 20 millimètres de longueur, et dont la tête doit être facilement inflammable.

Voici comment s'opère le fonctionnement de l'appareil:

La lampe étant ouverte, on lève le verrou de quelques millimètres, on tourne l'obturateur, et on retire le barillet que l'on garnit de porte-feu. On le replace dans sa gaine, puis on ferme l'obturateur, en repoussant le verrou. La lampe est prête.

La lumière F pratiquée dans le mamelon de l'obturateur laissant deux canons du barillet à découvert, on introduit légèrement un poinçon dans un des canons, et on l'amène du côté de la saillie, en face du tube de sortie. On pousse alors vivement le poinçon dans toute sa longueur. Dans ce moment on chasse le porte-feu, qui, passant entre les deux parties rugueuses formées par le ressort et un des

côtés du tube, sort enflammé, et allume la mèche placée à côté de lui.

L'appareil fonctionne généralement bien; cependant on observe quelques ratés dus à une qualité défectueuse des porte-feu. En outre, pour certaines lampes, par exemple pour les types Mueseler et Marsaut, le dégagement des gaz produits par l'inflammation du porte-feu n'est pas assez rapide, et l'allumette s'éteint parfois, avant d'avoir communiqué le feu à la mèche. On peut éviter cet inconvénient, au moins pour la lampe Mueseler, en soufflant vivement (\*) sur le tamis, lors de l'inflammation du porte-feu, afin d'aider à l'évacuation des gaz. M. Catrice étudie d'ailleurs, pour la tête des porte-feu, diverses compositions chimiques facilement inflammables, et donnant une quantité de gaz assez faible pour que ces faits ne se produisent plus.

Voici maintenant les principales objections qui nous semblent pouvoir être faites à ce système :

1° Le rallumage de la lampe exige un poinçon particulier, c'est-à-dire une pièce séparée. Il pourra arriver que l'ouvrier le perde, ou ne l'ait pas sous la main, au moment où il en aura besoin. Cet inconvénient nous semble bien peu grave, car il lui suffira d'emprunter le poinçon d'un de ses compagnons; nous ajouterons que rien n'empêcherait de disposer, sur la partie extérieure de la lampe, deux petits anneaux destinés à recevoir ce poinçon qui dès lors devrait être porté en même temps que la lampe.

2° Comme la lumière pratiquée dans le mamelon de l'obturateur laisse à découvert deux canons du barillet, on pourrait craindre que les ouvriers ne réussissent à extraire quelques-unes des allumettes, et ne s'en servent

(\*) Il est vrai que ce procédé n'est pas très recommandable, car en opérant ainsi on pourrait peut-être faire sortir la flamme du tamis.

ensuite, par exemple pour allumer leur pipe, dans les travaux grisouteux; mais nous ferons observer que, s'il est toujours défendu aux mineurs d'avoir des allumettes sur eux, il n'est pas bien difficile d'enfreindre cette défense. Il faut encore ajouter que la tête saillante des porte-feu, paraît s'opposer à ce qu'on puisse les extraire sans ouvrir la lampe.

3° Le petit tube où s'enflamme l'allumette doit être l'objet d'une attention spéciale; car il constitue une communication de l'intérieur avec l'extérieur, et on peut se demander s'il ne pourrait pas servir à transmettre au dehors une inflammation de grisou qui se ferait dans l'intérieur de la lampe.

La question est analogue à celle qui se présente dans toutes les lampes, pour le petit tube servant de passage à la mouchette.

D'une communication faite par M. Haton de la Goupillière à la Société d'encouragement (3<sup>e</sup> série, XI) il résulterait que des tubes-mouchettes de 4 à 5 millimètres enflamment nettement une atmosphère grisouteuse.

MM. Mallard et Le Chatelier ont indiqué, de leur côté, un diamètre de 0<sup>m</sup>,0032 comme limite de propagation.

Dans le cas qui nous occupe, le tube de communication ayant un diamètre de 0<sup>m</sup>,003, il nous a paru utile de faire un certain nombre d'essais directs dans le laboratoire de la Compagnie d'Anzin (\*), que celle-ci a bien voulu mettre à notre disposition.

Dans les premiers modèles construits par M. Catrice, l'obturateur V n'existait pas, en sorte que la communication était libre, lorsqu'il n'y avait pas d'allumette. C'est avec ce type, offrant évidemment le maximum de danger, que nous avons fait les premières expériences.

(\*) Ces expériences ont été préparées et surveillées dans le détail par M. Legrand, attaché au service du bureau central de la Compagnie des mines d'Anzin.

Avec des proportions de gaz d'éclairage variant de 0 à 8 p. 100, les phénomènes habituellement observés dans la lampe ordinaire ne paraissent pas modifiés.

Avec des proportions de 8 à 12 p. 100, les phénomènes ne sont pas encore sensiblement modifiés. On remarque seulement que l'auréole se produisant autour de la flamme, avant que celle-ci soit éteinte, semble grossie un peu du côté du tube porte-allumette.

Avec des proportions variant de 12 à 25 p. 100, la flamme de la mèche s'éteint presque instantanément, et le mélange continue de brûler en haut du tamis (c'est ce qu'on observe habituellement dans la lampe ordinaire); seulement, on remarque en outre que le mélange gazeux s'introduit dans l'intérieur du verre par le tube porte-allumette, s'enflamme en haut de ce tube en arrivant au contact de la flamme de la lampe, et continue de brûler pendant environ 15 secondes après l'extinction de celle-ci.

Avec une proportion de 30 p. 100 de gaz d'éclairage, l'inflammation s'est propagée à l'extérieur, et il s'est produit une violente détonation brisant la cage vitrée dans laquelle la lampe était placée.

Ces divers essais ont été faits dans un milieu tranquille et sur une lampe au repos; peut-être le danger serait-il encore plus grand, si la lampe était agitée, et exposée à un courant explosible.

Nous avons fait ensuite une série d'expériences en garnissant le tube d'une allumette, puis en prenant une autre lampe munie de l'obturateur V, qui obstrue en grande partie l'orifice supérieur du tube porte-allumette. L'inflammation dont nous avons parlé plus haut ne s'est pas produite d'une manière bien nette, et, dans tous les cas, elle ne s'est jamais transmise à l'extérieur.

Nous arrivons donc à cette conclusion que, lorsque le ressort R présente un obturateur V bouchant à peu près complètement l'ouverture, la communication établie avec

l'extérieur ne paraît pas dangereuse. Il faut en outre observer que, dans la pratique, la partie non brûlée du porte-feu reste engagée entre le ressort et l'extrémité du tube, et sert ainsi à compléter l'obturation entre l'intérieur et l'extérieur de la lampe.

Il nous reste enfin à dire un mot d'un point délicat, qui ne rentre pas dans le domaine technique, mais qui néanmoins a son importance. Diverses grandes compagnies de mines, dans le Nord et le Pas-de-Calais, se sont montrées disposées à mettre à l'essai ce système; mais les études ont été jusqu'à présent entravées par la question de la fabrication des porte-feu, la Compagnie des allumettes chimiques possédant un monopole en France. Bien que ces porte-feu, en raison de leur faible longueur, ne puissent guère servir qu'à l'usage spécial auquel ils sont destinés et dès lors ne soient pas à proprement parler des allumettes, l'intervention de la Compagnie nous semble indispensable. Or, jusqu'à présent, celle-ci a refusé toutes les propositions qui lui ont été faites.

Il est permis d'espérer toutefois que cette petite difficulté pourra être levée, et que la Compagnie consentira par exemple à laisser fabriquer ou importer en France une certaine quantité de porte-feu, sur lesquels elle prélèverait les droits qu'elle jugerait convenables (\*).

En résumé, nous ne voulons pas juger dès à présent la valeur du système *Catrice*, qui ne pourra être connue qu'après une longue pratique; mais nous estimons qu'il constitue au moins un essai très intéressant, susceptible d'attirer l'attention des exploitants sur la question si délicate du rallumage intérieur des lampes de sûreté.

(\*) Depuis, nous avons appris que la Compagnie des allumettes avait obtenu de M. le Ministre des Finances l'autorisation d'importer, à titre d'essai, 100.000 porte-feu, destinés aux essais d'allumage *Catrice*.

## EXPÉRIENCES SYNTHÉTIQUES SUR L'ABRASION

Par M. THOULET,

Professeur à la Faculté des sciences de Nancy.

Les poussières, les sables que le vent chasse et qui, en certaines régions du globe, viennent recouvrir le sol sous leur masse accumulée, constituent un agent géologique d'une grande importance. Le *lœss* de la Chine qui s'étend sur le bassin de Hoang-Ho en une couche de plus de 500 mètres d'épaisseur est, d'après M. de Richthofen, une formation éolienne; il en est de même de la nappe de sables très fins que le voyageur russe *Prévalsky* a vue dans le *Ferghanah* et dans certaines parties du *Bokhara* s'avancer en renversant tout sur son passage avec une vitesse dépassant 14 mètres par an; M. *Virlet d'Aoust* a signalé l'existence de semblables dépôts au Mexique; en France, M. *Alluard* est d'avis que le temple de *Mercury*, retrouvé au sommet du *Puy-de-Dôme*, a été enseveli sous des alluvions atmosphériques et il attribue la fertilité constante de la *Limagne d'Auvergne* au transport annuel de poussières par une sorte de colmatage naturel s'effectuant par l'intermédiaire de l'air.

Le sable chassé violemment contre les roches exposées à son action les use; chaque grain, transformé en projectile, heurte la pierre, homogène ou clastique, en écrase un fragment très petit, le pulvérise, et comme le phéno-

même se répète indéfiniment, les éléments de la roche ne tardent pas à se projeter en relief, à être ébranlés dans leur alvéole et ils finissent par tomber à l'état de sable pour devenir alors actifs à leur tour et contribuer à user d'autres roches massives. C'est ainsi que se produisent les sculptures naturelles désignées quelquefois sous le nom de blocs perchés et qui, possédant une sorte de tête plus ou moins globuleuse reposant sur une base amincie, imitent grossièrement la forme d'un champignon. Ces blocs ont été reconnus et décrits dans une foule de localités, et particulièrement en Californie et dans le Colorado, par MM. Blake, Newberry et Gilbert; dans le Sahara, par M. Rolland; dans le centre de l'Afrique, par M. Schweinfurth; dans la vallée de Iagnaous (Kokistan), près d'Anzob, où M. Prévally cite des colonnes d'érosion de 10 mètres de hauteur surmontées chacune d'une grosse pierre.

Les sables ne laissent pas toujours des marques de leur action aussi nettes que celles qui s'aperçoivent sur les blocs perchés; le plus souvent toute trace semble même disparaître puisque les débris sont enlevés à mesure qu'ils se produisent. Néanmoins de sérieuses modifications du relief du sol ont eu lieu; il ne sera possible de s'en rendre compte qu'en agissant par synthèse, en reproduisant artificiellement le phénomène et en cherchant à mesurer son intensité dans des conditions diverses. Tel est le but que je me suis proposé dans les expériences qui suivent et pour lesquelles j'ai été aidé avec beaucoup de zèle et d'intelligence par M. Chevallier, préparateur de minéralogie à la faculté des sciences de Nancy, auquel je suis heureux d'adresser ici tous mes remerciements.

Lorsque des grains de sable chassés par l'air en mouvement viennent frapper les roches, ils produisent à la surface de celles-ci une usure que nous désignerons sous le nom d'*abrasion*. La langue française d'usage commun

ou même scientifique est pauvre en termes destinés à indiquer l'action destructive des divers agents atmosphériques sur les roches. Il en est tout autrement pour la langue anglaise qui possède les mots *abrasion*, *erosion*, et aussi le verbe *to weather* qui « exprime le résultat général de toutes les variétés d'actions météoriques sur la portion superficielle des roches (\*). En français, nous ne possédons que les termes *destruction*, *usure*, *érosion*, qui sont loin d'avoir la précision des termes anglais. Quoi qu'il en soit, et suivant l'exemple de Dana, nous adopterons le terme *abrasion* pour exprimer spécialement l'action usante mécanique produite par l'air agissant comme véhicule de particules solides, réservant le mot *érosion* pour indiquer cette même action d'usure mécanique lorsqu'elle est causée par tout autre agent, eau, frottement mutuel des roches entre elles, frottement au fond des glaciers, etc. Son origine latine, *abradere* lui donne le droit de devenir français et de remplacer dans ce cas particulier le mot *usure* dont l'acception est beaucoup trop générale pour le sujet de ce travail.

Les effets de l'abrasion atteignent leur maximum d'intensité dans les contrées sablonneuses telles que les déserts de l'Afrique, de l'Asie et de l'Amérique; cependant, on les observe aussi le long des côtes maritimes partout où l'existence d'une plage en même temps que de roches non protégées vient fournir au phénomène les moyens de s'accomplir; il est probable que cette action est beaucoup plus générale qu'on ne serait porté à le croire et les innombrables poussières minérales sans cesse en suspension dans l'atmosphère doivent exercer une abrasion sur les murs des édifices et partout où des matériaux solides et résistants se trouvent à découvert. J'ai vu les vitres des cabines de bains de mer complètement dépolies après

(\*) Geikie, *Text-book of geology*, p. 349.

un ouragan; Dana (\*) a depuis longtemps observé le même fait sur les maisons du cap Cod, aux États-Unis, et l'on cite encore à ce propos les habitations de l'île de Sylt dans la mer du Nord (\*\*).

L'abrasion a même reçu un emploi industriel. M. Tilghmann (\*\*\*) s'est, le premier, servi d'un jet de sable projeté directement ou entraîné par un fluide en pression tel que l'air ou la vapeur d'eau, pour user et perforer les roches les plus dures. Dans des expériences faites en employant de la vapeur à 7 atmosphères, les roches étant placées à 25 millimètres du jet de sable quartzeux s'échappant d'une sorte d'injecteur, l'abrasion a atteint, par minute

24,58	centimètres cubes	pour le granite,
49,17	—	pour le marbre,
163,9	—	pour le grès tendre.

Avec de la vapeur à 20<sup>atm</sup>, 5, M. Tilghmann est parvenu à percer en 25 minutes un trou de 37 millimètres de diamètre dans une plaque de corindon, ayant 37 millimètres d'épaisseur.

On a récemment employé le même procédé pour exécuter divers travaux industriels, entre autres pour percer des vitres destinées à faciliter la ventilation; on a imaginé dans ce but plusieurs appareils dont on trouvera la description dans les ouvrages spéciaux (\*\*\*\*).

Le phénomène m'a semblé pouvoir être soumis à des mesures directes. En attribuant à chaque échantillon de roche ou de matière résistante quelconque expérimentée un coefficient numérique d'abrasion, on se rendra mieux

(\*) Dana, *Manual of geology*, p. 631.

(\*\*) De Lapparent, *Traité de géologie*, p. 138.

(\*\*\*) *Revue de géologie*, IX, 16, 1870-71.

(\*\*\*\*) Appareil Hervé-Mangon, appareil Mathewson, *Nature*, 7 juillet 1877; 6 février 1886.

compte de la façon dont cette roche cède à une action analogue à celle qui s'accomplit dans la nature. Il suffira pour cela d'employer comme matière usante un corps homogène assez commun pour être aisément retrouvé, de le faire agir d'une manière parfaitement déterminée, de procéder par pesées et enfin, dans chaque expérience, de ne modifier à la fois qu'une seule des diverses variables du phénomène.

Le quartz cristallisé limpide du Brésil ou de Madagascar, concassé et tamisé à travers deux tamis à trous ronds calibrés, répond à ces conditions. Les grains sont chassés par un courant d'air sous une pression déterminée contre la plaque de roche placée à une distance connue de l'ouverture du tube qui amène le jet. Après que celle-ci a subi le choc d'un certain poids de grains de quartz, on mesure sa perte de poids et, quelle que soit la quantité de poudre employée, on ramène par le calcul à la perte de poids qui aurait été subie sous l'action d'un même poids de quartz, 25 grammes, par exemple. Rien n'empêche, d'ailleurs, de faire varier à volonté et isolément l'une quelconque des conditions de l'expérience, la pression, le poids, la grosseur et la nature des grains de sable, l'inclinaison de la plaque, la quantité d'humidité qui l'imbibé et d'étudier les changements éprouvés dans chaque cas par l'abrasion.

#### DESCRIPTION DE L'APPAREIL.

L'appareil employé pour ces recherches et ces mesures se compose d'une pompe A (*fig. 1*, Pl. VIII) avec son réservoir B et son manomètre C, du magasin à sable DE, de la boîte F et des flacons collecteurs H.

La pompe, le réservoir d'air et le manomètre à mercure ne présentent aucune disposition particulière.

Le magasin à sable se compose de deux parties. Un

entonnoir en verre à robinet D fermé par un bouchon en caoutchouc reçoit le quartz pulvérisé. Le robinet *t* permet de commencer ou d'arrêter l'opération au moment convenable. Le sable descend par un tube de caoutchouc *mn* dans le réservoir en fer-blanc E, qui a la forme d'un tronc de cône muni d'un tube latéral soudé et fermé à sa base la plus large par un bouchon solidement mastiqué et traversé par un tube en verre *p* se raccordant par l'intermédiaire du tube en caoutchouc *pq* avec le réservoir d'air B. Le tube de verre *p* se recourbe dans l'intérieur de E de façon à ce que le courant d'air qu'il amène vienne se briser contre la base du cône et s'éparpiller dans toute la capacité du récipient sans qu'aucun grain de sable puisse se soustraire à l'action du vent. Tous les grains sont ainsi chassés dans un tube de verre qui se raccorde avec un tube de caoutchouc et ils pénètrent par un nouveau tube en verre *s* dans l'intérieur de la boîte F. L'ensemble est porté par un support dont les diverses parties sont assez mobiles pour que l'ajustement en soit facile.

La boîte en bois (*fig. 2 et 3*) présente dans sa portion supérieure la forme d'un parallépipède terminé inférieurement en tronc de pyramide. L'orifice supérieur se ferme avec une vitre mobile *hh* reposant sur un coussinet quadrangulaire *gg* et sur laquelle on dépose une grosse masse de plomb *k*; une soupape *l* permet de soutirer le sable après chaque expérience. La paroi antérieure est munie d'une glace à travers laquelle on distingue l'intérieur; la paroi de droite est percée d'une double ouverture, l'une d'elles laisse passer à frottement doux la tige métallique *b* qui porte une plaque de liège *f* et une aiguille *e* qui règle l'écartement mutuel de l'orifice par lequel sort le jet de sable et de la plaque minérale à user *d*, l'autre donne accès au tube de verre *sr* par lequel s'échappe le jet. En face, la paroi de gauche est traver-

sée à frottement doux par la tige métallique *a* à l'extrémité de laquelle se visse ou se dévisse à volonté une plaque en laiton *c* qui est ainsi maintenue verticale. La plaque *c* reçoit la plaque de roche soumise à l'expérience et qui est fixée par quatre ou deux pinces à vis *ii*. Les plaques sont taillées plan-parallèles et l'on parvient aisément à les mettre de niveau en les calant avec des feuilles de liège ou de carton. Enfin la paroi postérieure de la boîte livre passage par deux ouvertures assez larges à deux gros tubes de verre communiquant par un raccord en caoutchouc *v* avec deux autres tubes descendant presque jusqu'au fond des flacons de verre HH. C'est là que se rassemblent les poussières résultant de l'abrasion de la roche et des grains de sable entre eux. Le courant d'air s'amortit par suite du vaste volume des flacons et finit par s'échapper dans l'atmosphère par les six tubes  $\alpha, \alpha', \beta, \beta', \gamma, \gamma'$  dont les ouvertures supérieures sont fermées par une fine batiste serrée avec un anneau en caoutchouc.

La boîte est supportée par quatre pieds tournés.

L'appareil étant ainsi disposé, l'expérience s'exécute de la manière suivante :

On manœuvre la pompe jusqu'à ce que l'air du réservoir ait atteint une pression déterminée et marquée par la hauteur de la colonne mercurielle dans le manomètre. Le robinet *w* est resté fermé. On a préalablement pesé une certaine quantité de quartz pulvérisé qui, le robinet *t* étant fermé, est versée dans l'entonnoir D; le bouchon de caoutchouc est alors solidement enfoncé. La plaque *d* exactement pesée est serrée contre la plaque *c* avec les vis *i*, vissée sur la tige *a* et approchée à la distance convenable de l'orifice du jet. On recouvre avec la vitre *h* soutenue par le coussinet et maintenue par la masse pesante *k*. On ouvre ensuite le robinet *w*, tandis qu'un aide tourne la roue d'un mouvement très régulier et suffisam-

ment rapide pour que le niveau du mercure du manomètre atteigne une hauteur déterminée et y demeure d'une façon permanente. Aussitôt que cette constance est obtenue, on ouvre le robinet *t*; le sable s'écoule, il est entraîné par le vent et vient frapper la lame *d*, puis se rassembler soit au fond de la boîte soit dans les deux flacons collecteurs. Pour arrêter l'expérience, il suffit de fermer le robinet *w*. On dévisse la plaque de roche, on évalue par une pesée sa perte de poids, on recueille le sable employé, on le pèse, on retranche du poids trouvé la perte de poids subie par la roche et on ramène par le calcul cette perte à ce qu'elle aurait été pour un poids constant de sable, 25 grammes, par exemple.

Nous allons maintenant étudier successivement l'influence exercée par chacune des variables suivantes :

- I. Quantité de sable projeté.
- II. Distance de la roche à l'ouverture du tube d'arrivée du jet de sable.
- III. Dimensions des grains de sable insufflés.
- IV. Nature des grains de sable insufflés.
- V. Pression du vent.
- VI. Inclinaison de la plaque de roche par rapport à la direction du jet de sable.
- VII. Nature de la plaque abrasée.
- VIII. Humidité de la plaque abrasée.

#### I. QUANTITÉ DE SABLE PROJETÉ.

Il était à présumer que l'abrasion produite serait directement proportionnelle à la quantité de sable projeté; il convenait néanmoins d'effectuer cette mesure non seulement dans le but d'affirmer la loi, mais encore dans celui de connaître le degré de précision du procédé expérimental.

Les expériences ont été faites sur des séries de plaques en verre coupées dans la même feuille; la moitié de ces plaques a été conservée avec son poli, les autres ont été dépolies en les frottant avec de l'émeri et de l'eau sur une lame de glace. Elles étaient placées à la distance constante de 1,5 centimètres de l'orifice des deux tubes par lesquels arrivait le double jet de sable sous une pression constante de 16 centimètres de mercure. Ces expériences sont les seules où j'aie fait usage d'un double jet de sable; pour toutes les autres, je n'ai employé qu'un seul jet. Le quartz était versé dans l'entonnoir à robinet qu'on ouvrait au moment où la pression était atteinte par une vitesse convenable donnée à la roue de la pompe. Après chaque expérience, le sable était recueilli et pesé et l'on rapportait par le calcul la perte de poids réelle subie par la lame de verre à ce qu'elle aurait été si le poids de sable eût été exactement de 25, 50, 75, 100 et 150 gr. Du reste, ce poids pesé directement différait très peu du poids fictif servant à calculer la réduction. Des expériences préliminaires ont permis de constater qu'il était indispensable, dans le cours d'une opération, de laisser toujours ouvert en grand le robinet *w* permettant à l'air de sortir du réservoir B et qu'il ne fallait pas chercher à régler la pression en ouvrant ou fermant ce robinet et en se guidant sur la hauteur du mercure dans le manomètre.

Les résultats obtenus sont inscrits dans les tableaux suivants :

PLAQUES POLIES					PLAQUES DÉPOLIES				
POIDS réel du quartz insufflé	PERTE de poids réelle subie par la plaque	POIDS réduit du quartz insufflé	PERTE de poids réduite	MOYENNE	POIDS réel du quartz insufflé	PERTE de poids réelle subie par la plaque	POIDS réduit du quartz insufflé	PERTE de poids réduite	MOYENNE
25,0	9,7	25,0	9,7	9,8	25,0	11,9	25,0	11,9	11,9
25,0	10,0	"	10,0		25,0	12,0	"	12,0	
24,5	9,2	"	9,4		25,0	12,0	"	12,0	
25,5	10,3	"	10,1	18,7	25,5	12,1	"	11,9	21,1
50,0	19,0	50,0	19,0		50,0	20,4	50,0	20,4	
49,5	18,5	"	18,7		50,0	22,6	"	21,5	
50,7	19,3	"	19,0	26,6	50,0	21,0	"	21,0	29,7
50,0	18,3	"	18,3		50,0	21,6	"	21,6	
75,0	25,8	75,0	25,8		75,0	30,6	75,0	30,6	
75,0	27,7	"	27,7	34,6	75,0	29,9	"	29,9	49,9
75,0	25,1	"	25,1		75,0	29,3	"	29,3	
76,0	28,3	"	27,9		75,0	29,0	"	29,0	
100,0	35,6	100,0	35,6	52,0	100,0	37,4	100,0	37,4	36,9
100,0	33,7	"	33,7		99,5	33,3	"	33,5	
100,0	33,7	"	33,7		101,5	37,6	"	37,0	
100,0	35,4	"	35,4	52,0	101,5	38,5	"	37,9	49,9
149,5	52,1	150,0	52,3		151,0	50,0	150,0	49,6	
147,5	50,5	"	51,4		150,0	50,6	"	50,6	
150,0	52,3	"	52,3	148,0	49,0	"	49,8	49,9	
				148,0	48,5	"	49,4		

Tableau récapitulatif.

POIDS de sable insufflé	PLAQUES POLIES			PLAQUES DÉPOLIES		
	PERTE de poids subie par la plaque	RAPPORT à la perte de poids causée par 25 <sup>es</sup> de sable insufflé		PERTE de poids subie par la plaque	RAPPORT à la perte de poids causée par 25 <sup>es</sup> de sable insufflé	
		Théorique	Trouvé expérimental		Théorique	Trouvé expérimental
gr. 25,0	mmg. 9,8	1	1,000	mmg. 11,9	1	1,000
50,0	18,7	2	1,908	21,1	2	1,773
75,0	26,6	3	2,714	29,7	3	2,496
100,0	34,6	4	3,531	36,9	4	3,401
150,0	52,0	6	5,306	49,9	6	4,153

Les résultats obtenus sont représentés graphiquement sur la *fig. 4* où les poids de sable insufflé sont portés en abscisses et les abrasions en ordonnées pour les-

quelles  $1^{\text{mm}} = 0,5^{\text{mmg}}$ . On remarque que la courbe relative à la plaque polie, marquée par un trait plein, est plus rapprochée de l'axe des  $x$  que celle relative à la plaque dépolie marquée en pointillé, et que toutes deux sont très sensiblement parallèles entre les points correspondant à 25 et à 100 grammes de sable insufflé. Le non-parallélisme au delà de 100 grammes est très probablement dû à des erreurs expérimentales d'autant plus difficiles à éviter que l'on opère avec des poids de sable plus considérables. On est par conséquent en droit de conclure à la proportionnalité existant entre le poids de quartz insufflé et l'abrasion produite et d'admettre pour le verre et dans les conditions spéciales de l'expérience, qu'une certaine quantité de quartz 2<sup>es</sup>,5 environ, a été employée à effectuer le dépolissage de la plaque et constitue ainsi une sorte de constante de poli.

Il résulte de ces expériences que dans la nature une roche éprouve une abrasion plus considérable lorsqu'elle est dépolie que lorsqu'elle est polie. Ce fait peut trouver son application dans l'art des constructions. Pfaff avait déjà cherché à mesurer l'érosion de diverses roches qu'il taillait en plaques, laissait pendant un temps assez considérable variant de un à trois ans exposées aux intempéries et pesait ensuite. Ce savant est arrivé à un résultat diamétralement opposé pour du granite qui, poli, avait perdu, en un an, une portion de son poids représentant une épaisseur de  $0^{\text{mm}},0085$ , tandis que non poli, il n'en avait perdu que  $0^{\text{mm}},0076$  (\*). Mais Pfaff a étudié un mode d'érosion bien plus chimique que mécanique et beaucoup moins spécial que celui que je mesure moi-même; de plus, sa méthode par pesées, dans les conditions particulières de son expérience, est peu précise, puisque dans une roche, certains éléments, ceux contenant

(\*) Pfaff, *Allgemeine Geologie als exacte Wissenschaft*, p. 317.

du fer, par exemple, tout en se décomposant, peuvent, en s'oxydant et en s'hydratant, augmenter de poids au lieu d'en diminuer.

## II. DISTANCE DE LA ROCHE A L'OUVERTURE DU TUBE D'ARRIVÉE DU JET DE SABLE.

Deux séries d'expériences ont été faites ; pour la première série, on insufflait sur des plaques coupées dans la même feuille de verre, 50 grammes de quartz par deux tubes en même temps, sous la pression constante de 16 centimètres de mercure, la distance de la plaque à l'orifice des tubes variant seule. Le diamètre de ces tubes était 3<sup>mm</sup>,7.

Dans la seconde série, on insufflait sur des plaques de verre polies 50 grammes de quartz par un seul tube de 3<sup>mm</sup>,7 d'ouverture sous pression constante de 20 centimètres de mercure. Il résulte de cette disposition l'avantage d'une plus courte durée des expériences, d'une plus grande facilité à maintenir la pression constante et enfin d'une abrasion plus considérable. Chaque nombre inscrit dans le tableau qui suit est la moyenne de quatre expériences ne différant jamais entre elles de plus de 1 milligramme.

DISTANCE de la plaque à l'orifice du jet.	1 <sup>re</sup> SÉRIE		2 <sup>e</sup> SÉRIE	
	Poids perdu par la plaque	Poids perdu par la plaque	Diamètre de la trace laissée sur la plaque	
cm.	mmg.	mmg.	cm.	
0,5	20,9	31,0	0,5	
1,0	27,6	37,3	0,9	
1,5	28,0	40,3	1,05	
2,0	31,3	46,6	1,25	
2,5	31,5	48,8	1,35	
3,0	32,2	52,9	1,60	

Les résultats fournis par la première série d'expériences sont représentés *fig.* 5 par la courbe (2) et ceux de la seconde série par la courbe (1). Ces courbes offrent deux points d'inflexion correspondant aux ordonnées relatives aux distances 1,5 et 2,5 centimètres. Déjà dans les expériences précédentes, on avait remarqué cette inflexion pour l'ordonnée 1,5; elle ne me semble devoir être attribuée qu'à la disposition même de l'appareil. En effet, lorsque la plaque est placée à ces distances de l'orifice du jet, elle se trouve voisine des deux ouvertures conduisant aux flacons récepteurs des poussières. Ce voisinage provoque un remous du vent dont une partie s'engouffre dans les tubes, oppose un obstacle au vent arrivant de la pompe et le choc des grains de sable contre la plaque est ainsi amorti. Nous considérerons les courbes en traits interrompus comme représentant exactement le phénomène; mais pour éviter désormais cette irrégularité, toutes les expériences qui suivent ont été faites à la distance constante de 2 centimètres de l'ouverture du jet.

Les expériences permettent de conclure que, jusqu'à une certaine limite, l'abrasion croît proportionnellement à la distance qui sépare la plaque usée de l'ouverture par laquelle arrive le jet de sable; mais après cette limite qui est atteinte d'autant plus rapidement que la pression est moindre, l'accroissement de l'abrasion devient nul.

Cette loi, sans application dans la nature, nous servira à préciser notre mode d'expérimentation.

## III. DIMENSION DES GRAINS DE SABLE INSUFFLÉS.

Toutes les expériences ont été faites sous la pression de 22 centimètres de mercure, les plaques de verre étant toujours situées à 2 centimètres de l'ouverture du jet de sable. On a séparé au tamis quatre grosseurs différentes

de quartz, et on a expérimenté successivement avec chacune d'elles.

DIAMÈTRE des grains de quartz	POIDS DE SABLE insufflé	POIDS ENLEVÉ A LA PLAQUE		
		brut	réduit à 25 <sup>e</sup>	moyenne
mm.	gr.	gr.	gr.	gr.
0,9	14,0	31,7	56,6	56,5
»	13,8	30,9	56,2	
»	13,6	30,9	56,7	54,2
0,7	63,1	63,1	52,9	
»	57,4	57,4	55,1	50,5
»	54,6	54,6	54,6	
0,5	24,9	51,0	50,8	49,2
»	21,3	49,0	50,6	
»	26,0	52,2	50,2	49,2
0,3	25,0	49,0	49,0	
»	22,0	43,3	49,2	49,2
»	26,0	51,2	49,3	

Les chiffres de tableau montrent combien est faible l'influence exercée par la dimension des grains de sable; ils se rapportent à des grains ayant déjà servi, c'est-à-dire arrondis; lorsque le sable est neuf, chaque grain observé au microscope, se montre hérissé de petites aspérités qui augmentent quelque peu sa puissance d'abrasion. Ainsi, 25 grammes de quartz neuf, de 0<sup>mm</sup>,9 de diamètre ont enlevé 57<sup>g</sup>,2 à une plaque de verre alors que dans des conditions identiques, mais avec du quartz arrondi, la même plaque avait perdu seulement 56<sup>g</sup>,5. Lorsqu'on manquait de grains de quartz, on en fabriquait, par broyage et tamisage, une certaine quantité que l'on rendait ensuite sphérique en faisant simplement une ou deux expériences à blanc. La facilité avec laquelle des grains anguleux s'arrondissent fournit un argument contre l'origine éolienne du loess de Chine dans l'intérieur duquel, ainsi que l'a observé M. de Richthofen, les grains de quartz sont toujours anguleux. Cependant, en supposant, comme on l'a fait, que le sol sur lequel venait s'entasser la poussière, était couvert d'herbes amortissant le choc des grains, les empêchant

ainsi de s'arrondir et croissant à mesure que le niveau s'exhaussait, on a voulu, dans une certaine limite, répondre d'avance à cette objection. Une autre remarque peut encore se déduire des valeurs trouvées, c'est que la dimension des grains de sable étant presque sans importance, il en résulte que, dans la nature, lorsqu'une roche est géographiquement située sous les vents habituellement régnants, au-dessous d'un désert ou d'une plage fournissant des particules sableuses, en d'autres termes, est en position de subir une abrasion, le phénomène s'effectue d'une façon incessante, par les vents les plus faibles charriant des grains très fins comme par les vents les plus violents, il dépend autant de la persistance avec laquelle le vent souffle dans la même direction que de sa force.

#### IV. NATURE DES GRAINS DE SABLE INSUFFLÉS.

Les expériences ont été faites sous une pression de 20 centimètres de mercure, les plaques en verre étant à une distance de 2 centimètres de l'orifice du jet de sable :

1° 25 grammes de marbre blanc en grains ayant traversé le tamis de 1 millimètre et arrêtés par le tamis à ouvertures de 0<sup>mm</sup>,6 ont été insufflés sur une plaque de verre; l'abrasion a été nulle;

2° On a insufflé cette poudre de marbre contre une plaque du même marbre :

POIDS de marbre insufflé	POIDS ENLEVÉ A LA PLAQUE		
	brut	réduit à 25 <sup>e</sup>	moyenne
gr.	mmg.	mmg.	
25,5	21,9	11,8	12,3
20,9		11,8	
24,6	26,2	12,8	
25,8		12,8	

3° 25 grammes de quartz pulvérisé ont été projetés sur une plaque de marbre, l'abrasion a été de 47<sup>g</sup>,3;

4° Enfin 25 grammes de quartz pulvérisé ont été projetés sur une plaque de quartz taillée perpendiculairement à l'axe; l'abrasion a été de 13<sup>g</sup>,9.

En résumé, avec 25 grammes de poudre insufflée :

Marbre sur verre, l'abrasion est nulle,		
Marbre sur marbre, —	12,3,	
Quartz sur quartz, —	13,9,	
Quartz sur marbre, —	47,3.	

On voit qu'un sable calcaire poussé par le vent contre des roches quartzieuses produit un effet nul; l'effet d'un sable contre une roche de même nature, calcaire contre calcaire, ou quartz contre quartz, est à peu près identique et peu considérable; mais l'effet maximum sera produit par un sable quartzieux frappant des roches calcaires, ce qui est d'ailleurs le cas le plus général dans la nature. Il est bon d'ajouter qu'un sable quartzieux donne lieu à une abrasion plus considérable, parce que chaque grain diminue très peu de volume après le choc et qu'il recommence pendant longtemps son action, tandis que du sable calcaire, au contraire, ne tarde pas à devenir si pulvérent que son activité cesse promptement.

#### V. PRESSION DU VENT.

Les plaques de verre étaient placées à la distance constante de 2 centimètres de l'orifice du jet de sable. Les résultats sont indiqués dans le tableau suivant :

PRESSION en centimètres de mercure	POIDS de quartz insufflé	POIDS ENLEVÉ à la plaque		MOYENNE	PRESSION en centimètres de mercure	POIDS de quartz insufflé	POIDS ENLEVÉ à la plaque		MOYENNE	
		brut	réduit à 25				brut	réduit à 25		
cm.	gr.	mmg.	mmg.	mmg.	cm.	gr.	mmg.	mmg.	mmg.	
8,0	31,0	20,7	16,7	16,5	16,0	24,5	33,1	33,8	33,7	
»	22,8	14,9	16,5		»	25,2	33,7	33,5		
»	26,5	17,4	16,4		»	24,7	45,3	45,8		
»	24,5	15,8	16,2		»	24,5	45,0	45,9		
12,0	30,3	31,1	25,6	25,7	»	27,5	50,5	45,9	45,6	
»	23,3	24,0	25,4		»	25,0	45,1	45,1		
»	23,3	24,3	26,0		»	26,0	25,8	64,1		62,1
»	25,6	26,4	25,8		»	23,9	61,7	64,5		
16,0	24,0	32,3	33,6	»	»	26,8	67,5	63,0	63,4	
»	25,0	34,0	34,0		»	25,3	64,4	63,6		

Les valeurs obtenues sont figurées sur la courbe (*fig. 6*) où les abscisses représentent les pressions et les ordonnées ( $1^{\text{mm}} = 1^{\text{mmg}}$ ) l'abrasion correspondante. La courbe passe évidemment par l'origine, puisque pour une pression nulle, l'abrasion est nulle et cette courbe est très sensiblement une droite, ce qui montre que la pression et l'abrasion sont proportionnelles entre elles.

Au sujet de la relation qui existe entre la vitesse du vent, la densité et la dimension des grains entraînés, on devra se rapporter au travail que j'ai publié dans les *Annales des Mines* (\*).

Cette courbe des pressions va nous permettre, en outre, de vérifier le degré de précision de notre mode d'expérimentation.

Lorsque nous nous sommes occupés de l'influence exercée par la dimension des grains de sable projetés, nous avons trouvé que sous la pression de 22 centimètres de mercure, l'abrasion correspondant à des grains ayant pour diamètre  $0^{\text{mm}},9$ ,  $0^{\text{mm}},7$ ,  $0^{\text{mm}},5$  et  $0^{\text{mm}},3$  était respectivement de  $56^{\text{mmg}},5$ ,  $54^{\text{mmg}},2$ ,  $50^{\text{mmg}},5$  et  $49^{\text{mmg}},2$ .

(\*) J. Thoulet, Expériences relatives à la vitesse des courants d'eau ou d'air susceptibles de maintenir en suspension des grains minéraux. *Annales des mines*, mai-juin 1883.

Revenant à la courbe des pressions, nous voyons que graphiquement, à la pression 22 centimètres de mercure, l'abrasion est de 51 milligrammes. Un triage à travers des tamis de différentes grosseurs montre que les 25 gr. de sable employé sont composés de :

1,4 g. de grains ayant 0,9 millim. de diamètre donnant une abrasion de	3,2
8,1 — — — — —	17,6
8,4 — — — — —	17,0
7,1 — — — — —	14,0

Leur abrasion totale, lorsqu'ils agissent tous en même temps, est de 51,8, valeur très rapprochée de 51,0, chiffre donné par la courbe. Cette concordance montre la précision du procédé employé.

#### VI. INCLINAISON DE LA PLAQUE DE ROCHE PAR RAPPORT A LA DIRECTION DU JET DE SABLE.

Les expériences ont permis d'établir les tableaux suivants. Les courbes sont représentées sur la *fig. 7*, où les inclinaisons sont en abscisses et les abrasions en ordonnées. Leur examen montre que l'abrasion commence par

INCLINAISON	PRESSION : 22 CM. DE MERCURE				PRESSION : 20 CM. DE MERCURE			
	Poids de sable insufflé	Poids enlevé à la plaque		Moyenne	Poids de sable insufflé	Poids enlevé à la plaque		Moyenne
		brut	réduit à 25 gr.			brut	réduit à 25 gr.	
90°	Voy. Courbe rel. à la pression			51,0	Voy. Courbe rel. à la pression			45,6
60°	25,3	44,5	44,0	45,0	26,4	36,8	34,8	34,0
»	24,0	44,2	46,0		25,0	33,5	33,5	
»	25,0	44,8	44,8		24,5	33,4	34,1	
»	25,7	46,5	45,3		25,0	33,7	33,7	
45°	25,0	26,5	26,5	27,3	24,8	22,4	22,6	22,4
»	25,7	28,6	27,8		25,4	22,6	22,2	
»	25,5	28,2	27,6		25,0	22,4	22,4	
»	24,6	26,8	27,3		25,5	22,8	22,4	
30°	25,5	13,1	12,9	12,8	24,5	10,9	11,2	11,5
»	24,4	12,2	12,5		25,0	11,9	11,9	
»	25,7	13,7	13,3		24,0	10,8	11,2	
»	24,5	12,3	12,5		24,5	11,5	11,7	

INCLINAISON	PRESSION : 16 CM. DE MERCURE				PRESSION : 12 CM. DE MERCURE				
	Poids de sable insufflé	Poids enlevé à la plaque		Moyenne	Poids de sable insufflé	Poids enlevé à la plaque		Moyenne	
		brut	réduit à 25 gr.			brut	réduit à 25 gr.		
90°	Voy. Courbe rel. à la pression			33,7	Voy. Courbe rel. à la pression			25,7	
60°	25,0	47,2	23,4	23,7	25,3	32,8	16,3	16,6	
»	25,5				24,6				25,9
»	25,7	48,4	24,0		24,9	34,3	16,8		
»	24,6	31,6	15,8		25,0	18,9	9,5		
45°	27,4	32,1	15,9	15,8	25,0	22,1	10,5	10,0	
»	25,6				21,3				27,9
»	25,0				24,5				25,4
»	25,5				13,8				6,9
30°	25,0	13,5	6,7	6,8	25,0	8,5	4,2	4,0	
»	25,0				25,2				

augmenter rapidement à mesure que l'inclinaison se rapproche davantage de la verticale; mais lorsque la plaque fait avec la direction du jet un angle de 60 degrés environ, et cela d'autant plus que la pression est plus forte, cette abrasion croit beaucoup plus lentement. Pour servir de vérification, il a été fait une expérience en inclinant la plaque de verre de 75 degrés et en y insufflant du quartz sous une pression de 20 centimètres de mercure :

POIDS de quartz insufflé	POIDS ENLEVÉ A LA PLAQUE		MOYENNE
	brut	réduit à 25 gr.	
gr.	milligr.		44,5
24,6	44,4	45,1	
24,3	42,6	43,8	
25,2	45,0	44,7	
24,7	43,6	44,2	

Après l'expérience, la plaque de verre abrasée est dépolie suivant une surface circulaire dans le cas de la verticalité et elliptique lorsqu'elle faisait un angle avec la direction du jet de sable. Nous avons mesuré les axes de cette ellipse avec une pression de 20 centimètres de mer-

cure, à une distance de 2 centimètres, le diamètre du tube amenant le jet étant 3<sup>mm</sup>,7. Cette mesure a été prise aussi exactement que possible car, surtout quand la roche est très oblique, les bords de la trace laissée par le sable perdent beaucoup de leur netteté.

ANGLES	GRAND AXE	PETIT AXE	SURFACE
degrés	cm.	cm.	cmq.
90	1,25	1,25	1,23
75	1,30	1,25	1,28
60	1,35	1,20	1,27
45	1,35	1,05	1,28
30	2,05	0,95	1,53

On peut donc dire que, dans la nature, l'abrasion est d'autant plus énergique que la roche sur laquelle elle s'exerce est plus près d'être verticale et qu'elle diminue très rapidement d'intensité quand l'inclinaison devient inférieure à 60 degrés.

#### VII. NATURE DE LA PLAQUE ABRASÉE.

La première expérience a été faite sur un cube poli de quartz cristallisé lœvogyre parfaitement limpide, haut de 3 centimètres et ayant deux de ses faces taillées perpendiculairement à l'axe optique, de sorte que ses quatre autres faces étaient parallèles à cet axe. Chaque face du cube a été placée dans l'appareil à 2 centimètres de distance de l'orifice du tube (diam. = 3<sup>mm</sup>,7) amenant sous une pression de 20 centimètres de mercure un jet de grains de quartz soigneusement tamisés entre deux tamis, l'un à ouvertures de 0<sup>mm</sup>,6, l'autre de 0<sup>mm</sup>,4, et pouvant par conséquent être considérés comme ayant un diamètre de 0<sup>mm</sup>,5 :

DIRECTION	POIDS de sable insufflé	POIDS ENLEVÉ à la plaque		MOYENNE
		brut	réduit à 25	
1 <sup>re</sup> face perpendiculaire à l'axe. . . . .	49,0	48,2	24,6	24,7
2 <sup>e</sup> id. . . . .	50,2	50,0	24,9	
1 <sup>re</sup> face parallèle à l'axe. . . . .	48,8	43,8	22,4	22,2
2 <sup>e</sup> id. . . . .	51,0	45,3	22,2	
3 <sup>e</sup> id. . . . .	46,5	41,1	22,1	
4 <sup>e</sup> id. . . . .	49,8	44,1	22,1	

Le quartz s'abrase donc plus facilement sous l'action d'un jet de sable dirigé perpendiculairement à une face taillée perpendiculairement à l'axe optique que lorsque la face est taillée parallèlement à cet axe. Ces valeurs fournissent non seulement une mesure de l'abrasion éprouvée par le minéral, mais elles concordent remarquablement avec l'ensemble de ses autres propriétés physiques telles qu'elles résultent de son uniaxialité. L'ellipsoïde d'abrasion tout comme l'ellipsoïde d'élasticité optique est bien de révolution et son grand axe se confond avec l'axe de révolution. Nous nommerons désormais coefficient d'abrasion d'une substance, le rapport de son abrasion à celle du quartz sur une face polie taillée perpendiculairement à l'axe et dans les mêmes conditions de pression, de grosseur de grains abrasants, etc.

Les autres corps étudiés ont été les suivants : les abrasions brutes ont été divisées par le nombre constant 24,7 après correction préalable relative à la grosseur des grains de quartz insufflés :

Fer. . . . .	0,06	Plaque de fer forgé polie au tour de lapidaire.
Cuivre. . . . .	0,10	Plaque fondue puis polie au tour de lapidaire.
Plomb. . . . .	0,21	Plaque fondue et polie.
Étain . . . . .	0,26	Plaque fondue et polie.
Quartz . . . . .	1,000	Face polie taillée perpendiculairement à l'axe.
Quartz . . . . .	0,899	Face polie taillée parallèlement à l'axe.
Basalte . . . . .	1,03	Du lac de Guéry (Auvergne), en plaque polie, la roche est de texture assez fine; sur la marque d'abrasion, les petits cristaux d'olivine sont plus creusés que le reste de la pâte.

Calcaire. . . . .	1,51	Calcaire lithographique de Volpedo (Italie); la roche est remarquablement homogène; l'abrasion très régulière.
Granite . . . . .	1,47	Granite de Vire. La marque d'abrasion est très irrégulière, les places correspondant aux cristaux de feldspath sont beaucoup plus creusées; on distingue des traces de vermiculures analogues à celles qu'on observe dans la nature.
Phonolite. . . . .	1,42	De la roche Tuilière (Auvergne); l'abrasion est encore irrégulière et vermiculée par suite de la résistance variable offerte par les divers cristaux.
Serpentine . . . . .	2,79	Pey-de-Haurat, Basses-Pyrénées. La roche est très peu homogène et se laisse rayer au canif; la marque d'abrasion est très irrégulière.
Marbre blanc.	1,89	Saccharoïde, marque d'abrasion régulière.
Calcaire. . . . .	1,49	De Verdun; la pâte de ce calcaire, d'ailleurs assez homogène, est criblée de petits trous; la marque d'abrasion est grenue mais sans vermiculures.

Ainsi que l'on pourrait s'y attendre, les résultats obtenus sont très variables. Pour les métaux, l'ordre n'est pas tout à fait celui des duretés telles qu'elles sont données ordinairement, car quoique le plomb soit le plus tendre des quatre métaux expérimentés puisqu'il se laisse rayer par l'ongle, son abrasion est moindre que celle de l'étain qui est plus dur. Quant aux roches, on peut dire qu'à dureté égale, celles qui sont homogènes comme le quartz, ou à éléments différents mais extrêmement petits comme le basalte, sont celles qui résistent le mieux à l'abrasion. Par contre, l'abrasion est d'autant plus considérable que les roches sont plus tendres, comme la serpentine, ou qu'elles sont composées d'éléments plus gros et de nature plus différente, comme le granite.

On peut admettre que le jet de sable déchausse chaque individu, l'isole de la matrice qui l'englobe et le chasse bien avant de l'avoir réellement pulvérisé par son choc. Les vermiculures semblent en partie causées par un défaut d'homogénéité de la roche; toutefois, il est évident que des remous dans la direction du vent, ainsi qu'on les constate sur des blocs entassés, ne formant pas une surface plane, laissant entre eux des interstices par lesquels l'air s'engouffre, peuvent contribuer à donner lieu à la même apparence. On reconnaît ces divers caractères

dans la nature sur les roches abrasées par le vent où les minéraux les plus durs restent en saillie. J'ai remarqué ces faits dans une région des plus intéressantes au point de vue des divers modes d'usure par les agents atmosphériques, à Ploumanach, près de Perros-Guirec (Côtes-du-Nord). Le pays est semé d'énormes blocs de granite rose à très gros cristaux parmi lesquels ceux de quartz restent toujours en saillie à la surface jusqu'au moment où, détachés de leur alvéole par les progrès de l'abrasion, ils tombent et s'accumulent au pied des rochers.

#### VIII. HUMIDITÉ DE LA PLAQUE ABRASÉE.

Les expériences ont été faites dans les mêmes conditions, sous une pression de 20 centimètres de mercure, la plaque étant à une distance de 2 centimètres de l'orifice du jet. La roche est d'abord séchée à l'étuve jusqu'à ce que son poids demeure invariable; on la soumet ensuite à l'action du jet de sable, on la sèche de nouveau et on la pèse afin de constater sa perte de poids. Après deux expériences, on place la roche dans de l'eau bouillante sous la cloche de la machine pneumatique et on fait le vide de manière à ce que l'imbibition soit complète; on soumet au jet de sable, on fait sécher à l'étuve jusqu'à ce que le poids demeure invariable et on détermine la perte de poids. La mesure a toujours été recommencée une seconde fois dans tous ses détails.

Deux roches seulement ont été examinées et ont donné les résultats suivants auxquels nous ajouterons la valeur de la porosité, c'est-à-dire le volume des vides  $v$  contenu dans un volume  $V$  de roche sèche égale à 100, obtenu en mesurant le poids de la roche sèche  $P_s$ , sa densité  $D \left( V = \frac{P_s}{D} \right)$ , son poids humide  $P_h$ , la densité de l'eau

étant  $d$  à la température de l'expérience  $\left(v = \frac{P_h - P_s}{d}\right)$ .

ROCHE	ABRASION rapportée au quartz proportionnel à l'axe			POROSITÉ
	sèche	humide	Rapport p. 100.	
Marbre blanc . . . . .	1.89	2.25	1.19	2.27
Calcaire de Verdun . . . . .	1.49	2.14	1.44	5.47

L'abrasion d'une roche est par conséquent plus forte quand celle-ci est humide que lorsqu'elle est sèche, et d'autant plus considérable que cette roche peut s'imbibber d'une plus grande quantité d'eau. Dans un cas cependant, il en a été autrement. Un fragment de calcaire ayant servi de bordure de trottoir et complètement pourri sous l'action de l'eau et de la gelée, a subi une abrasion de 6,32 à l'état sec et de 5,36 seulement à l'état humide. L'humidité a donc communiqué une faible cohésion à la pierre. Cette circonstance est tout à fait exceptionnelle, et nous ne la citons ici qu'en vue d'expériences que nous sommes actuellement occupés à exécuter au sujet de la destruction des roches par la gelée. Il est intéressant de comparer ces résultats avec ceux de MM. Michelot et Tournaire, qui ont reconnu que la résistance à l'écrasement se réduit dans une proportion variant du tiers au quart et même au cinquième, si l'on expérimente sur une même roche d'abord sèche puis saturée d'humidité (\*).

(\*) *Revue de géologie*, par MM. Delesse et de Lapparent, t. XIV, p. 15.

## RÉSUMÉ.

Les expériences synthétiques décrites précédemment établissent les faits suivants :

1. L'abrasion est directement proportionnelle à la quantité de poudre produisant cette abrasion.
2. Une roche résiste mieux à l'abrasion quand elle est polie que lorsqu'elle est dépolie.
3. Jusqu'à une certaine limite, l'abrasion augmente proportionnellement à la distance qui sépare la plaque usée de l'ouverture par laquelle arrive le jet de sable; mais après cette limite qui est atteinte d'autant plus rapidement que la pression est moindre, l'accroissement de l'abrasion devient nul et nécessairement même ensuite négatif. Cette loi, sans application dans la nature, peut être utile à connaître dans l'industrie.
4. Une poussière dont les grains, ayant déjà produit une abrasion sur une roche, sont arrondis, use désormais moins que lorsque ces grains n'ont pas encore servi et ont conservé l'irrégularité de leur surface.
5. L'action abrasante d'une poudre est d'autant plus puissante que les grains qui constituent celle-ci ont des dimensions plus considérables; cependant l'influence exercée par la dimension est en elle-même assez faible.
6. Le calcaire pulvérulent ne produit aucune abrasion sur les roches quartzieuses; calcaire contre calcaire ou quartz contre quartz, donnent lieu à la même abrasion; l'effet maximum est produit par une poussière de quartz choquant une roche calcaire.
7. L'abrasion est directement proportionnelle à la pression du vent chassant la poudre abrasante.
8. L'abrasion est d'autant plus énergique que la roche sur laquelle elle s'exerce est plus près d'être verticale

par rapport à la direction du sable qui la frappe, et elle diminue très rapidement d'intensité aussitôt que l'inclinaison devient inférieure à 60 degrés.

9. Pour tout corps solide, il est possible de représenter par un chiffre la valeur absolue de la résistance qu'il oppose à l'abrasion en prenant pour unité la résistance opposée dans les mêmes conditions par une plaque de quartz taillée perpendiculairement à l'axe.

10. Dans les cristaux l'abrasion, comme toutes les autres propriétés physiques, suit les lois de la symétrie cristalline.

11. A dureté égale, les roches homogènes ou hétérogènes à éléments très petits résistent mieux à l'abrasion que les roches constituées par des éléments plus gros et de nature plus différente.

12. Une roche s'abrase plus quand elle est humide que lorsqu'elle est sèche, et d'autant plus qu'elle est susceptible d'absorber par porosité une plus grande quantité d'eau.

## NOTE

SUR LE

## PROFIL DES CAMES DES MARTEAUX

Par M. ARTHUR THIRÉ,

Professeur à l'École des mines d'Ouro-Preto (Brésil).

Certains appareils de métallurgie, de préparation mécanique et d'exploitation, animés de mouvements intermittents, sont actionnés par des cames montées sur un arbre de rotation : tels sont les marteaux à queue et marteaux frontaux; certains appareils à secousses de la préparation mécanique (tables à secousses, tables de Rittinger, bacs divers); les appareils de sondage mus par une *sonnerie à la came*, etc. Dans ces appareils divers, animés d'un mouvement d'oscillation alternatif autour d'un axe fixe, le corps entraîné par la came offre généralement à l'action de celle-ci une face plane dont la direction passe par l'axe géométrique du mouvement de rotation alternatif. En assimilant cette face plane au *flanc* d'une dent d'engrenage, l'application des tracés de la théorie des engrenages conduirait à adopter, pour les cames, un profil en *épicicloïde* qui est, comme on sait, le profil *conjugué* d'un flanc rectiligne. Et, en effet c'est le profil en *épicicloïde* qui est indiqué et recom-

mandé partout (\*) pour le profil des cames qui ont à entraîner périodiquement un corps tournant autour de son axe.

Dans une note publiée précédemment dans les *Annales des Mines* (\*\*), étudiant la question de la détermination du profil des cames des bocards, j'ai montré que l'on n'était pas autorisé à faire une application pure et simple des tracés de la théorie des engrenages à la détermination du profil de ces cames.

En étendant aux cames des marteaux et autres appareils les considérations présentées, relativement aux cames de bocards, dans la note rappelée ci-dessus, on arrive à la conclusion que l'adoption du profil en *épicycloïde* ne se justifie pas, et que le profil en *arc de cercle* doit lui être substitué comme offrant le double avantage d'être *théoriquement* plus rationnel, et *pratiquement* plus simple et plus facile à construire.

Je vais indiquer, en prenant pour exemple un marteau, comment peut se déterminer le tracé du profil d'une came en arc de cercle, dans le cas d'un corps entraîné périodiquement autour d'un axe, d'un mouvement intermittent.

Soient (Pl. VIII, fig. 8) :

O l'axe de l'arbre à cames;

O' l'axe du marteau;

AB la face plane par laquelle le marteau est entraîné par la came; je suppose que cette face AB ait une direction qui ne rencontre pas nécessairement l'axe O'.

(\*) Poncelet. — *Cours de mécanique appliquée aux machines*, p. 225.

Morin. — *Éléments de cinématique*, 3<sup>e</sup> édit., p. 250.

Résal. — *Traité de mécanique générale*, t. III, p. 305.

Laboulaye. — *Dictionnaire des arts et manufactures*. Article : Marteaux à soulèvement.

Degousée et Laurent. — *Guide du sondeur*, 2<sup>e</sup> édit., t. II. Sonnerie à la came, p. 179.

(\*\*) *Annales des mines*, 8<sup>e</sup> série, t. IX, p. 282 (1886).

Soit A l'extrémité de cette face plane.

Dans le mouvement du marteau, le point A décrit une circonférence que j'appellerai D. Décrivons, du centre O, une circonférence C tangente à D.

Je vais chercher à déterminer le profil de la came de façon à satisfaire aux trois conditions suivantes :

1<sup>o</sup> Que le contact commence sur la ligne des centres OO' ;

2<sup>o</sup> Que le contact commence à l'extrémité A de la face AB ;

3<sup>o</sup> Que le contact finisse dans une position donnée A'B' du marteau.

Appelons  $\alpha$  l'angle suivant lequel BA rencontre la circonférence D.

Il est évident qu'un arc de cercle A'E tangent en A' à A'B' et rencontrant la circonférence C suivant l'angle  $\alpha$  sera un profil satisfaisant aux trois conditions ci-dessus.

Or, on sait (\*) que tous les cercles passant par un point donné A' et coupant un cercle donné C sous un angle donné  $\alpha$  touchent tous un même cercle S facile à construire. Si donc on construit ce cercle S, on se trouve ramené à construire un cercle tangent au cercle S et tangent à la droite A'B' au point A', ce qui constitue un problème élémentaire bien connu.

Conformément à une remarque qui m'a été bienveillamment communiquée par M. Haton de la Goupillière, on observera que le problème traité dans cette note revient à celui du tracé de l'aube des turbines Fourneyron.

(\*) Rouché et Comberousse. — *Traité de géométrie*, 5<sup>e</sup> édit. 1<sup>re</sup> partie, p. 264.

## MÉMOIRE

SUR

## L'EXTENSION DES PLAQUES ÉLASTIQUES

Par M. PELLETAN, ingénieur des mines.

Le problème consiste à déterminer l'état d'équilibre d'une plaque d'épaisseur constante, sur la surface latérale de laquelle agissent des forces parallèles aux bases. Cette question a été traitée avec beaucoup de développement par Clebsch (\*), auquel nous empruntons les principes qui servent de base à la théorie.

Cet auteur considère les corps dans lesquels les dimensions transversales sont prépondérantes, et prend comme caractère général des états d'équilibre qu'il étudie, l'absence de toute tension dans une direction normale à leurs bases; il distingue deux cas : 1° celui de la *dilatation simple*, dans lequel la variation de densité, résultant de l'application de forces agissant sur la surface, est nulle en tous points du solide; 2° le cas plus général, où les pressions latérales étant quelconques, la masse se contracte ou se dilate inégalement.

La marche que Clebsch indique pour les recherches

(\*) *Théorie de l'élasticité des corps solides de Clebsch*, avec notes étendues de B. de Saint-Venant, ch. III (Paris, 1885).

est très compliquée, parce que les expressions qui entrent en jeu sont des combinaisons de séries dans lesquelles les coefficients successifs ne s'obtiennent chacun que par une intégration spéciale, et comme on ne peut pratiquement en déterminer qu'un nombre très limité, les solutions qu'il indique ne peuvent être considérées que comme approximatives; celles que nous donnons ci-dessous sont d'une application plus facile et conduisent aux résultats exacts.

## § 1.

Considérons une plaque (*fig. 9*, Pl. VIII) dont l'épaisseur soit faible par rapport aux autres dimensions, longueur et largeur. Supposons-la horizontale et rapportons-la à trois axes de coordonnées rectangulaires. Les deux premiers OX et OY seront placés dans le plan médian, à égale distance des bases, le troisième sera vertical et leur sera par suite perpendiculaire.

Soient  $h$  l'épaisseur de la plaque;  $x, y, z$  les coordonnées d'un point du corps;  $u, v$  et  $w$  ses déplacements après l'application des forces;  $p_{xx}, p_{yy}, p_{zz}, p_{yz}, p_{zx}, p_{xy}$ , les composantes intérieures y relatives,  $\theta$  la somme  $\frac{du}{dx} + \frac{dv}{dy} + \frac{dw}{dz}$ . D'après les hypothèses, aucune action ne s'exerce sur les deux bases, et par suite les valeurs de  $p_{zz}, p_{zx}, p_{yz}$  sont nulles sur toute leur surface; enfin, comme l'on admet qu'il n'y a pas de tension appréciable dans le sens de l'épaisseur, la première de ces quantités,  $p_{zz}$ , est supposée négligeable en tous les points du solide.

Imaginons une section idéale, faite dans la plaque par un plan parallèle aux  $yz$ , et sur cette coupe un filet plan vertical  $fgjk$ , de largeur infiniment mince; désignons par  $P_{zz}$  la pression normale à cet élément, et par  $P_{xy}$  l'effort tranchant horizontal qui s'y exerce. On aura

$$P_{xx} = \frac{1}{h} \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} p_{xx} dz,$$

$$P_{xy} = \frac{1}{h} \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} p_{xy} dz.$$

De même pour la pression  $P_{yy}$ , semblablement définie

$$P_{yy} = \frac{1}{h} \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} p_{yy} dz.$$

Nous représenterons par  $D$  la somme  $P_{xx} + P_{yy}$ .

Pour les corps homogènes, les relations entre les variables sont les suivantes :

$$p_{xx} = \lambda\theta + 2\mu \frac{du}{dx}, \quad p_{yy} = \lambda\theta + 2\mu \frac{dv}{dy}, \quad p_{zz} = \lambda\theta + 2\mu \frac{dw}{dz},$$

$$p_{yz} = \mu \left( \frac{dv}{dz} + \frac{dw}{dy} \right), \quad p_{zx} = \mu \left( \frac{dw}{dx} + \frac{du}{dz} \right), \quad p_{xy} = \mu \left( \frac{du}{dy} + \frac{dv}{dx} \right).$$

$$0 = \frac{du}{dx} + \frac{dv}{dy} + \frac{dw}{dz},$$

$$\frac{dp_{xx}}{dx} + \frac{dp_{xy}}{dy} + \frac{dp_{xz}}{dz} = 0,$$

$$\frac{dp_{xy}}{dx} + \frac{dp_{yy}}{dy} + \frac{dp_{yz}}{dz} = 0,$$

$$\frac{dp_{xz}}{dx} + \frac{dp_{yz}}{dy} + \frac{dp_{zz}}{dz} = 0.$$

Multipliant les deux premières des équations ci-dessus par  $dz$ , intégrant de  $-\frac{h}{2}$  à  $+\frac{h}{2}$ , et remarquant que  $p_{xz}$  et  $p_{yz}$  sont nuls aux limites, on obtient deux relations entre  $P_{xx}$ ,  $P_{xy}$  et  $P_{yy}$  :

$$\frac{dP_{xx}}{dx} + \frac{dP_{xy}}{dy} = 0,$$

$$\frac{dP_{yy}}{dy} + \frac{dP_{xy}}{dx} = 0.$$

Il reste à en trouver une troisième.

Considérons l'équation bien connue :

$$\frac{d^2}{dx^2}(p_{xx} + p_{yy} + p_{zz}) + \frac{d^2}{dy^2}(p_{xx} + p_{yy} + p_{zz}) + \frac{d^2}{dz^2}(p_{xx} + p_{yy} + p_{zz}) = 0.$$

On peut l'écrire

$$\left( \frac{d^2}{dx^2} + \frac{d^2}{dy^2} \right) (p_{xx} + p_{yy}) + \left( \frac{d^2 p_{xx}}{dz^2} + \frac{d^2 p_{zz}}{dx^2} \right) + \left( \frac{d^2 p_{yy}}{dz^2} + \frac{d^2 p_{zz}}{dy^2} \right) = - \frac{d^2 p_{zz}}{dz^2}.$$

Ou encore

$$\left( \frac{d^2}{dx^2} + \frac{d^2}{dy^2} \right) (p_{xx} + p_{yy}) + \lambda \frac{d^2 \theta}{dz^2} + 2 \frac{d^2 p_{zx}}{dz dx} + 2 \frac{d^2 p_{yz}}{dy dz} = - \frac{d^2 p_{zz}}{dz^2}.$$

Ou enfin

$$\left( \frac{d^2}{dx^2} + \frac{d^2}{dy^2} \right) \left( p_{xx} + p_{yy} - \frac{\lambda}{2\lambda + 2\mu} p_{zz} \right) = \frac{3\lambda + 2\mu}{2\lambda + 2\mu} \frac{d^2 p_{zz}}{dz^2}.$$

Multiplions par  $dz$  et intégrons de  $-\frac{h}{2}$  à  $+\frac{h}{2}$  :  $\frac{dp_{zz}}{dz}$  est nul aux deux limites. Donc

$$\left( \frac{d^2}{dx^2} + \frac{d^2}{dy^2} \right) \left( D - \frac{\lambda}{2\lambda + 2\mu} \int p_{zz} dz \right) = 0.$$

$p_{zz}$  est négligeable devant  $D$ . Cette dernière quantité est un potentiel à deux variables, c'est-à-dire qu'elle satisfait à la condition

$$\frac{d^2 D}{dy^2} + \frac{d^2 D}{dx^2} = 0.$$

Les équations du problème sont donc les suivantes :

$$(1) \quad \frac{dP_{xx}}{dx} + \frac{dP_{xy}}{dy} = 0,$$

$$(2) \quad \frac{dP_{yy}}{dy} + \frac{dP_{xy}}{dx} = 0,$$

$$(3) \quad \frac{d^2 D}{dx^2} + \frac{d^2 D}{dy^2} = 0.$$

$D$  représentant la somme  $P_{xx} + P_{yy}$ .

Toutes les intégrales ne seront pas des solutions : il faudra encore que les fonctions arbitraires puissent être et soient effectivement déterminées de façon que les composantes des forces intérieures équilibrent sur la périphérie celle des forces d'application.

## § 2.

Soient ABA'B' la section droite principale de la plaque, M un point intérieur,  $\mu$  un point de la périphérie, P un point quelconque pris en dedans ou en dehors de la courbe (*fig. 10*).

Nous emploierons les notations suivantes :

- ( $x, y$ ) sont l'abscisse et l'ordonnée du point P;  
 ( $\xi, \eta$ ) celles du point  $\mu$ ;  
 ( $\alpha, \beta$ ) » M;  
 $r$  la distance MP =  $+\sqrt{(x-\alpha)^2 + (y-\beta)^2}$ ;  
 $\rho$  »  $\mu$ P =  $+\sqrt{(\xi-x)^2 + (\eta-y)^2}$ ;  
 $\sigma$  la longueur de l'arc de section droite A $\mu$ ;  
 (X, Y) les composantes des forces d'application sur la génératrice de  $\mu$ , rapportées à l'unité de surface.  
 $P_{\alpha\alpha}, P_{\beta\beta}, P_{\alpha\beta}$  les composantes intérieures relatives au point M;  
 $P_{\xi\xi}, P_{\eta\eta}, P_{\xi\eta}$  celles qui correspondent au point  $\mu$ ;  
 $P_{xx}, P_{yy}, P_{xy}$ , celles qui correspondent au point P, quand il est à l'intérieur de la plaque;  
 $\Delta$  est la somme  $P_{\alpha\alpha} + P_{\beta\beta}$ .

Écrivons les relations suivantes entre  $P_{\alpha\alpha}, P_{\beta\beta}, P_{\alpha\beta}$ , d'après les formules (1, 2, 3) :

$$\begin{aligned} \frac{dP_{\alpha\alpha}}{d\alpha} + \frac{dP_{\alpha\beta}}{d\beta} &= 0, \\ \frac{dP_{\beta\beta}}{d\beta} + \frac{dP_{\alpha\beta}}{d\alpha} &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Retranchons ces deux équations membre à membre, après les avoir multipliées respectivement par  $\frac{x-\alpha}{r^2} d\alpha d\beta$ ,

et  $\frac{y-\beta}{r^2} d\alpha d\beta$ , et sommons par rapport à  $\alpha$  et  $\beta$ .

$$\iint \left( \frac{dP_{\alpha\alpha}}{d\alpha} + \frac{dP_{\alpha\beta}}{d\beta} \right) \frac{x-\alpha}{r^2} d\alpha d\beta - \iint \left( \frac{dP_{\beta\beta}}{d\beta} + \frac{dP_{\alpha\beta}}{d\alpha} \right) \frac{y-\beta}{r^2} d\alpha d\beta = 0.$$

En intégrant par parties sur toute la surface ABA'B', on trouve

$$\begin{aligned} \int (P_{\xi\xi} d\eta + P_{\xi\eta} d\xi) \frac{x-\xi}{\rho^2} - \int (P_{\eta\eta} d\xi + P_{\xi\eta} d\eta) \frac{y-\eta}{\rho^2} \\ - \iint (P_{\alpha\alpha} + P_{\beta\beta}) \frac{d}{d\alpha} \frac{x-\alpha}{r^2} d\alpha d\beta = 0. \end{aligned}$$

Les composantes X et Y s'expriment simplement en fonctions de  $P_{\xi\xi}, P_{\eta\eta}, P_{\xi\eta}$  :

$$\begin{aligned} X d\sigma &= P_{\xi\xi} d\eta + P_{\xi\eta} d\xi, \\ Y d\sigma &= P_{\eta\eta} d\xi + P_{\xi\eta} d\eta. \end{aligned}$$

La substitution dans la formule précédente donne

$$(4) \quad \int X d\sigma \frac{x-\xi}{\rho^2} - \int Y d\sigma \frac{y-\eta}{\rho^2} + \iint \Delta \frac{d^2 \log r}{d\alpha^2} d\alpha d\beta = 0.$$

Cette expression n'est vraie que lorsque le point P est situé à l'extérieur du solide; elle est en défaut dans le cas contraire, parce que le dernier coefficient différentiel passe par l'infini pour  $\alpha = x, \beta = y$ . Nous allons chercher quelle valeur prend le premier membre de l'équation (4), lorsqu'au contraire, le point ( $x, y$ ) est à l'intérieur du corps.

## § 3.

Examinons d'abord un cas simple auquel nous ramènerons tous les autres. Supposons (*fig. 11*) que la plaque soit circulaire, qu'elle ait pour centre le point P, et que les forces élastiques soient constantes dans toute la masse.

- P est le centre du cylindre;  
 M un point intérieur quelconque;  
 $\mu_1$  » de la périphérie;  
 $(x, y)$  les coordonnées de P;  
 $(\alpha, \beta)$  celles de M;  
 $(\xi_1, \eta_1)$  celles de  $\mu_1$ ;  
 $(X_1, Y_1)$  les composantes des forces superficielles en  $\mu_1$ ;  
 $\varepsilon$  le rayon du cylindre;  
 $\omega$  l'angle polaire formé par  $\mu_1 P$  avec OX.

Cherchons la valeur de l'intégrale ci-dessus (le premier membre de l'équation 4), lorsque le point P de coordonnées  $(x, y)$  se trouve coïncider, comme nous l'avons supposé, avec le centre du disque.

L'expression à calculer s'écrit

$$\int (P_{xx} d\eta_1 + P_{xy} d\xi_1) \frac{x - \xi_1}{\varepsilon^2} - \int (P_{yy} d\xi_1 + P_{xy} d\eta_1) \frac{y - \eta_1}{\varepsilon^2} + \frac{d^2}{dx^2} \iint \Delta \log r \, d\alpha \, d\beta.$$

Or

$$x - \xi_1 = -\varepsilon \cos \omega, \quad y - \eta_1 = -\varepsilon \sin \omega, \\ d\xi_1 = +\varepsilon \sin \omega \, d\omega, \quad d\eta_1 = +\varepsilon \cos \omega \, d\omega.$$

On remarquera, sans qu'il soit nécessaire d'insister sur cette discussion de signe, que le  $d\xi_1$  qui figure dans la formule, est égal à  $-\frac{d\xi_1}{d\omega} d\omega$ .

La densité étant constante par hypothèse, l'intégrale double a pour valeur  $\varpi (P_{xx} + P_{yy})$ . Les deux autres sommations s'effectuent facilement; leur somme algébrique est :

$$-\varpi P_{xx} + \varpi P_{yy} + \varpi (P_{xx} + P_{yy}) = +2\varpi P_{yy}.$$

On aura donc, en changeant les signes,

$$(5) \int X_1 d\sigma_1 \frac{\xi_1 - x}{\varepsilon^2} - \int Y_1 d\sigma_1 \frac{\eta_1 - y}{\varepsilon^2} - \frac{d^2}{dx^2} \iint \Delta \log r \, d\alpha \, d\beta = -2\varpi P_{yy}.$$

Nous pouvons étendre cette formule au cas où la forme

de la plaque et les pressions qui agissent sur son contour sont quelconques. Isolons dans l'intérieur du corps un cylindre de rayon infiniment petit  $\varepsilon$ , dont le centre sera le point P (fig 12); sur toute son étendue, on pourra considérer les variations des forces élastiques comme négligeables, puisque ses dimensions sont infiniment petites.

Nous décomposerons la sommation à effectuer en deux parties; nous intégrerons d'abord sur toute la surface du disque enclavé, en faisant abstraction de tout le reste du corps, mais en faisant entrer en ligne de compte les efforts qu'exercent sur lui les parois qui l'enserrent, efforts dont les composantes sont  $X_1, Y_1$ . Puis nous effectuerons la même somme pour toute la surface enveloppante, celle qui est marquée sur la figure par des hachures, en lui supposant appliquées, outre les forces périphériques, les réactions du petit cylindre ( $-X_1, -Y_1$ ). Les résultats de chacune de ces opérations sont fournis par les formules (4) et (5).

$$\int X_1 d\sigma_1 \frac{\xi_1 - x}{\varepsilon^2} - \int Y_1 d\sigma_1 \frac{\eta_1 - y}{\varepsilon^2} - \frac{d^2}{dx^2} \iint \Delta \log r_1 \, d\alpha \, d\beta = -2\varpi P_{yy}.$$

Pour la seconde portion de surface, comme le point  $(x, y)$  n'en fait pas partie :

$$\int X \, d\sigma \frac{\xi - x}{\rho^2} - \int Y \, d\sigma \frac{\eta - y}{\rho^2} - \frac{d^2}{dx^2} \iint \Delta \log r \, d\alpha \, d\beta \\ - \int X_1 d\sigma_1 \frac{\xi_1 - x}{\varepsilon^2} + \int Y_1 d\sigma_1 \frac{\eta_1 - y}{\varepsilon^2} = 0.$$

Les intégrales doubles étant relatives, dans la première équation au disque, et dans la seconde à la surface enveloppante.

D'où, en ajoutant membre à membre :

$$-2\varpi P_{yy} = \int X \, d\sigma \frac{\xi - x}{\rho^2} - \int Y \, d\sigma \frac{\eta - y}{\rho^2} - \frac{d^2}{dx^2} \iint \Delta \log r \, d\alpha \, d\beta,$$

l'intégrale double étant prise sur toute l'étendue de la plaque.

On peut calculer de même  $P_{xx}$  et  $P_{yy}$ . On arrive ainsi aux relations suivantes :

$$(6) P_{xx} = \frac{1}{2\omega} \left( \int X d\sigma \frac{\xi-x}{\rho^2} - \int Y d\sigma \frac{\eta-y}{\rho^2} + \frac{d^2}{dy^2} \iint \Delta \log r d\alpha d\beta \right),$$

$$(7) P_{yy} = \frac{1}{2\omega} \left( -\int X d\sigma \frac{\xi-x}{\rho^2} + \int Y d\sigma \frac{\eta-y}{\rho^2} + \frac{d^2}{dx^2} \iint \Delta \log r d\alpha d\beta \right),$$

$$(8) P_{xy} = \frac{1}{2\omega} \left( \int X d\sigma \frac{\eta-y}{\rho^2} + \int Y d\sigma \frac{\xi-x}{\rho^2} - \frac{d^2}{dxdy} \iint \Delta \log r d\alpha d\beta \right).$$

## § 4.

1° *Cas de la dilatation simple.* — Dans ce cas  $\Delta = 0$ , par hypothèse. Les formules ci-dessus donnent la solution générale :

$$(9) P_{xx} = \frac{1}{2\omega} \left( \int X d\sigma \frac{\xi-x}{\rho^2} - \int Y d\sigma \frac{\eta-y}{\rho^2} \right),$$

$$(10) P_{yy} = \frac{1}{2\omega} \left( -\int X d\sigma \frac{\xi-x}{\rho^2} + \int Y d\sigma \frac{\eta-y}{\rho^2} \right),$$

$$(11) P_{xy} = \frac{1}{2\omega} \left( \int X d\sigma \frac{\eta-y}{\rho^2} + \int Y d\sigma \frac{\xi-x}{\rho^2} \right).$$

2° *Cas où la dilatation est variable.* — Si les forces latérales sont quelconques, la densité  $\Delta$  change d'un point à un autre, en satisfaisant à la condition

$$\frac{d^2 \Delta}{dx^2} + \frac{d^2 \Delta}{dy^2} = 0.$$

Cette équation ne suffit pas à le déterminer.

Désignons par  $F$  une fonction de la forme :

$$F = f_1[\alpha - x + \sqrt{-1}(\beta - y)] + f_2[(\alpha - x) - \sqrt{-1}(\beta - y)].$$

On voit que

$$\frac{d^2 F}{d\alpha^2} + \frac{d^2 F}{d\beta^2} = 0.$$

On établira facilement par la méthode exposée au § 2

une formule qui est une généralisation de l'équation (4)

$$(12) \int X d\sigma \frac{dF}{dz} - \int Y d\sigma \frac{dF}{d\beta} = \iint \Delta \frac{d^2 F}{dz^2} d\alpha d\beta.$$

Cette formule n'est vraie que lorsque le point  $(x, y)$  est à l'extérieur du corps.

On pourra, dans certains cas, choisir la fonction indéterminée  $F$ , de façon que l'intégrale double donne une expression de  $\Delta$ . Nous résoudrons le problème pour le cas de plaques rondes ou annulaires.

*Plaques rondes.* — Soient (fig. 13)  $M$  et  $P$  deux points intérieurs,  $Q$  le point conjugué de  $P$  tel que

$$OP \times OQ = R^2.$$

$R$  étant le rayon du cylindre.

Les coordonnées seront désignées par les lettres suivantes :

	Coordonnées rectilignes.	Coordonnées polaires.
Pour le point $M$	$\alpha, \beta$	$\delta, \omega$
$P$	$x, y$	$p, \varphi$
$Q$	$x_1, y_1$	$q, \varphi$

La densité  $\Delta$  ne devenant pas infinie dans l'intérieur du solide, son expression est développable en  $\alpha$  et  $\beta$ , ou en  $\delta$  et  $\omega$ , et sera de la forme

$$\Delta = \Sigma (A_m \delta^m \cos m\omega + B_m \delta^m \sin m\omega).$$

Considérons maintenant une fonction  $F$

$$F = -(x_1^2 - y_1^2) \log r_1 + 2x_1 y_1 \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{y_1 - \beta}{x_1 - \alpha};$$

Ses dérivées premières sont :

$$\frac{dF}{dx} = \frac{1}{r_1^2} [(x_1^2 - y_1^2)(x_1 - \alpha) + 2x_1 y_1 (y_1 - \beta)],$$

$$\frac{dF}{d\beta} = -\frac{1}{r_1^2} [(y_1^2 - x_1^2)(y_1 - \beta) + 2x_1 y_1 (x_1 - \alpha)].$$

La dérivée seconde par rapport à  $\alpha$ , peut se développer en série par rapport aux variables

$$\frac{d^2 F}{d\alpha^2} = 1 + \dots + (m+1) \frac{\delta^m}{q^m} \cos m(\omega - \varphi) + \dots$$

D'après la formule (12)

$$\int X d\sigma \frac{dF}{d\alpha} - \int Y d\sigma \frac{dF}{d\beta} = \iint \Delta \frac{d^2 F}{d\alpha^2} d\alpha d\beta.$$

L'intégrale double s'écrit encore

$$\int_0^R \int_0^{2\pi} \delta \cdot d\delta \cdot d\omega \\ \times \Sigma (A_m \delta^m \cos m\omega + B_m \delta^m \sin m\omega) \times \Sigma (m+1) \frac{\delta^m}{q^m} \cos m(\omega - \varphi).$$

La sommation donne

$$\iint \Delta \frac{d^2 F}{d\alpha^2} d\alpha d\beta = \frac{\pi}{2} R^2 \Sigma \left( A_m \frac{R^{2m}}{q^m} \cos m\varphi + B_m \frac{R^m}{q^m} \sin m\varphi \right).$$

Or,  $\frac{R^{2m}}{q^m} = p^m$ . La série  $\Sigma$  qui figure dans le second membre de cette équation représente donc la densité au point P. Celle-ci est donc égale à

$$\frac{2}{\pi R^2} \int \left( X d\sigma \frac{dF}{d\alpha} - Y d\sigma \frac{dF}{d\beta} \right).$$

*Plaque annulaire.* — Soit (fig. 14) R le rayon moyen de l'anneau,  $\varepsilon$  sa largeur, c'est-à-dire la différence des rayons extrêmes. Soit M un point de la plaque, P un point situé dans le vide central. Nous supposons que les forces d'application ne s'exercent que sur la paroi extérieure ABCD, et que la paroi intérieure  $A_1 B_1 C_1 D_1$  est libre.

La densité en M s'exprime comme ci-dessus par une série de la forme

$$\Sigma (A_m \delta^m \cos m\omega + B_m \delta^m \sin m\omega).$$

Soit F une fonction telle que

$$\frac{d^2 F}{d\alpha^2} = 1 + \dots + \frac{p^m}{\delta^m} \cos m(\omega - \varphi).$$

On en déduit, en la sommant

$$\frac{dF}{d\alpha} = \alpha + x \log r - y \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{y - \beta}{x - \alpha}, \\ \frac{dF}{d\beta} = -\beta - x \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{y - \beta}{x - \alpha} - y \log r.$$

Écrivons, comme plus haut :

$$\iint \Delta \frac{d^2 F}{d\alpha^2} d\alpha d\beta = \int X d\sigma \frac{dF}{d\alpha} - \int Y d\sigma \frac{dF}{d\beta}.$$

Le second membre est connu. Le premier a pour valeur :

$$\pi R \varepsilon \Sigma (A_m p^m \cos m\varphi + B_m p^m \sin m\varphi).$$

$\Sigma$  est la valeur de  $\Delta$  rapportée au point P. L'expression de cette fonction  $\Delta$  est donc

$$\Delta = \frac{1}{\pi R \varepsilon} \left( \int X d\sigma \frac{dF}{d\alpha} - \int Y d\sigma \frac{dF}{d\beta} \right).$$

En réalité, l'intégrale n'est établie que pour un point situé à l'extérieur du corps; mais comme elle ne subit pas de discontinuité en traversant le contour  $A_1 B_1 C_1 D_1$ , elle sera encore vraie si l'on suppose que le point P se déplace et pénètre à l'intérieur du corps. La formule donne donc la densité en un point du solide.

DISCOURS  
PRONONCÉ SUR LA TOMBE  
DE M. E. BLAVIER  
INSPECTEUR GÉNÉRAL DES MINES EN RETRAITE

le 1<sup>er</sup> juin 1887

Par M. E. LORIEUX, inspecteur général des mines.

Messieurs,

Je viens, avec une douloureuse émotion, dire un dernier adieu à l'excellent collègue et ami de mon père, qui l'a précédé de vingt années dans la tombe.

Édouard Blavier, né à Paris le 29 février 1802, était le fils d'un ingénieur en chef des mines, connu par un des plus anciens Traités sur la législation minière. Il appartenait à la forte génération des Combes et des Élie de Beaumont. Très bien doué au moral et au physique, recherché pour l'aménité de son caractère et l'agrément de son esprit, il réussissait partout sans effort apparent, par la simple mise en œuvre des ressources d'une nature parfaitement équilibrée.

Entré à l'École polytechnique en 1819, il a débuté dans la carrière des mines comme professeur à l'École des mineurs de Saint-Étienne, puis il a été successivement ingénieur ordinaire à Rennes et à Laval, ingénieur en chef au Mans, à Bordeaux, Valenciennes, Douai, Strasbourg et Paris. De 1858 à 1867, jusqu'à l'âge de sa re-

traite, il a été chargé, avec le grade d'inspecteur général, de la division minéralogique du nord-ouest. Il avait été décoré en 1844, et promu officier de la Légion d'honneur en 1860.

A deux reprises, il a quitté temporairement la carrière officielle pour faire une incursion dans le domaine de l'industrie. De 1826 à 1829, il a dirigé les mines de houille de Montjean (Maine-et-Loire), et de 1847 à 1851, les importantes mines de houille de la Compagnie d'Anzin. Dans ces deux directions, il s'est distingué par ses aptitudes techniques et administratives. Lors de ma récente inspection aux mines du Nord où, encore enfant, j'avais fait avec lui mes premières descentes, j'ai retrouvé, très vivant, son sympathique souvenir.

En dehors de ses obligations professionnelles, il s'était occupé spécialement de géologie. Il a publié notamment une Notice statistique et géologique sur les mines et le terrain à anthracite du Maine, un Essai de statistique minéralogique et géologique du département de la Mayenne et un Essai géologique sur le département de l'Orne. Nous relevons de plus, dans les *Annales des mines*, les publications suivantes : une note rédigée en collaboration avec mon père sur le gisement d'étain de la Villeder (Morbihan); un rapport concernant l'emploi de la houille maigre sur les grilles des chaudières à vapeur; un rapport sur la lampe de sûreté de Dubrulle; une notice sur le procédé suivi aux mines de Douchy (Nord) pour traverser les nappes d'eau au moyen de l'air comprimé; une note sur un compteur mécanique applicable aux machines d'extraction.

Resté seul de bonne heure avec la charge de quatre enfants, il a été le père le plus tendre et le plus dévoué. Ses trois fils, récompensant sa sollicitude, se sont suivis de près à l'École polytechnique. L'aîné, récemment enlevé par une cruelle maladie, a illustré son nom par ses

travaux sur l'électricité; le plus jeune, brave et aimable officier d'artillerie, a eu sa carrière interrompue par une mort prématurée. Un seul survit, dont nous partageons ici le triple deuil avec toute la sympathie d'une vieille amitié : il est jusqu'à présent l'unique exemple d'un ingénieur des mines ayant succédé dans la même carrière à son père et à son aïeul : devenu un grand industriel, il a pris place au Sénat, où sa vive intelligence a su déjà se faire apprécier dans les questions les plus ardues d'économie politique et financière.

La perte de ses deux fils avait profondément ébranlé notre vénérable ami, dont la forte constitution avait jusqu'alors défié les atteintes de l'âge. Il avait voulu suivre pendant un long trajet, par une saison rigoureuse, le cercueil de son premier-né; il était revenu de ce funèbre voyage, brisé de fatigue et d'émotion. A partir de ce moment, il a rapidement décliné, malgré les soins vigilants de sa fille bien-aimée, qui a été son constant soutien et qui lui a fermé les yeux.

Saluons d'un suprême hommage, avec un respect attendri, cette noble et aimable figure qui évoquait devant nous les chères images du passé, et, pour la retrouver, élevons nos regards confiants vers les régions sereines des immortelles espérances.

---

CONGRÈS INTERNATIONAL DES CHEMINS DE FER  
BRUXELLES 1885

---

RAPPORT  
DES DÉLÉGUÉS DU GOUVERNEMENT FRANÇAIS

---

En 1885, lorsqu'il a été question de réunir, à Bruxelles, un Congrès international des chemins de fer, le Gouvernement français a confié le soin de le représenter à :

MM. *Picard*, Conseiller d'État, Directeur général des chemins de fer;

*Brame*, Président du comité de l'exploitation technique des chemins de fer;

*Worms de Romilly*, Ingénieur en chef des mines.

M. *Picard*, qui avait préparé la participation de la France au Congrès et qui avait le vif désir d'y assister, s'en est trouvé empêché au dernier moment par des obligations de sa charge.

La mission a donc été effectivement composée de MM. *Brame* et *Worms de Romilly*; ils viennent rendre compte, dans le présent rapport, de ce qui s'est passé au Congrès.

L'ouverture de la première ligne de chemin de fer de l'Europe continentale a eu lieu, en 1835, dans le royaume de Belgique (\*).

---

(\*) Nous devons cependant rappeler que, dès 1832, le chemin de fer de Saint-Tome XI, 1887.

Une commission a été chargée, en 1884, par le Gouvernement belge d'étudier les mesures à prendre pour célébrer avec éclat le cinquantenaire de cet événement mémorable.

Dans le programme qu'elle a présenté, la commission a compris la réunion d'un Congrès des chemins de fer. Le Gouvernement belge a accueilli cette proposition et M. Van den Peereboom, Ministre des chemins de fer, Postes et Télégraphes, a nommé, par arrêté du 13 décembre 1884, une commission spéciale qui a reçu la mission d'organiser le Congrès.

Dans sa séance du 11 mai 1885, la commission a adopté un règlement dont nous résumons les dispositions principales :

« Le Congrès est placé sous le patronage de S. M. le roi des Belges et de son Gouvernement.

« Le but qui lui est assigné est de rechercher les améliorations à introduire dans la construction et l'exploitation des chemins de fer.

« En dehors des membres de la commission d'organisation et des rapporteurs sur les questions du programme, sont appelés à faire partie du Congrès les délégués officiels des divers Gouvernements et les délégués des administrations de chemins de fer ou des associations invitées par la commission à se faire représenter.

« La réunion du Congrès est fixée du 8 au 15 août 1885.

« Les questions inscrites au programme sont réparties en quatre sections correspondant aux quatre branches principales de l'industrie des chemins de fer :

- « 1<sup>re</sup> Section. — Voies et travaux ;
- « 2<sup>e</sup> Section. — Traction et matériel ;
- « 3<sup>e</sup> Section. — Exploitation ;
- « 4<sup>e</sup> Section. — Questions d'ordre général.

Étienne à Lyon a transporté des voyageurs et a employé pour la première fois la locomotive à chaudière tubulaire de Séguin.

« La langue française est adoptée pour les discussions, mais des interprètes sont mis à la disposition des membres du Congrès pour traduire les observations présentées en d'autres langues.

« Les conclusions des commissions sur les diverses questions du programme peuvent faire l'objet de vœux à émettre par le Congrès.

« Le compte rendu des travaux du Congrès sera publié par les soins de la commission directrice. »

En même temps qu'elle établissait le règlement que nous venons d'analyser, la commission organisatrice dressait le programme des questions à discuter.

Des rapporteurs ont été chargés de faire un exposé de chaque question et d'indiquer dans leurs conclusions les points que le Congrès leur paraissait pouvoir se proposer de résoudre. Ces rapports ont été imprimés et remis à chaque membre du Congrès.

L'initiative prise par le Gouvernement belge a reçu le meilleur accueil à l'étranger.

Le nombre des Gouvernements, administrations de chemins de fer ou associations qui ont adhéré au Congrès s'est élevé à 156, appartenant à 27 pays différents et représentés par 349 délégués.

PAYS REPRÉSENTÉS	NOMBRE de pays	NOMBRE d'administrations	NOMBRE de délégués
Allemagne. . . . .	1	44	17
Autriche-Hongrie. . . . .	1	13	25
Belgique. . . . .	1	28	119
Espagne. . . . .	1	8	41
France et Algérie. . . . .	1	40	21
Pays-Bas. . . . .	1	9	18
Royaume-Uni. . . . .	1	12	29
Russie. . . . .	1	22	36
Divers. . . . .	19	43	73
	27	156	349

Le 8 août 1885 a eu lieu la séance solennelle d'ouver-

ture sous la présidence de M. le Ministre des chemins de fer, postes et télégraphes, qui, dans un remarquable discours, après avoir rappelé quelques-unes des objections portées à la tribune par des hommes d'État, tant en Belgique que dans d'autres pays, lors de la présentation des projets de loi sur la construction des chemins de fer, a tracé le brillant tableau du développement que l'industrie et le commerce ont pris en Belgique, grâce à l'établissement de son magnifique réseau de voies ferrées.

M. Brame a répondu à M. le Ministre, au nom de l'Assemblée, et il a émis, en terminant, le vœu de voir la grande pensée qui a présidé à la convocation du Congrès produire tous ses fruits par la réunion de nouveaux Congrès internationaux donnant à tous les Ingénieurs l'occasion de faire connaître les résultats de leurs études et de leurs expériences.

Le Congrès a ensuite nommé Président, par acclamation, M. Fassiaux, Secrétaire général du département des chemins de fer en Belgique et Président de la commission organisatrice, et constitué ses bureaux comme il suit :

*Bureau du Congrès.*

<i>Président :</i>	M. Fassiaux (Belgique).
<i>Vice-Présidents :</i>	MM. Brame (France). Audreux-Fairbairn (Royaume-Uni). Thielen (Allemagne). Van-Kerkwijk (Pays-Bas). Werchovsky (Russie).
<i>Secrétaire général :</i>	M. de Laveleye (Belgique).
<i>Secrétaire :</i>	M. Kesteloot (Belgique).
<i>Secrétaire-adjoint :</i>	M. Holemans (Belgique).

*Bureaux de sections.*

<i>1<sup>re</sup> sect. Président :</i>	M. Von Leber (Autriche).
<i>Secrétaire principal :</i>	M. Lebon (Belgique).
<i>Secrétaires-rapporteurs :</i>	MM. Gérard (Belgique). Harten (Belgique).
<i>2<sup>e</sup> sect. Président :</i>	M. F. Almgren (Suède).
<i>Secrétaire principal :</i>	M. Hubert (Belgique).

*Secrétaires-rapporteurs :* MM. Dery (Belgique).

Hodeige (Belgique).

*3<sup>e</sup> sect. Président :* M. B. Ambrozovics (Hongrie).

*Secrétaire principal :* M. Ramaeckers (Belgique).

*Secrétaires-rapporteurs :* MM. Brumel-Flamache (Belgique).

Dery (Belgique).

Cosmann (France).

*4<sup>e</sup> sect. Présidents :* MM. Griollet (France).

Dutreux (Grand-duché de Luxembourg).

*Secrétaire principal :* M. de Laveleye (Belgique).

*Secrétaires-rapporteurs :* MM. Polain (Belgique).

J. Potier (Belgique).

Reuty (Belgique).

Les réunions par sections avaient lieu le matin, et les séances plénières l'après-midi dans le palais des Académies.

Trois excursions ont en outre été faites par les membres du Congrès, l'une à Anvers pour visiter la rade et l'Exposition universelle, les autres dans les bassins de Charleroi et de Liège. Elles ont été combinées de la manière la plus heureuse pour faire apprécier l'importance des principaux centres des industries auxquelles la Belgique doit sa richesse.

Le 15 août a eu lieu la séance de clôture.

Un banquet a été offert aux membres du Congrès par M. le Ministre des Chemins de fer, qui a porté deux toast, l'un aux Gouvernements étrangers, l'autre aux membres du Congrès.

Le Nonce a répondu au premier toast et M. Brame a été chargé de répondre au second.

Enfin, le 16 août, un cortège historique des moyens de transport depuis les temps les plus reculés jusqu'à nos jours a parcouru la ville de Bruxelles en utilisant les voies des tramways.

Ce défilé a été certainement, pour les membres du Congrès, un des plus intéressants et des plus curieux parmi les spectacles auxquels il leur a été donné d'assister.

En terminant cet historique sommaire, nous devons mentionner l'ordre qui a présidé à tous les travaux, grâce aux soins de la Commission organisatrice.

Douze questions ont été soumises au Congrès.

Pour donner une idée un peu précise des travaux accomplis par cette assemblée, nous devons résumer, à propos de chacune d'elles, le mémoire du Rapporteur et ses conclusions, la discussion dans le sein de la section ou en séance plénière et enfin les solutions adoptées ou les vœux émis par le Congrès. Nous suivrons dans cette étude l'ordre des sections et pour chaque section l'ordre des questions dans le programme.

### 1<sup>re</sup> Section.

*1<sup>re</sup> question.* — « Types des voies ferrées le mieux appropriés aux diverses lignes, suivant leur nature et leur importance. »

Le Rapporteur, M. Lebon, Ingénieur en chef, Directeur au chemin de fer du Grand-Central belge, a exposé, dans un travail très concis, l'état actuel de la question pour les lignes principales et pour les lignes secondaires et proposé un certain nombre de questions à résoudre. Nous nous contenterons de faire connaître les solutions adoptées par le Congrès à la suite des discussions soulevées par ces différentes questions.

A. Les voies sur traverses métalliques considérées au point de vue technique peuvent soutenir la concurrence des voies sur traverses en bois, aussi bien sur les lignes les plus fatiguées que sur celles qui le sont moins.

Au point de vue financier, cette concurrence est encore possible, mais il y a lieu, dans chaque cas particulier, de faire une comparaison entre les deux types de voie en tenant compte du prix des matériaux, du coût de la main-d'œuvre et de la durée probable de ces matériaux. Le résultat de la comparaison montrera à quel type de voie il faut se rallier.

Cette décision n'a été prise qu'après de longs débats, beaucoup d'Ingénieurs ne pensant pas que dans tous les cas les traverses métalliques puissent remplacer les traverses en bois. Ce doute a été de nouveau exprimé en séance plénière et un amendement a été présenté dans ce sens pour modifier comme il suit la première partie du vœu.

Les voies sur traverses métalliques suffisamment lourdes et munies d'un système d'attaches suffisamment solides, considérées au point de vue technique, etc....

L'amendement a été rejeté; néanmoins, il est certain que les traverses métalliques actuellement connues n'ont pas paru à beaucoup de membres pouvoir soutenir la comparaison avec les traverses en bois dans toutes les conditions.

Quant aux voies sur longrines métalliques, il a été établi, presque sans discussion, qu'elles n'ont pas donné jusqu'ici des résultats satisfaisants, tant au point de vue de la sécurité qu'au point de vue des frais d'entretien.

B. 1<sup>o</sup> Pour les lignes principales à grande circulation ou très fatiguées, ainsi que pour les lignes stratégiques, il y a lieu d'admettre une traverse métallique plus fortement constituée que celle à employer sur les voies secondaires ou peu fatiguées, à moins toutefois que ces dernières ne soient destinées à devenir voies principales dans un avenir peu éloigné. Pour de pareilles lignes, qui ne sont secondaires que provisoirement, il conviendra, en attendant leur transformation en voies principales, de diminuer convenablement la résistance de la voie en augmentant, dans une certaine mesure, l'écartement des traverses.

2<sup>o</sup> Pour les lignes secondaires ou peu fatiguées ne devant jamais devenir lignes principales, il convient d'employer des traverses métalliques moins fortement constituées et moins coûteuses que celles à mettre en œuvre dans les voies principales à grande circulation ou très fatiguées, ou dans les lignes stratégiques.

En ce qui concerne la forme et les dimensions les plus favorables à adopter pour la traverse métallique, le Congrès émet l'avis que les résultats des expériences entreprises jusqu'à ce jour

ne sont pas suffisamment concluants pour préconiser un type, à l'exclusion de tous les autres.

C et D. 1° Pour les lignes principales à grande circulation ou très fatiguées ainsi que pour les lignes stratégiques, il faut adopter un profil de rail à champignon de grande hauteur, afin d'augmenter sa durée eu égard à l'usure ;

2° Pour les lignes provisoirement secondaires, c'est-à-dire pouvant devenir voies principales dans un avenir peu éloigné, il convient d'adopter le même profil de rail que celui des lignes principales, sauf à diminuer convenablement la résistance de la voie, jusqu'à l'époque de la transformation de la ligne en augmentant, d'une façon rationnelle, l'écartement des traverses ;

3° Pour les lignes secondaires ne pouvant jamais devenir lignes principales, les avis sont partagés sur la façon dont la voie doit être construite : certains membres ne veulent, dans aucun cas, admettre un profil de rail différent de celui adopté dans les voies principales ; d'autres préconisent un profil de rail réduit étudié à nouveau en vue de la diminution de fatigue ; d'autres, enfin, préfèrent une solution intermédiaire et employer le profil du rail de la voie principale pris dans son ensemble, mais en réduisant la hauteur du champignon, quitte à augmenter l'écartement des traverses pour arriver à un degré de résistance de la voie en rapport avec la fatigue qu'elle doit supporter.

E. — La question posée à la 1<sup>re</sup> section était ainsi conçue :

« Quelle est la largeur de la voie la plus favorable à donner aux lignes dites d'intérêt local? »

La première section, en raison du peu de temps dont elle disposait, a cru devoir écarter cette question qui a du reste été traitée à un autre point de vue par la quatrième section.

Parmi les mémoires qui ont été présentés au Congrès et qui se rapportent à la 1<sup>re</sup> question du programme, nous citerons les plus intéressants, qui ont du reste été reproduits dans le compte rendu général.

Note de M. Bernard sur une traverse métallique.

Note de M. Le Mesurier sur les phénomènes constatés dans l'emploi des traverses métalliques en Égypte.

Note de M. Kowalski sur le choix à faire pour les essais de traverses métalliques suivant la nature de la ligne à exploiter.

Note de M. Bradford-Leslie sur l'emploi d'une traverse métallique avec entretoise et coins en fer forgé pour rails à double champignon.

Note de M. Luard sur des traverses en fer forgé pour rails Vignole employées dans le nord de l'Inde.

Note sur les traverses métalliques Post, Braet et Sévérac.

Les discussions sur la 1<sup>re</sup> question ont été du plus grand intérêt, et, parmi les membres qui y ont pris une part importante, nous devons citer M. Bricka, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, Ingénieur en chef de la voie et des bâtiments des Chemins de fer de l'État, qui a défendu avec beaucoup de chaleur la cause des traverses métalliques, et M. Kowalski, chef du service central de l'Exploitation des Chemins de fer de Bône-Guelma.

*II<sup>e</sup> question.* — « Examen et discussion des méthodes pratiques qui ont été proposées pour comparer, sous le rapport des dépenses de construction et des dépenses d'exploitation, divers projets d'un même chemin de fer conçus dans des conditions différentes de tracé et de profil. »

M. Ernest Gérard, Ingénieur au chemin de fer de l'État belge, a fait un exposé critique très complet des diverses méthodes qui permettent de calculer les dépenses d'exploitation suivant les conditions du tracé et du profil. Il a joint, comme annexes à son rapport, les règles proposées par MM. Alph. Belpaire, Baum, de Freycinet, de Szabo, Launhardt et les barèmes établis par la direction de la Traction et du Matériel des chemins de fer de l'État belge.

Conformément aux conclusions de ce rapport, le Congrès a exprimé le vœu suivant :

H. Il est désirable qu'à l'avenir, il soit mieux tenu compte, dans le choix des tracés de chemins de fer, de la corrélation rationnelle qui doit toujours exister entre le but et les moyens, entre l'importance des charges de construction et les résultats d'exploitation à atteindre.

La 2<sup>e</sup> section avait en outre cherché à préciser les points à examiner, et avait subdivisé la question en trois autres, relatives :

A. — Aux méthodes sommaires comportant des données générales et incomplètes.

B. — Aux méthodes complètes où les données et la demande sont aussi explicites que possible.

C. — A l'influence de l'emploi des rails d'acier et de locomotives plus puissantes et plus flexibles, ainsi que à l'influence du perfectionnement des freins.

Les réponses qu'elle a proposées au Congrès sur ces trois questions ont été adoptées dans les termes suivants :

A. L'emploi des formules expéditives ne doit pas être repoussé d'une façon absolue, mais ces formules ne donneraient des résultats pratiquement comparables qu'à la condition d'être établies pour chaque cas particulier et les circonstances locales pour lesquelles elles doivent être employées, dans le but de comparer ou au moins classer des variantes partielles ou des avant-projets.

B. Aucune formule générale, quelque compliquée qu'elle soit, ne peut suffire pour donner, dans chaque cas particulier, la possibilité de comparer avec une exactitude suffisante plusieurs projets complets d'un chemin de fer; au surplus, cette comparaison exige la connaissance de l'emplacement précis de chaque rampe et de chaque courbe.

Pour obtenir un résultat pratique convenable, il faudra donc, dans chaque cas particulier, tenir un compte exact de toutes les données qui, ressortant de l'étude du projet, se rapportent tant au capital de premier établissement qu'aux frais d'exploitation et aux recettes probables.

Parmi ces données, il y a lieu de considérer comme essentiel :

- 1° Le tracé détaillé en plan;
- 2° Le profil en long détaillé;
- 3° Le trafic présumé, ou tout au moins le trafic en marchandises;
- 4° Les tarifs à appliquer.

De ces données premières, on pourra déduire le mode probable d'exploitation, les frais annuels de traction, de freinage, etc.

C'est ainsi, par exemple, qu'elles conduiront à déterminer les trains kilométriques en nombre et en poids, les locomotives kilométriques en nombre, le travail dynamique exprimé soit en kilogrammètres ou en chevaux, soit au moyen d'un coefficient virtuel de résistance, etc..., et de là tous les éléments auxquels seront appliqués les coefficients pécuniaires.

C. L'emploi du rail d'acier et les progrès importants réalisés principalement dans la puissance, dans la flexibilité des moteurs et dans le perfectionnement des freins permettent de construire des chemins de fer, en pays de montagnes, dans des conditions de premier établissement plus économiques qu'antérieurement, et ce, en se basant sur des règles moins rigoureuses quant au minimum du rayon des courbes et au maximum des déclivités.

Il importe toutefois, dans tous les projets de chemins de fer, de ne recourir que le moins possible au rayon minimum des courbes et à la déclivité maximum.

Il convient également de chercher à éviter la présence simultanée, au même endroit, du rayon minimum et de la déclivité maximum.

Enfin, dans le choix de ces limites, il y a lieu de distinguer entre les lignes à circulation rapide et les lignes à circulation lente, en tenant compte également de la nature du trafic.

## 2<sup>e</sup> Section.

*III<sup>e</sup> question.* — « Principes à observer dans la construction du matériel roulant, afin d'en faciliter et d'en réglementer l'échange. »

M. E. Hubert, Ingénieur en chef à l'Administration des Chemins de fer de l'État belge, a résumé dans son rapport les tentatives faites à diverses époques pour établir l'unité technique dans le matériel roulant; il a rappelé

notamment les travaux de la conférence de Berne, dont il a reproduit le protocole final du 21 octobre 1882.

M. Banderali, Ingénieur chargé du service central du matériel et de la traction à la compagnie du Nord français, a présenté la résolution suivante, qui a été adoptée par le Congrès :

Le Congrès, reconnaissant l'utilité des délibérations de la conférence de 1882, à Berne, exprime le vœu :

1° De voir participer aux travaux ultérieurs les intéressés à l'échange du matériel roulant ;

2° Que les décisions de la conférence soient prises dans le sens le plus libéral possible et en laissant à chaque administration toutes les libertés compatibles avec la sécurité de la circulation internationale.

M. Max von Leber aurait voulu en outre faire émettre par le Congrès l'avis que la conférence de Berne devrait s'occuper des effets de surcharge mobile exercés par le matériel roulant sur la voie et les ponts métalliques.

M. Griolet, Administrateur de la compagnie du Nord français, a fait remarquer que les décisions prises à Berne auraient un caractère obligatoire pour les pays dont les gouvernements se seraient fait représenter à la conférence et auraient ensuite ratifié les décisions.

Il a été d'avis qu'il était préférable de ne pas inviter la conférence à se saisir d'une question dont la solution adoptée serait nécessairement imposée aux compagnies et pourrait entraîner les conséquences les plus graves. La justesse de cette observation a été reconnue, et la proposition de M. Max von Leber a été écartée.

« *IV<sup>e</sup> question.* — Moyens généraux de réduire les dépenses :

« *a.* D'entretien, de surveillance et de gardiennage des voies ferrées ;

« *b.* De traction et de matériel ;

« *c.* De manutention et de manœuvres dans les gares. »

MM. Dejaer et de Busschere, Ingénieurs au chemin de fer de l'État belge, ont énuméré dans leur rapport d'une manière très complète toutes les catégories de dépenses d'exploitation et signalé celles qui leur paraissaient susceptibles d'être réduites en adoptant certaines dispositions. Ils ont résumé les conclusions auxquelles cette étude les a conduits sous forme d'une série de 33 articles à soumettre au Congrès.

La 2<sup>e</sup> section n'a pas cru pouvoir examiner utilement un nombre aussi considérable de questions et elle s'est décidée à ne discuter que quelques articles choisis parmi les plus intéressants. Il n'a même pas été possible d'arriver à une conclusion ferme sur tous les points mis en discussion.

Les résolutions suivantes ont été proposées par la 2<sup>e</sup> section et adoptées par le Congrès :

Le Congrès émet le vœu de voir les ingénieurs de chemins de fer porter leurs études sur le genre de relations qui devraient exister entre les qualités des aciers, des rails et des bandages. Il serait utile également de rechercher l'influence de la température sur les différents aciers employés, celle de la résistance statique due au profil et au poids du rail par mètre courant ; enfin, il serait intéressant de déterminer la relation qui peut exister entre la résistance à la traction des aciers des bandages et le parcours kilométrique de ces derniers.

Le Congrès croit que la question du choix à faire entre les bandages coniques et les champignons bombés ou les bandages cylindriques et les champignons plats n'est pas suffisamment élucidée pour conclure, et il émet le vœu qu'il soit fait des essais sérieux et nombreux.

Le Congrès émet le vœu que les moyens de diminuer autant que possible le parcours improductif des locomotives, des voitures et des wagons doivent être recherchés de commun accord par les directions de l'exploitation, de la traction et du matériel, éminemment intéressées.

Le Congrès reconnaît que, tout en ayant soin que les locomotives ne soient pas laissées sans les réparations nécessaires, il serait désirable qu'on trouvât le moyen de leur faire faire un

parcours annuel moyen plus considérable, même en essayant d'avoir recours à deux personnels par machine.

En constatant les perfectionnements apportés dans l'outillage des ateliers et la tendance de substituer de plus en plus le travail des machines au travail à la main, le Congrès émet le vœu de voir les administrations de chemins de fer continuer dans cette voie, ainsi que dans celle de la division du travail et de l'extension du travail à la tâche.

Le Congrès exprime l'avis unanime que l'entretien du matériel doit être fait par l'exploitant lui-même, dans ses propres ateliers. L'expérience a démontré, en effet, que l'industrie privée a toujours été impuissante à exécuter ces travaux dans des conditions satisfaisantes.

Le Congrès émet le vœu que des expériences soient poursuivies, afin d'établir, au point de vue de la résistance, la comparaison entre les véhicules munis soit de trains articulés, soit d'essieux fixes, soit d'essieux à déplacement radial.

M. Belpaire, Administrateur des Chemins de fer de l'État belge, M. Regray, Ingénieur en chef du matériel et de la traction au Chemin de fer de l'Est français, dont nous avons eu à déplorer la mort récente, et M. Banderali ont pris une part importante aux délibérations; M. Banderali s'est surtout préoccupé de montrer les avantages que présenterait une utilisation plus complète des machines. L'idée d'attacher plus d'un mécanicien à une machine rencontre généralement, en Europe, une très vive opposition qui s'est naturellement manifestée dans la section; néanmoins, l'insuffisance du parcours annuel des locomotives et la nécessité de remédier à cet inconvénient, fût-ce en ayant recours à un double personnel par machine, ont été reconnues, comme le montre l'un des vœux rapportés ci-dessus.

Parmi les documents soumis au Congrès sur la IV<sup>e</sup> question, nous citerons ceux que M. Jeffery, Surintendant général de l'Illinois Central Railroad, a communiqué sur la consommation et le parcours des locomotives dans son réseau, en 1884, et sur les règles servant à déterminer

les salaires des machinistes et des chauffeurs dans la compagnie qu'il dirige.

« V<sup>e</sup> question. — Moyens généraux d'assurer la sécurité du mouvement. »

« § A. — Arrêts des trains (freins continus). Exploitation des lignes présentant de longues inclinaisons.

« § B. — Dispositions à donner au matériel pour garantir la sécurité des voyageurs (construction des voitures, moyens d'intercommunication; cordes-signal; appareils divers).

« § C. — Dispositions à suivre pour garantir la sécurité du personnel chargé des manœuvres de gare. »

Les considérations relatives à la sécurité dans les manœuvres de gare ont été exposées par les rapporteurs de la IV<sup>e</sup> question.

M. Huberti, Ingénieur, professeur à l'Université de Bruxelles, a fait un rapport très complet sur la comparaison des freins continus et sur les moyens de modérer la vitesse des trains dans le parcours des lignes présentant de longues inclinaisons.

M. Degraux, Ingénieur au chemin de fer de l'État belge, a résumé la situation actuelle sur les autres dispositions relatives à la sécurité des voyageurs.

Il était difficile au Congrès d'adopter des résolutions en faveur de tel ou tel système, à cause des conséquences *très graves* qui auraient pu résulter de ce fait. Des appareils très divers ont été essayés. Il y en a beaucoup qui ont donné, chacun dans certaines conditions d'exploitations, d'excellents résultats.

M. Banderali a particulièrement insisté sur l'utilité de ne rien faire qui pût avoir pour effet de préconiser un système aux dépens des autres, et sur l'avantage qu'il y avait à laisser à chaque compagnie la liberté et la responsabilité de ses préférences.

Le bien-fondé de ces observations a été admis et les avis suivants ont été émis :

Considérant que les freins continus ont rendu, dans ces dernières années, des services incontestés à l'exploitation des chemins de fer, le Congrès est d'avis d'en recommander l'application dans la plus large mesure, dans tous les cas où elle est compatible avec les conditions d'exploitation des diverses compagnies.

Il est désirable d'établir un système efficace d'intercommunication entre les voyageurs et les agents de trains faisant de longs trajets sans arrêt.

Considérant que, jusqu'à ce jour, aucune disposition mécanique pour l'accrochage et le décrochage des wagons en manœuvre n'a donné de bons résultats, le Congrès exprime le vœu que des recherches soient poursuivies à cet égard.

Nous devons signaler, parmi les communications faites à la 2<sup>e</sup> section, celle de M. Parent, sur les essais effectués, en France, par les chemins de fer de l'État, sous la direction de M. Ricour, Ingénieur en chef du matériel et de la traction, pour la comparaison des freins continus. Par la précision des renseignements, l'homogénéité des expériences, la netteté des résultats, ce travail important offrait un intérêt qui a été vivement apprécié.

« *VI<sup>e</sup> question.* — Application de l'électricité à l'exploitation des chemins de fer. »

M. Weissenbruch, Ingénieur au Ministère des chemins de fer, postes et télégraphes, a fait un exposé très étendu et très complet des applications de l'électricité aux chemins de fer. C'est un véritable mémoire utile à consulter, car on y trouvera le principe de presque tous les appareils expérimentés avec quelques succès. M. Weissenbruch a d'ailleurs jugé avec raison que l'on ne pouvait mettre en discussion que des questions très générales; il a proposé notamment au Congrès de se prononcer sur le degré de confiance que l'on peut accorder à l'électricité.

Il était d'avis que les moyens électriques sont aussi sûrs que les moyens mécaniques.

La question a été examinée dans une réunion des 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> sections.

Dans cette réunion, M. Sartiaux, sous-chef d'exploitation du chemin de fer du Nord, tout en se déclarant très chaud partisan de l'électricité, n'a pas cru que l'on pouvait aller aussi loin que le proposait M. Weissenbruch, et il a formulé la résolution suivante, qui a été adoptée en séance plénière :

Le Congrès constate que des progrès considérables ont été réalisés dans l'emploi de l'électricité appliquée aux chemins de fer; il est probable que des progrès nouveaux se produiront qui augmenteront notablement la sécurité, et cela est en même temps désirable.

Quant à la question de savoir si l'on doit préférer les appareils électriques aux appareils mécaniques, et réciproquement, c'est une question d'espèce, de distance, de climat, de nature d'appareil, etc..., que l'on ne peut résoudre que par une étude comparative des deux solutions en présence.

### 3<sup>e</sup> Section.

« *VII<sup>e</sup> question.* — Sécurité, rapidité dans l'exploitation. »

L'exposé sur cette question a été fait par M. Ramaeckers, Ingénieur en chef, Directeur des voies et travaux au chemin de fer de l'État belge, et M. Is. Blancquaert, Ingénieur en chef, Directeur de la traction et du matériel au chemin de fer de l'État belge.

Ce programme étendu a été l'objet, au sein de la 3<sup>e</sup> section, d'une discussion approfondie. M. Sartiaux y a pris une vive part. Il a exercé une grande influence sur les délibérations, auxquelles se sont associés activement les délégués du gouvernement français.

Les conclusions adoptées par le Congrès sur la propo-

sition de la section font nettement ressortir le courant d'idées qui a prévalu.

A. 1° Le Congrès, considérant que chaque système de voiture présente des avantages et des inconvénients dont l'importance relative varie considérablement avec la situation locale et la nature du service à assurer, émet l'avis qu'il est impossible de s'arrêter, d'une manière absolue, à un type unique répondant aux exigences multiples de chaque exploitation.

A. 2° Il est recommandable que dans l'éclairage et le chauffage des voitures de chemin de fer, les desiderata énoncés ci-après soient réalisés :

Lumière douce, fixe et blanche, en qualité suffisante pour qu'on puisse lire aisément, quelle que soit la place occupée dans la voiture ;

Emploi de peintures et de teintures de couleurs claires ;

Quantité minimum de chaleur fournie répondant à une température de 10 degrés centigrades ;

Égalité, uniformité et constance de température en chaque point du compartiment ;

Renouvellement ou ravitaillement de la source de chaleur sans incommodité pour les voyageurs et à intervalles le plus longs possible (3 heures au moins) ;

Ventilation suffisante du compartiment assurée par le système de chauffage ;

Indépendance des voitures, dans la mesure du possible, pour le chauffage et l'éclairage, chaque véhicule portant les approvisionnements qui lui sont nécessaires.

B. En dehors de certaines exceptions que justifie la situation de la ligne, il est désirable d'établir, sur les lignes à simple voie pour augmenter la sécurité de la circulation des trains, et sur toutes les lignes pour protéger la circulation ordinaire, à certains passages à niveau, placés dans des conditions défavorables, des appareils permettant d'annoncer des gares aux agents de la voie le départ des trains.

Il est souvent utile de ménager, en certains points de la route, lorsque l'espacement des gares est assez grand, les moyens de transmettre des signaux aux gares voisines.

La transmission de ces signaux doit, autant que possible, être confiée aux agents des trains.

Le Congrès constate que les appareils actuellement en usage dans plusieurs pays réalisent ces communications de la façon la

plus satisfaisante. Il émet toutefois le vœu que l'on étudie le moyen d'obtenir des appareils équivalents, à un prix notablement moindre.

C. Le block-system permissif (au sens anglais de ce mot) est celui dans lequel un train franchit les signaux de block à l'arrêt avec un simple ralentissement et sans remplir aucune formalité.

Le block-system absolu conditionnel est celui dans lequel un train franchit les signaux de block à l'arrêt après un stationnement d'une durée déterminée à l'avance et après avoir rempli certaines formalités.

Le block-system absolu est celui dans lequel un train ne franchit les signaux de block à l'arrêt qu'après un stationnement dont la durée ne peut prendre fin qu'après constatation du dérangement des appareils.

C. Le Congrès constate que, la plupart des administrations de chemins de fer ayant accepté le principe anglais du block-system, ont abandonné le block-permissif, tel qu'il était pratiqué autrefois en Angleterre.

Sauf certaines lignes placées dans des conditions spéciales, elles paraissent donner la préférence aux systèmes dits absolus, avec les différences d'interprétation que, d'une part, commande le choix entre le mode d'exploitation par la voie normalement ouverte ou par la voie normalement fermée, et que, d'autre part, nécessitent les exigences du service.

Le caractère principal de ces systèmes est que le train doit toujours s'arrêter à l'entrée d'une section dont le signal est l'arrêt.

Les appareils employés à cet effet, pour garantir le mieux possible la sécurité sans apporter d'entraves à l'exploitation elle-même, doivent satisfaire aux conditions ci-après :

1° Il est nécessaire que chaque train qui pénètre dans une section de block soit couvert ;

2° Il est nécessaire que le garde n'efface pas le signal couvrant un train qui circule dans une section, avant que ce train soit arrivé à l'extrémité de la section ;

3° Il est nécessaire que le garde devant le poste duquel passe un train, ne rende pas libre la section que ce train vient de quitter, si ce train n'est pas couvert par le signal d'entrée de la section suivante ou s'il n'est pas garé en dehors de la voie principale.

La section suit d'ailleurs avec grand intérêt les essais des divers appareils ou moyens qui sont ou pourraient être examinés, soit pour que les signaleurs puissent se rendre compte si les

trains ont effectivement quitté les sections, soit pour contrôler leur manœuvre.

D. Il est désirable qu'autant que possible, les jonctions des lignes principales soient reportées dans les stations elles-mêmes.

Lors-qu'on se décide à les placer en pleine voie, il faut autant que possible éviter de les établir en tranchée, forte courbe ou pente, chercher à remplacer la traversée à niveau par le passage au-dessus ou en-dessous, tracer les voies convergentes parallèlement l'une à l'autre, sur une certaine longueur, etc....

Dans tous les cas, il convient de munir les bifurcations de verroux, d'aiguilles et d'enclenchements qui permettent, au besoin, le passage en vitesse.

E. Il est désirable de pourvoir les ponts tournants d'appareils d'enclenchement mettant en relation le calage des ponts tournants et les signaux qui en défendent l'accès, de telle façon qu'il soit impossible de décaler le pont sans que les signaux soient à l'arrêt.

Dans tous les cas où les signaux ne sont pas à l'arrêt dans la position normale, le mécanisme qui établit cette relation doit être tel que, par le fait de la manœuvre même, il s'écoule forcément un certain temps entre le moment de la mise à l'arrêt des signaux et celui du décalage. Ce temps est au minimum celui que peut mettre un train marchant à vitesse moyenne pour franchir la distance qui sépare le signal du pont tournant.

Il est désirable enfin que, lorsque le pont est fermé, les abouts des rails du tablier et de la voie soient reliés par un véritable éclissage ou une disposition équivalente, de façon à permettre, au besoin, le passage des trains en pleine vitesse.

F. Le Congrès estime que l'application du block-system sur les lignes à double voie a pour effet d'augmenter la puissance de transport de ces lignes.

G. L'application des appareils d'enclenchement aux gares a eu pour effet d'augmenter toujours la sécurité et souvent la capacité de service de ces gares.

H. Le Congrès constate que, depuis l'origine de l'exploitation, les progrès les plus importants ont été réalisés au point de vue de la sécurité du service des chemins de fer; que, dans l'état actuel des essais poursuivis, des études entreprises par les diverses administrations, l'on est autorisé à penser que de nouvelles et nombreuses améliorations pourront encore être successivement apportées.

La conséquence nécessaire de ce perfectionnement continu

sera bien certainement l'abaissement parallèle de la proportion d'accidents. Mais, d'autre part, le Congrès constate qu'à raison de l'imperfection fondamentale des personnes et des choses, toutes les mesures déjà prises, toutes celles que l'on pourrait prendre encore n'auront jamais pour effet de supprimer absolument les accidents de chemins de fer.

La dernière résolution avait été provoquée par les déclarations un peu trop formelles présentées dans la discussion sur l'infailibilité au moins théorique de certains systèmes de signaux. La 3<sup>e</sup> section a craint que ces déclarations, qui devaient être imprimées et publiées, ne fussent prises dans un sens trop absolu par les personnes qui ne seraient pas suffisamment au courant des difficultés d'exploitation des chemins de fer. Elles auraient pu ainsi servir d'argument dangereux, dans quelques circonstances, vis-à-vis des compagnies qui n'auraient adopté aucun des systèmes auxquels on avait paru attribuer des qualités exceptionnelles sans qu'aucune protestation se fût fait entendre.

Des notes intéressantes ont été remises à la 3<sup>e</sup> section sur quelques points de la VII<sup>e</sup> question. Nous citerons les suivantes :

Manœuvre des aiguilles au moyen d'appareils à excentrique mis en mouvement par deux fils (système Siemens et Halske), par M. Asser, Ingénieur en chef de la voie et des travaux au chemin de fer hollandais.

Matériel de la compagnie internationale des wagons-lits, par M. Nagelmackers.

Sécurité, rapidité et confort dans l'exploitation des chemins de fer, par la compagnie des chemins de fer de l'Est français.

VIII<sup>e</sup> question. — « Examen des principes à observer dans l'établissement des gares à faible trafic, des gares importantes destinées au service des voyageurs ou à la formation des trains ou au service des marchandises, et

enfin des gares de jonction de lignes à sections différentes. »

Les rapporteurs de la VII<sup>e</sup> question se sont également chargés de l'exposé de la VIII<sup>e</sup> question; ils ont joint à leur rapport une note succincte relative aux appareils Armstrong, établis sur les quais du port d'Anvers.

M. Cossmann, Inspecteur de l'Exploitation des Chemins de fer du Nord français, a fait remarquer combien il serait difficile de résoudre en Congrès une question aussi grave et aussi complexe, et il a proposé de soumettre au Congrès la résolution suivante, qui a été adoptée en séance plénière :

Le Congrès émet le vœu que chaque administration de chemin de fer veuille bien, dans des notes accompagnées de plans qui seraient ultérieurement reproduits par ses soins, faire connaître les caractères principaux des dispositions dont elle fait usage dans l'établissement de ses gares.

Deux documents répondant au vœu formulé avaient été déposés, l'un par M. Drouin, Inspecteur général des chemins de fer portugais de la Beira-Alta, sur la disposition à donner aux gares à faible trafic; l'autre, par M. H. Footner, Ingénieur en chef du service des manœuvres du « London and Nord-Western Railway », sur son nouveau système de gares de triage appliqué à Edge-Hill (Liverpool).

*IX<sup>e</sup> question.* — « Organisation du service des gares communes et des trains communs. — Partage des dépenses de premier établissement et d'exploitation. — Organisation du service d'échange entre les gares distinctes situées dans une même localité et reliées ou non par rails. »

M. Matrot, Chef de l'exploitation des chemins de fer de l'État français, a fait l'exposé de la question et in-

diqué les systèmes qui paraissent pouvoir être appliqués.

La discussion, à laquelle ont pris surtout part pour la France M. Sartiaux et M. Sampité, Ingénieur en chef adjoint au chef d'exploitation des chemins de fer de l'État français, a fait ressortir les inconvénients des formules générales appliquées à des questions aussi complexes et qui exigent des solutions différentes dans chaque cas.

On est tombé d'accord sur un projet de résolution qui a été adopté par le Congrès avec une légère modification.

La rédaction définitive est conçue dans les termes suivants :

Il est désirable, dans l'intérêt du public et des administrations, que, tout au moins en ce qui concerne le service des voyageurs, la communauté des gares soit établie dans les localités desservies par plusieurs lignes de chemins de fer.

Il est désirable également que les lignes distinctes d'une même localité soient reliées par rails.

Les gares communes doivent, au point de vue de la sécurité du service, être gérées par une seule administration.

La question de l'organisation des gares communes, ainsi que celle du partage des dépenses de loyer et d'exploitation, ne peut être résolue d'une manière générale. C'est une question d'espèce, dépendant des situations respectives des administrations en présence, de l'importance et de la nature du trafic, des conditions et de la durée du service de chaque ligne, des dépenses évitées à la ligne reçue ou faites par la ligne recevante pour l'établissement de la gare commune, etc., etc.

Le Congrès pense, d'ailleurs, que, lorsqu'il s'agit de la réception d'une ligne secondaire ayant le caractère d'affluent, il est équitable que l'administration recevante lui accorde certaines facilités tenant compte de ce rôle d'affluent.

La seule règle à observer, c'est que le régime soit équitable pour toutes les parties, les tribunaux ou les autorités compétentes ayant, en cas de désaccord, à trancher la question par les voies ordinaires.

Dans tous les cas, le Congrès estime qu'il est utile, lorsque l'expérience a prononcé, de substituer au mode provisoirement admis pour la répartition des dépenses, une formule très simple,

susceptible d'être périodiquement révisée et facilitant les opérations de décompte.

Les règles à suivre pour le partage des dépenses de premier établissement et d'exploitation des gares communes a fait l'objet de trois communications intéressantes remises au Congrès, l'une par M. Drouin, inspecteur général des chemins de fer de la Beira-Alta, l'autre par M. Grierson, directeur général du Great-Northern Railway, la dernière par la compagnie de l'Est français.

#### 4<sup>e</sup> Section.

X<sup>e</sup> question. — « Rôle et avenir des voies secondaires (chemins de fer vicinaux) comme affluents de transport comparativement aux chemins d'intérêt général. — Examen et discussion :

« A. — Des principes d'une entente pour faciliter et étendre les rapports entre les lignes de natures diverses.

« B. — Des systèmes d'exploitation les plus économiques pour les lignes à faible trafic. »

M. de Bruyn, président de la Société nationale des chemins de fer vicinaux, a exposé la question sous toutes ses faces et indiqué les solutions qui lui semblent découler d'une étude attentive des faits. Il conclut à l'emploi de la voie étroite, au cumul des attributions chez tous les agents, enfin à l'emploi du tarif dit naturel comme le plus simple et le plus facile à appliquer par des agents peu intelligents.

A l'appui de son rapport, M. de Bruyn a donné les lois et cahier des charges qui régissent les chemins de fer vicinaux en Belgique et les statuts de la société qui a été constituée pour les construire.

M. Level, directeur de la Société générale des chemins de fer économiques, a pris une grande part à la discussion et a fait ressortir le caractère particulier des che-

mins de fer secondaires en Belgique, où ils sont construits avec le concours financier de l'État et où l'État se réserve, en échange, d'intervenir dans la tarification, de manière à empêcher ces lignes de troubler l'économie générale de son réseau. Il a combattu le système des petites lignes isolées et celui du tarif dit naturel.

Après une longue discussion dans laquelle est activement intervenu M. Griolet, administrateur du chemin de fer du Nord, qui présidait la 4<sup>e</sup> section, les résolutions suivantes ont été adoptées :

1<sup>o</sup> Les chemins de fer secondaires ou vicinaux doivent être considérés uniquement comme affluents de transport et établis de manière à ne pas dévier de leur but.

2<sup>o</sup> Alliées des chemins de fer d'intérêt général avoisinants, les entreprises de lignes secondaires doivent trouver auprès de ces administrations d'État ou de Sociétés privées un accueil bienveillant, un concours assuré et des facilités, notamment en ce qui concerne :

A. L'installation des gares communes, la répartition des charges et des dépenses de ces gares;

B. L'échange des marchandises;

C. La constitution du capital de premier établissement aux conditions les plus économiques;

D. Le transport des matériaux nécessaires à la construction;

E. La réparation du matériel roulant.

3<sup>o</sup> Étant donné qu'en principe, les chemins de fer vicinaux doivent être construits sur les routes déjà établies, chaque fois que les circonstances le permettent, le Congrès émet le vœu que les États, les provinces et les communes accordent à ces entreprises, pour l'usage des routes, l'établissement de la voie et des gares, ainsi qu'en ce qui concerne le service de l'exploitation, toutes les facilités compatibles avec la circulation sur les voies ordinaires.

4<sup>o</sup> Le Congrès recommande l'emploi de la voie étroite pour les lignes d'intérêt secondaire, ce système amenant des économies dans la construction et l'exploitation qui ne peuvent être obtenues avec la voie normale.

Il émet également le vœu que certains types de voie étroite (0<sup>m</sup>,75 ou 1 mètre par exemple) soit unanimement adoptés, à

l'exclusion des types intermédiaires, et que les compagnies d'intérêt local d'une même région, voisines et susceptibles d'avoir des relations de transport, adoptent un type uniforme d'écartement de voie et d'attelage.

5° Le Congrès exprime l'opinion que les opérations du transbordement ne sauraient être considérées comme un obstacle au développement des chemins de fer à voie étroite.

6° Le Congrès estime que les tarifs des chemins de fer vicinaux doivent offrir une plus grande élasticité, en raison de la situation spéciale de chacune de ces lignes. Il émet, en conséquence, le vœu que les gouvernements accordent dans les cahiers des charges des maxima de tarifs notablement supérieurs à ceux des chemins de fer à grande section, et laissent aux concessionnaires une plus grande liberté dans l'application des tarifs ainsi que des facilités plus grandes dans les conditions de construction et d'exploitation.

Mentionnons deux notes remises au congrès par M. Perk, secrétaire de la Commission permanente militaire des chemins de fer des Pays-Bas, et par M. Grierson, directeur général du Great-Western Railway, la première relative à l'influence exercée par les tramways sur les transports des chemins de fer d'intérêt général, la deuxième relative aux lignes d'embranchements (branchlines).

*XI<sup>e</sup> question.* — « Étude des mesures qui pourraient être généralisées pour assurer, autant que possible, le repos des dimanches aux agents du chemin de fer. »

L'exposé a été fait par M. le baron Prisse, directeur gérant du chemin de fer d'Anvers à Gand.

Le Congrès s'est rallié à une rédaction qui recommande d'accorder aux agents du chemin de fer un repos périodique. En voici les termes :

Le Congrès exprime l'opinion que, tant dans l'intérêt du personnel actif des chemins de fer que dans celui de la bonne marche des services, il y a lieu d'étendre le système du repos périodique, de faire coïncider le repos, dans la mesure du

possible, avec le dimanche ou un jour de fête, et de provoquer à cet effet les ententes qui pourraient être nécessaires entre les administrations de chemins de fer.

En Angleterre, le service des chemins de fer est considérablement réduit le dimanche. M. Grierson a fait connaître dans une note ce qui se passe sur le Great-Western Railway. Dans ce réseau, le parcours des trains des dimanches ne représente que les 3,70 p. 100 des parcours totaux des trains de voyageurs et les 6,03 p. 100 de ceux des trains de marchandises. Sur les 13.407 hommes du service de l'exploitation, il y en a 4.413 occupés le dimanche et 319 d'entre eux seulement sont occupés *tous les dimanches*, soit pendant une partie de la journée, soit pendant la journée entière. Pour le matériel et la traction, les nombres correspondants sont respectivement de 14.551, 1.574 et 104.

*XII<sup>e</sup> question.* — « Accord à établir entre les diverses exploitations de chemins de fer pour arriver à l'adoption d'une classification uniforme des dépenses et des recettes et d'un type de compte rendu permettant d'établir des comparaisons utiles entre les résultats obtenus par les différentes administrations. Détermination des unités statistiques. »

M. E. Kesteloot, chef de division au Ministère des chemins de fer, postes et télégraphes en Belgique, a présenté l'exposé des tentatives déjà faites par une commission internationale qui s'est réunie à Rome, en 1877, à Berne, en 1878 et à la Haye, en 1881, pour arrêter les bases d'une statistique des chemins de fer. La commission de la Haye a arrêté, dans une série de tableaux, un questionnaire que M. Kesteloot reproduit à la suite de son rapport. Plusieurs autres documents ont été soumis au Congrès.

M. Grierson a fourni une note sur le type de comptabilité prescrit en Angleterre par l'acte de 1868. M. Cler-

mont, directeur gérant du chemin de fer de Liège à Maëstricht, a fait connaître, dans une courte communication, une formule pour calculer le prix de revient de l'unité du voyageur kilométrique, de la tonne kilométrique et du wagon à bestiaux kilométrique. M. Jeffery, surintendant général de l'Illinois central Railroad C<sup>o</sup>, a donné un exposé de l'organisation de la comptabilité du chemin de fer de l'Illinois central.

La 4<sup>e</sup> section a reconnu qu'il lui était impossible de formuler les modifications qu'il pourrait être bon d'apporter au questionnaire de la Haye, mais elle a pensé qu'il y aurait utilité à réunir les éléments d'une statistique internationale plus spécialement technique. Elle a, en conséquence, soumis au Congrès une résolution qui a été adoptée en séance plénière, sous la réserve de quelques modifications de rédaction dont les termes ont été arrêtés, conformément à une proposition de M. Griolet, pour mettre cette résolution d'accord avec un dernier vœu dont il sera question plus loin.

1<sup>o</sup> Le Congrès estimant :

Qu'il y a intérêt pour toutes les administrations de chemins de fer à être tenues au courant des progrès réalisés dans le domaine technique et des données statistiques qui mentionnent les faits accomplis, ainsi que les résultats acquis dans cet ordre d'idées;

Qu'il y a lieu de dresser le cadre d'une statistique plus spécialement technique et d'en assurer la publication, de concert avec la commission internationale de Vienne,

Émet le vœu qu'à la suite du premier Congrès international des chemins de fer, il soit institué, à Bruxelles, par le Congrès, un bureau international de statistique technique des chemins de fer.

2<sup>o</sup> Le Congrès émet, en outre, le vœu que les gouvernements et les administrations de chemins de fer continuent à faciliter la réunion des éléments nécessaires à la publication, par la commission internationale de Vienne, de la statistique générale des chemins de fer, ainsi que la publication de la statistique spé-

ciale technique des chemins de fer par les soins du bureau international à constituer par le Congrès.

En séance plénière, M. Pinheiro, délégué du gouvernement brésilien, a proposé d'instituer une délégation permanente destinée à servir de lien entre le Congrès actuel et le prochain Congrès des chemins de fer.

Après une courte discussion, cette proposition a été adoptée et a donné lieu au vœu suivant :

La commission organisatrice du Congrès, assistée du bureau du Congrès, est chargée de préparer un nouveau Congrès et de lui soumettre les bases d'une association scientifique internationale ayant pour but de favoriser les progrès techniques des chemins de fer par la réunion du Congrès et de conférences, par des publications et par tous autres moyens, notamment, en facilitant les relations entre administrations de chemins de fer.

Provisoirement, la commission organisatrice du Congrès, assistée du bureau, est chargée de remplir les fonctions du bureau de la statistique technique des chemins de fer.

La commission chargée de préparer le futur Congrès a été formée de la commission organisatrice du Congrès de 1885, du bureau de ce Congrès et des quatre présidents de section.

L'exposé que nous venons de faire montre que l'échange d'idées auquel a donné lieu le Congrès de Bruxelles a permis de résoudre plusieurs questions difficiles et de préciser le but que l'on doit se proposer d'atteindre en vue de perfectionner certaines parties de l'exploitation des chemins de fer.

Les bases d'une association destinée à concentrer les efforts de toutes les compagnies pour développer les progrès de l'industrie des transports par voie ferrée ont été posées et on est en droit d'espérer que, grâce à elle, de grandes améliorations seront réalisées dans un avenir prochain.

Si l'on tient compte des difficultés inhérentes à une

première réunion de personnes, en grande partie étrangères les unes aux autres, et appartenant à des pays très différents, on est conduit à reconnaître que les résultats obtenus sont considérables. Le mérite de les avoir préparés revient au gouvernement belge et à la commission organisatrice, qui ont fait preuve d'un esprit d'initiative, d'une largeur de vues et d'un sentiment pratique auxquels on ne saurait trop rendre hommage. Nous exprimons sans contredit le sentiment de tous ceux qui ont assisté au Congrès, en attribuant le succès de cette œuvre, pour la plus grande part, au Ministre des chemins de fer, postes et télégraphes de Belgique, M. Van den Peereboom, au président du Congrès, M. Fassiaux, et à son secrétaire général, M. de Laveleye.

Qu'il nous soit permis d'acquitter envers eux une dette de reconnaissance, en les remerciant de l'excellent accueil qu'ils ont fait aux délégués du gouvernement français.

Paris, le 10 décembre 1886.

*L'Ingénieur en chef des mines, L'Inspecteur général des ponts et ch.,*

WORMS DE ROMILLY.

BRAME.

Pour copie conforme :

*Le Chef de division,*

A. ALLARY.

## RAPPORT

### AU COMITÉ TECHNIQUE DE L'EXPLOITATION DES CHEMINS DE FER

En 1885, la Belgique, prenant l'initiative d'une réunion universelle des représentants des chemins de fer, convoquait à Bruxelles un Congrès placé sous le patronage de S. M. le Roi des Belges et de son Gouvernement.

Le but qui lui était assigné était de rechercher les améliorations à introduire dans la construction et dans l'exploitation des chemins de fer.

Les sujets à traiter ont été répartis en quatre sections :

- 1<sup>re</sup> Section. Voies et travaux ;
- 2<sup>e</sup> — Traction et matériel ;
- 3<sup>e</sup> — Exploitation ;
- 4<sup>e</sup> — Questions d'ordre général.

27 États étaient représentés, appartenant à toutes les parties du monde.

Le gouvernement français avait désigné M. *Picard*, Directeur général des chemins de fer ;

M. *Brame*, Président du comité de l'exploitation technique des chemins de fer ;

M. *Worms de Romilly*, Ingénieur en chef des mines.

M. *Picard* a été retenu en France par les obligations de sa charge.

Les deux délégués français ont rendu compte de leur mission dans un rapport soumis aujourd'hui à l'appréciation du comité de l'exploitation technique. Ce rapport, très substantiel et qui est un abrégé de l'histoire du Congrès, ne saurait être résumé à son tour, sous peine de négliger les détails, tous intéressants.

J'essayerai seulement d'en faire comprendre l'importance, en espérant qu'une prochaine publication en permettra la lecture aux personnes qui s'intéressent à l'avenir des chemins de fer.

Voici les principales résolutions adoptées par le Congrès :

#### 1<sup>re</sup> Section.

Les voies sur traverses métalliques, considérées au point de vue technique, peuvent soutenir la concurrence

des voies sur traverses en bois, aussi bien sur les lignes les plus fatiguées que sur celles qui le sont moins.

Il est désirable qu'à l'avenir il soit mieux tenu compte, dans le choix des tracés de chemins de fer, de la corrélation rationnelle qui doit toujours exister entre le but et les moyens, entre l'importance des charges de construction et les résultats d'exploitation à atteindre.

### 2<sup>e</sup> Section.

Le Congrès, reconnaissant l'utilité de la conférence de 1882 à Berne, exprime le vœu :

1<sup>o</sup> De voir participer aux travaux ultérieurs les intéressés à l'échange du matériel roulant ;

2<sup>o</sup> Que les décisions de la conférence soient prises dans le sens le plus libéral possible, en laissant à chaque administration toutes les libertés compatibles avec la sécurité de la circulation internationale.

Ce vœu est aujourd'hui accompli. La conférence, reprise à Berne en 1886, a proposé une convention qui a été rectifiée par les gouvernements intéressés et qui entrera prochainement en vigueur. Les États qui n'ont pas pris part à la conférence (la Suisse n'avait convoqué que ses limitrophes) sont admis à accéder aux stipulations conclues. A cet effet, le gouvernement fédéral en a donné connaissance aux États européens continentaux.

Le Congrès reconnaît que, tout en ayant soin que les locomotives ne soient pas laissées sans les réparations nécessaires, il serait désirable qu'on trouvât le moyen de leur faire faire un parcours annuel plus considérable, même en essayant d'avoir recours à deux personnels par machine.

Il est désirable d'établir un système efficace d'intercommunication entre les voyageurs et les agents des trains faisant de longs trajets sans arrêt.

Le Congrès exprime le vœu que des recherches soient

poursuivies pour obtenir par une disposition mécanique l'accrochage et le décrochage des wagons en manœuvre.

Le Congrès constate que des progrès considérables ont été réalisés dans l'emploi de l'électricité appliquée aux chemins de fer ; il est probable que des progrès nouveaux se produiront, augmenteront notablement la sécurité, et cela est en même temps désirable.

### 3<sup>e</sup> Section.

Le Congrès, considérant que chaque système de voiture présente des avantages et des inconvénients dont l'importance relative varie considérablement avec la situation locale et avec la nature du service à assurer, émet l'avis qu'il est impossible de s'arrêter, d'une manière absolue, à un type unique répondant aux exigences multiples de chaque exploitation.

Vœux relatifs au chauffage et à l'éclairage.

Perfectionnement des appareils d'annonce des trains.

Études sur le *block-system*, les enclenchements, etc.

La conséquence nécessaire des perfectionnements recherchés sera, bien certainement, l'abaissement parallèle de la proportion d'accidents.

Mais, d'autre part, le Congrès constate qu'à raison de l'imperfection fondamentale des personnes et des choses, toutes les mesures déjà prises, toutes celles que l'on pourrait prendre encore n'auront jamais pour effet de supprimer absolument les accidents de chemins de fer.

### 4<sup>e</sup> Section.

Les chemins de fer secondaires ou vicinaux donnent lieu à plusieurs propositions.

Le Congrès exprime le vœu qu'un jour de repos soit accordé périodiquement au personnel.

Le Congrès émet le vœu qu'il soit institué, à Bruxelles, un bureau international de statistique des chemins de fer.

La commission organisatrice du Congrès actuel est chargée de préparer un nouveau Congrès et de lui soumettre les bases d'une association scientifique internationale ayant pour but de favoriser les progrès techniques des chemins de fer par la réunion de Congrès et de conférences, etc.

Cette revue sommaire des travaux du Congrès montre qu'il a touché toutes les questions soulevées par l'exploitation des chemins de fer; les unes ont reçu des solutions complètes, d'autres ont été indiquées comme devant être étudiées de nouveau. On doit attribuer une grande importance à ces résolutions, prises par des hommes très compétents, ayant acquis leur expérience en suivant des courants divers et se rencontrant pour rechercher ensemble le progrès sous toutes ses formes.

Il est donc utile de propager l'œuvre du Congrès; les chemins de fer français la connaissent, mais beaucoup d'Ingénieurs n'en ont pas une notion précise; ils l'acquerront par la lecture du rapport des délégués français qui se présente sous une forme simple à l'examen et à l'étude des personnes intéressées aux chemins de fer.

Ainsi qu'il a été dit plus haut, le Congrès n'a pas manqué de mentionner la conférence de Berne sur l'unité technique des chemins de fer; je rappellerai que cette conférence avait pour but de fixer les règles qui président à l'échange du matériel d'un pays à l'autre, au lieu de subir l'application de conditions variables et arbitraires. Une première session de la conférence, tenue en 1882, avait laissé plusieurs questions à résoudre. La session de 1886 a pu achever l'œuvre, ainsi que le Comité en a été informé. Il s'agissait de fixer les conditions pour ainsi dire indispensables relatives à l'échange du matériel; ces conditions devenaient obligatoires.

De toute autre nature est le but du Congrès.

Cette assemblée était composée, pour la plus grande partie, de représentants de compagnies de chemins de fer choisis en dehors de toute intervention des gouvernements dont les délégués n'avaient aucune attribution, aucune prérogative spéciale.

Le Congrès a discuté les questions à un point de vue purement doctrinal; il a émis des vœux qui n'ont d'autre caractère que d'indiquer l'opinion de la majorité de ses membres et qui ont été portés à la connaissance de chaque compagnie par ses représentants.

Sans doute, il ne paraîtra pas au Comité que, dans ces conditions, les travaux du Congrès soient susceptibles de recevoir une suite administrative sous forme de communication quelconque adressée aux compagnies de chemins de fer par le Ministre des travaux publics.

Le Comité pensera peut-être qu'il y aurait avantage à insérer le rapport des délégués dans les *Annales des Mines et des Ponts et Chaussées*, et même à en faire une édition spéciale, sans attendre la publication des *Annales*, édition qui serait distribuée aux fonctionnaires du Ministère des Travaux publics qui s'occupent des questions de chemins de fer (Inspecteurs généraux des Mines et des Ponts et Chaussées, ingénieurs du contrôle, membres des comités consultatif et technique, etc.); un certain nombre d'exemplaires seraient en outre mis à la disposition des compagnies.

Paris, le 1<sup>er</sup> février 1887.

L'Inspecteur général des mines

P. LUUYT.

## AVIS DU COMITÉ.

Le Comité,

Après avoir entendu le rapport de M. l'Inspecteur général Luuyt, sur le rapport de mission des délégués français au Congrès international des chemins de fer réuni à Bruxelles, en août 1885, et en avoir délibéré,

Adoptant les conclusions du rapport,

Est d'avis :

Qu'il y a lieu de vulgariser le plus possible l'œuvre du Congrès et notamment le rapport des Délégués français.

Paris, le 1<sup>er</sup> février 1887.

Pour le Président,

*L'Inspecteur général des ponts et chaussées,*  
DE LA TOURNERIE.

*Le Secrétaire,*

E. VICAIRE.

Approuvé l'insertion aux *Annales des ponts et chaussées et des mines*, et le tirage à part du Rapport des délégués français et de celui du rapporteur au Comité de l'exploitation technique.

Paris, le 18 mars 1887.

*Le Ministre des travaux publics,*

E. MILLAUD.

Pour copie conforme :

*Le Chef de division,*

A. ALLARY.

## NOTE

## SUR LES TRAVAUX DE LA COMMISSION

CHARGÉE D'ÉLABORER

## UN NOUVEAU RÈGLEMENT DE POLICE DES MINES

POUR LE ROYAUME DE SAXE

ET RÉSUMÉ DE CE RÈGLEMENT

Par M. ICHON, ingénieur des mines.

A la suite de l'explosion qui s'était produite, le 1<sup>er</sup> décembre 1879, au puits Brückenberg, près de Zwickau, et qui coûta la vie à 89 personnes (\*), le ministère des finances du royaume de Saxe institua, à la date du 11 janvier 1880, une commission chargée de la révision des prescriptions de police des mines en général.

A la suite des travaux de cette commission, l'administration des mines a élaboré, en commun avec elle, un projet de règlement qui fut approuvé par le ministère des finances et mis en vigueur le 25 mars 1886 (\*\*), sous le titre : *Prescriptions générales de police des mines pour le royaume de Saxe.*

(\*) Le compte rendu de cet accident a été donné par MM. Pernolet et Aguillon. (Rapport de mission, Allemagne, p. 93.)

(\*\*) *Allgemeine Bergpolizeivorschriften für das Königreich Sachsen vom 21 März 1886.*

Nous nous proposons, dans cette note, de donner un aperçu des travaux de la Commission, en entrant dans quelques détails seulement sur ce qui concerne le grisou et les poussières, et nous terminerons par la traduction résumée ou littérale des prescriptions particulièrement intéressantes du nouveau règlement.

## I.

**Compte rendu des travaux de la Commission.**

Les travaux de la Commission (\*) ont eu spécialement pour objet les questions se rattachant au grisou et aux poussières de charbon, c'est-à-dire celles de l'aérage, de l'éclairage et du tirage des coups de mine. Il est à noter, du reste, qu'une Commission spéciale du grisou avait préparé le terrain.

*Aérage.* — En ce qui concerne l'aérage, les travaux de la Commission ont consisté dans l'examen des installations existantes dans le pays et dans la détermination de la composition de l'air des mines en divers points et notamment dans les retours d'air. Il résulte de ces déterminations que la teneur maxima en grisou constatée dans les retours d'air de diverses houillères de la Saxe a été de 0,25576 p. 100 en volume.

La Commission, bien que reconnaissant la difficulté de prescriptions générales applicables à tous les cas, a fait exiger un minimum de deux mètres cubes d'air frais par minute et par tête d'ouvrier occupé sur le trajet d'un courant d'air direct. Elle recommande l'emploi de l'air comprimé pour l'aérage des travaux non parcourus par

(\*) *Jahrbuch für das Berg- und Hüttenwesen im Königreich Sachsen auf das Jahr, 1886, p. 1.*

un courant d'air direct. Elle a, d'ailleurs, fait prescrire l'emploi exclusif de ventilateurs dans les mines à grisou (\*) pour la production du courant d'air direct.

*Éclairage.* — Deux des membres de la Commission ont été spécialement chargés de l'examen des lampes de sûreté et ont rendu compte de cet examen dans un rapport (\*\*). Leur examen s'est d'ailleurs borné aux lampes généralement en usage en Saxe; ils se sont attachés à démontrer en particulier les avantages de la lampe à benzine de Wolf, dont, paraît-il, l'usage s'est considérablement développé en Saxe.

Les lampes expérimentées ont été les suivantes : deux lampes à huile, recevant l'air l'une par le haut, l'autre par le bas ; deux lampes à benzine établies dans les mêmes conditions, et une lampe à huile et pétrole mélangés. Toutes ces lampes sont du type le plus simple : cylindre de verre, surmonté du treillis métallique simple et sans cheminée ; dans la lampe à huile et à pétrole mélangés, il y a un double treillis juxtaposé. Les résultats obtenus par la Commission saxonne n'auraient donc de l'intérêt que pour des mines dans lesquelles un mélange gazeux explosible ne pourrait pas être animé d'une vitesse supérieure à 1 mètre par seconde, ce que la Commission admet, d'ailleurs, pour les houillères saxonnes.

Comparées entre elles, les cinq lampes examinées par la Commission saxonne ont donné les résultats suivants quant au pouvoir éclairant et à la dépense :

(\*) Voir au § 110 du règlement la définition de ces mines.

(\*\*) *Untersuchungen über Sicherheitslampen von Bergrath Kreisler und Bergrath Dr. Winkler Jahrbuch für Berg- und Hüttenwesen im Königreich Sachsen, 1884.*

NATURE DE LA LAMPE	HAUTEUR de flamme	PRIX de la consom- mation par heure	POUVOIR éclairant en p. 100 de celui de la bougie normale (*)
Lampe à benzine Wolf (air par le bas) . .	millim. 25	centimes 0,130	51,90
Id. (air par le haut) . .	25	0,126	42,83
Lampe à huile de colza (air par le bas) . .	20	0,260	33,44
Id. (air par le haut) . .	15	0,177	25,68
Lampe à huile et à pétrole (25 p. 100) . . .	25	0,350	62,33

(\*) 1000 bougies normales équivalent à 102 lampes Carcel.

Les lampes à benzine s'éteignent dans un mélange d'air et de 7 p. 100 de grisou, de même que la première des lampes à huile; la deuxième s'éteint déjà à 6 p. 100 de grisou, de même que la lampe à mélange d'huile et de pétrole.

La Commission insiste spécialement sur l'avantage résultant pour la lampe Wolf de la possibilité de la rallumer au moyen de capsules fulminantes sans l'ouvrir; elle insiste également sur le pouvoir éclairant de cette lampe qui n'est pas diminué par le charbonnage de la mèche, comme dans les lampes à huile. La Commission a constaté par des expériences directes qu'un échauffement de la benzine dans le réservoir venant de l'extérieur ne peut pas avoir, dans la pratique, d'inconvénients sérieux; à 50 degrés la flamme s'allonge à la vérité jusqu'à 40 millimètres, mais sans autre inconvénient; si l'on augmente encore la température, la flamme s'agite; puis la lampe file, et enfin à 84 degrés elle s'éteint. La température maxima que l'on a obtenue par l'échauffement propre de la lampe, en entourant le réservoir de laine, était de 50°, 2, sans que la flamme fût modifiée.

Les conclusions de la Commission sont que la lampe Wolf, si elle n'assure pas, dans toutes les circonstances,

l'impossibilité d'une communication de la flamme avec les gaz de l'extérieur, peut cependant être considérée comme suffisamment sûre pour les circonstances qui se présentent dans les houillères saxonnes.

Le nouveau règlement de police, tout en prohibant l'emploi de lampes à feu nu dans les mines à grisou, s'est abstenu de prescrire un type de lampe de sûreté. La prohibition des lampes à feu nu a fait disparaître l'usage des anciennes lampes à feu nu dites *lampes éternelles* (\*), qui avaient pour but de consumer le grisou au fur et à mesure de son dégagement.

La Commission recommande l'emploi de la lampe Pieler comme indicateur du grisou, en ajoutant qu'elle est déjà en usage dans beaucoup de houillères saxonnes.

*Tirage des coups de mine; poussières.* — Le tirage des coups de mine, notamment en présence de poussières de charbon, a donné lieu à des expériences en grand, analogues à celles que la Commission prussienne de grisou a fait exécuter, avec cette différence, toutefois, que les expériences prussiennes ont été faites avec du grisou naturel, tandis que dans les expériences saxonnes on n'a employé que du gaz d'éclairage. Des expériences sur l'inflammabilité des poussières avaient paru particulièrement importantes, puisque dans plusieurs explosions survenues en Saxe, on avait reconnu le rôle important qu'y avaient joué les poussières enflammées par des coups de mine.

La Commission avait élaboré un programme d'expériences plus nombreuses et plus variées que celles qu'elle a pu exécuter; devant, en effet, essayer les poussières de toutes les mines grisouteuses du pays, qui étaient au nombre d'une centaine, elle a dû se limiter; néanmoins, les résultats de ses expériences offrent quelque intérêt.

(\*) *Zehrlampen.*

La Commission a, d'ailleurs, opéré dans une galerie de 60 mètres de longueur (\*), à peu près pareille, comme installation, à celle de Neunkirchen, sauf qu'elle est dépourvue de l'embranchement latéral. Il n'y a que trois trous de mine : le premier dans l'axe horizontal de la galerie, profond de 94 centimètres et avec un diamètre de 40 millimètres ; les deux autres, symétriquement au-dessus et au-dessous, ont leur ouverture sur la paroi à 73 centimètres de l'axe ; leur diamètre est de 35 millimètres, leur profondeur de 80 centimètres, et ils sont inclinés sur l'axe de la galerie de telle manière que leurs axes prolongés le rencontrent à 6 mètres de la paroi.

*Essais avec la poudre ordinaire.* — Une série de cinq essais a été faite avec chacune des poussières pour l'expérimentation du tirage à la poudre, dans les conditions suivantes :

a. Trou supérieur : 200 grammes de poudre, bourrage d'argile, épandage de poussières ;

b. Trou du milieu : 300 grammes de poudre, bourrage d'argile, épandage de poussières et mise en suspension par de l'air comprimé ;

c. Trou inférieur : 200 grammes de poudre ; le reste comme à b et en plus de 1 à 2 p. 100 de gaz d'éclairage dans une chambre de 19 mètres cubes de volume établie à l'extrémité, à l'aide d'une cloison en carton bitumé posée à 6 mètres de la paroi du massif terminal de maçonnerie ;

d. Trou moyen : 300 grammes de poudre, 4 à 5 p. 100 de gaz ; le reste comme à c ;

e. Trou inférieur : 200 grammes de poudre, 7 à 8 p. 100 de gaz ; le reste comme à c.

(\*) La galerie de Neunkirchen n'avait que 50 mètres de longueur.

Il est à noter que, partout, on a mis sur la cartouche et avant la bourre d'argile un peu de poussière de charbon ; la Commission a eu pour but par là d'imiter les conditions de la pratique où le trou de mine dans le charbon, par suite du forage même, doit contenir de la poussière et où le tirage du coup de mine lui-même doit avoir pour résultat l'entraînement de particules charbonneuses. Ajoutons que, dans la pratique, le bourrage à la poussière de charbon, reconnu dangereux, a été prohibé par le règlement de police.

La quantité de poussière épandue était de 12<sup>k</sup>,5 dans chacun des essais, et l'épandage commençait à 3<sup>m</sup>,3 de la paroi ; la Commission ne semble pas avoir fait d'essais avec l'épandage de poussières sur diverses longueurs, essais dont les résultats auraient été particulièrement intéressants (\*).

Pour faciliter la comparaison, nous suivrons, dans l'exposé des résultats obtenus par la Commission saxonne, la division adoptée pour les rapports de la Commission prussienne du grisou (\*\*).

1° *Coups de mine débourrants, sans poussières ni gaz dans la galerie.* — La Commission a obtenu des flammes dont la longueur variait de 3<sup>m</sup>,5 à 5 mètres, et de 4 mètres en moyenne, c'est-à-dire moins de moitié des 9<sup>m</sup>,5 observés par la Commission prussienne du grisou avec un bourrage complet de poussière.

2° *Coups de mine débourrants en présence de poussières dans la galerie, mais en l'absence de gaz* (expériences a et b de la Commission). — Dans les expériences a, c'est-à-dire avec le coup de mine supérieur et sans agitation préalable de la poussière, celle-ci n'a été en-

(\*) La Commission se proposait de continuer les essais en 1886, en tant qu'il y aurait intérêt.

(\*\*) Analysé par M. Maxime Pellé, ingénieur des mines. (*Annales des mines*, t. IX, 3<sup>e</sup> livraison de 1886.)

flammée dans aucun cas. On ne doit pas oublier que la longueur de la flamme du coup de mine ne dépasse pas 5 mètres, tandis que l'axe du trou supérieur ne rencontre le sol de la galerie qu'à 12 mètres de distance ; toutefois il faut noter que l'on a obtenu l'inflammation des poussières, sans agitation préalable, dans des essais ultérieurs avec le coup de mine inférieur, quoique dirigé vers le haut.

Dans les expériences *b*, où la poussière a été agitée pendant environ 15 secondes avant le tirage du coup de mine à l'aide de l'air comprimé, le coup de mine moyen a enflammé 34 poussières sur 96 essayées. Dans les cas de non-inflammation, les phénomènes ont été les mêmes que dans les expériences *a* ; dans les cas d'inflammation, les flammes jaunes rougeâtres s'étendaient en général sur 20 à 35 mètres de longueur, atteignant quelquefois 40 mètres. Les flammes se propageaient assez lentement et duraient plusieurs secondes ; elles ne se produisaient parfois que quelques secondes après l'apparition de la flamme du coup de mine ; quelquefois elles revenaient en arrière. Même lorsque les flammes n'étaient pas longues, la violence des phénomènes d'explosion et l'apparition d'étincelles à une certaine distance de la paroi dénotait qu'au moins une petite fraction de la poussière avait été enflammée.

Parmi les poussières qui donnaient lieu aux phénomènes explosifs et inflammatoires, il y en avait provenant de mines qu'on doit considérer comme absolument inoffensives en ce qui concerne le grisou. La Commission conclut de ces expériences qu'elles démontrent la possibilité d'explosions sérieuses provoquées par les coups de mine dans des mines absolument dépourvues de grisou ; elle a confirmé l'observation faite ailleurs de l'augmentation de l'inflammabilité des poussières avec leur degré de ténuité.

3° *Coups de mines débouffants en présence de poussières dans la galerie et de gaz* (expériences *c, d, e*, de la Commission). — En comparant les longueurs des flammes obtenues avec du gaz seul à celles qu'a données la présence simultanée de poussières et de gaz, la Commission est arrivée aux conclusions suivantes :

Tandis qu'avec 1 1/2 et 2 p. 100 de gaz seul, la flamme s'allonge au plus d'un mètre, son allongement a varié de 5 à 44 mètres en présence des poussières mises en suspension dans l'air ; une longueur de flammes d'une vingtaine de mètres était la plus fréquente. La longueur de 49 mètres n'a été obtenue que dans un seul cas (\*). On a constaté également une augmentation sensible des effets explosifs lors de la présence simultanée de 1 1/2 à 2 p. 100 de gaz et des poussières mises en suspension dans l'air (\*\*).

Dans les expériences *d* (4 à 5 p. 100 de grisou, trou moyen avec 200 grammes de poudre), les effets de l'explosion étaient encore plus accentués. La longueur de la flamme était de plus de 30 mètres dans 25 cas, de plus de 40 mètres dans 11 cas sur 96, tandis qu'elle est de 7 à 10 mètres avec 5 p. 100 de gaz seul.

Enfin, dans les expériences *e* (7 à 8 p. 100 de gaz, trou inférieur avec 200 grammes de poudre), les flammes dépassaient en général 30 mètres ; dans 20 cas, elles furent de plus de 40 mètres, tandis qu'elles sont de 15 à 20 mètres avec 8 p. 100 de gaz seul ; cependant dans un quart des expériences *e* on a constaté une particularité

(\*) La Commission prussienne du grisou a trouvé au plus 36 mètres avec les poussières très fines de Pluto et en présence de 2 p. 100 de grisou, les trous étant bourrés à la poussière de charbon.

(\*\*) L'effet mécanique était mesuré par l'écart d'une plaque elliptique suspendue devant l'entrée de la galerie à un bras mobile ; cette plaque a une surface égale à 0<sup>m</sup>1,29, c'est-à-dire un centième de la section de la galerie.

assez remarquable: les flammes, au lieu d'être plus longues que dans les expériences *d* avec les mêmes poussières, étaient, au contraire, plus courtes de quelques mètres.

4° *Coups de mine débourants, le bourrage étant fait à l'eau, en présence de poussières dans la galerie et de gaz.* — La Commission est arrivée aux mêmes conclusions que la Commission anglaise, savoir que le bourrage à l'eau n'évite pas, dans *tous* les cas, l'inflammation de gaz et de poussières; cette inflammation et une explosion violente se produisent dans un cas en présence de 5 p. 100 de gaz seulement. La Commission ajoute, en outre, que, d'après des essais faits dans plusieurs mines, les coups de mine à la poudre avec bourrage à l'eau ne produisent pas d'effets de projection suffisants.

*Essais avec d'autres explosifs. 1° Dynamite gélatine.* — On a fait huit essais avec de la dynamite gélatine de Nobel; les coups de mine n'étaient pas bourrés, mais on enveloppait les cartouches de poussière. Sur quatre essais faits en l'absence de gaz, deux donnèrent une inflammation des poussières répandues dans la galerie en quantité de 25 kilogrammes et mise en suspension dans l'air avant le coup de mine; la flamme s'étendait à 15 mètres environ (\*). La Commission en conclut que trois explosions survenues aux mines de Hohndorf, en 1884 et 1885, d'où provenaient les poussières expérimentées et dues à des coups de mine tirés avec la même dynamite, peuvent s'expliquer en l'absence du grisou, dont la présence est difficile à admettre. Les deux autres essais, faits dans les mêmes conditions, ne donnèrent

---

(\*) La Commission prussienne n'avait pas constaté d'inflammation avec moins de 4 p. 100 de grisou, les poussières étant simplement répandues sur le sol.

pas d'inflammation; il en fut de même pour trois essais faits en présence de 1 1/2 à 2 p. 100 de gaz avec des poussières d'autre provenance. Enfin, dans le dernier essai, avec 3 à 4 p. 100 de gaz, il y eut encore inflammation jusqu'à une trentaine de mètres de distance. Les effets mécaniques furent insignifiants dans les divers cas d'inflammation.

2° *Dynamite à la guhr.* — Dans aucun des cinq essais faits en l'absence de gaz ou en présence de 2 p. 100 de gaz, les poussières ne furent enflammées; la Commission en conclut qu'on peut considérer au moins les chances d'inflammation comme faibles (\*).

La Commission a fait encore des essais avec la dynamite et le bourrage à l'eau; ces essais ont démontré, comme ceux en Angleterre et à Neunkirchen, que l'inflammation des poussières ne se produit pas dans ces conditions.

3° *Hellhoffite.* — La commission saxonne a constaté une inflammation de gaz dans une atmosphère qui en contenait 8 p. 100 en employant 50 grammes de hellhoffite liquide sans bourrage. Au contraire, avec un léger bourrage d'argile, elle n'obtint pas d'inflammation avec la même proportion de gaz et avec 25 kilogrammes de poussières facilement inflammables mises en suspension dans l'air. Les essais faits plus récemment à Neunkirchen (\*\*), par la Commission prussienne du grisou, tendent à démontrer que l'emploi de cet explosif offre un grand degré de sécurité.

---

(\*) La Commission prussienne considère la dynamite à la guhr comme cessant d'être sûre avec 4 1/2 p. 100 de grisou et même moins.

(\*\*) *Bulletin de l'industrie minière*, t. I, 1<sup>re</sup> livraison de 1887, p. 323, extrait par M. A. Simon.

## II.

**Prescriptions générales de police des mines pour le royaume de Saxe du 25 mars 1886 (\*).**

Ce règlement, fort étendu, ne comporte pas moins de 144 paragraphes. Il se divise en cinq sections.

1<sup>re</sup> section. — *Protection de la surface* (§ 1 à 8).

Cette section ne renferme comme disposition à noter que celle prescrivant aux propriétaires de mines d'avertir les propriétaires de la surface des dénivellements de terrain ou des éboulements présumables qui pourraient constituer un danger pour les personnes (§ 2).

2<sup>e</sup> section. — *Installation des puits et des machines* (§ 9 à 23).

Le § 11 prescrit pour toute mine de houille ou de lignite deux communications avec la surface pouvant servir chacune au passage de tout le personnel lorsque l'autre devient impraticable.

D'après le § 12, il peut être dérogé à cette règle : 1<sup>o</sup> pour les mines nouvelles jusqu'à la reconnaissance de couches exploitables ; 2<sup>o</sup> pour les autres mines exceptionnellement si l'administration des mines le juge admissible.

Pour les mines métalliques, la double communication n'est pas obligatoire en général ; l'administration peut l'exiger s'il s'agit d'exploitation par puits (§ 13).

On paraît s'être préoccupé spécialement des incendies des installations extérieures et des moyens d'empêcher qu'ils se communiquent aux puits. Il est dit :

« § 15, alinéa 3. Toute manipulation imprudente avec

(\*) Nous avons mis entre guillemets les parties traduites littéralement.

du feu est sévèrement interdite dans les bâtiments des puits ou dans leur voisinage immédiat. »

« § 16. Tout puits principal doit être disposé de manière à pouvoir être rapidement couvert près de la recette en cas d'incendie dans le bâtiment du puits. »

« § 17. Lorsqu'un puits constitue dans une mine l'unique issue pour les personnes, sa partie supérieure doit être maçonnée ou garnie en fer jusqu'au sol d'une galerie débouchant au jour, latéralement au puits. »

« § 18. On ne peut comprendre sous le toit d'un même bâtiment des puits jumeaux qu'avec l'approbation de l'administration des mines et sous les conditions de garantie contre les dangers d'incendie. »

Notons encore la prescription du § 20, d'après laquelle, lors de travaux à exécuter dans les puits par des ouvriers placés sur des poutres, ces ouvriers doivent être attachés à des cordes ; il doit en être de même dans les travaux de réfection d'anciens puits.

3<sup>e</sup> section. — *Exploitation des mines* (§ 24 à § 126).

Cette section, fort étendue, est en même temps la plus intéressante. Elle comprend cinq subdivisions qui ne seraient cependant pas assez nettement les matières ; ainsi les prescriptions sur l'éclairage se trouvent sous le chapitre « Aérage », et ce même chapitre renferme des prescriptions sur le tirage des coups de mine auquel est cependant consacré un chapitre spécial.

Chapitre a. — *Entretien des travaux* (§ 24 à § 34).

« § 26. Lorsque plusieurs couches de charbon superposées sont exploitées simultanément, les travaux de chaque couche devront toujours rester assez en arrière de ceux de la couche immédiatement superposée pour que ces derniers ne puissent jamais être affectés par les dépilages de la couche inférieure.

« Lorsque dans des travaux de dépilage il y a lieu de craindre, par suite d'augmentation de la pression, une

descente prématurée et subite du toit, les travaux devront être arrêtés jusqu'à ce que tout danger ait disparu, et pendant l'exécution des mesures de préservation on devra éclairer spécialement par une lanterne fermée la galerie où l'on est à l'abri du danger. »

Le § 27 renferme des prescriptions relatives à la conduite des chantiers qui doivent être disposés de manière à ne pas exposer les ouvriers et leur permettre toujours une retraite facile.

D'après le § 29, l'inspection des mines a le droit d'arrêter l'exploitation lorsqu'une mine n'a pas en approvisionnement suffisant les bois et les autres matières qui paraissent indispensables à la sécurité des travaux.

Le § 31 renferme des prescriptions sur les précautions à prendre dans le cas de percements à faire dans des travaux remplis d'eau ou de mauvais air.

Le § 32 interdit dans les travaux souterrains les feux autres que ceux nécessaires à l'exploitation; d'après le § 102, ces derniers feux ne peuvent être établis qu'avec le consentement de l'administration des mines.

Le § 34 défend l'emploi comme remblais de masses susceptibles de s'enflammer spontanément.

Chapitre *b.* — *Descenderies* (§ 35 à § 48).

Les prescriptions de ce chapitre relatives aux échelles, aux Fahrkunst, à la circulation par câble, soit sur les tonneaux vides, soit dans les cages, n'offrent pas d'intérêt spécial. Mentionnons seulement la prescription du § 44, d'après laquelle là où la descente des hommes se fait par câble, les exploitants sont tenus d'avoir des registres de câbles avec compte rendu spécial pour chaque câble.

Chapitre *c.* — *Extraction* (§ 49 à § 64).

Chapitre *d.* — *Tirage des coups de mine* (§ 65 à § 100).

Les § 65 à 76 sont relatifs à l'achat et à la conservation des matières explosives.

D'après le § 67, les ouvriers mineurs ne doivent prendre les matières explosives dont ils ont besoin qu'à l'administration de la mine dans laquelle ils travaillent.

Les produits à la nitroglycérine ne doivent être achetés qu'en cartouches qui ne peuvent être modifiées qu'en employant des précautions spéciales (§ 68).

L'emploi de la nitroglycérine en nature est interdit (§ 69).

Les dépôts de matières explosives peuvent être établis au jour ou au fond; les dépôts du fond exigent l'approbation de l'administration des mines (§ 71).

« § 74. Les dépôts souterrains pouvant contenir jusqu'à 75 kilogrammes de matières explosives devront être éloignés d'au moins 50 mètres des puits en exploitation les plus voisins et d'au moins 10 mètres des montages et galeries les plus rapprochés.

« Un dépôt souterrain ne doit pas être établi dans une galerie débouchant en ligne droite sur une galerie où l'on circule. Il doit se trouver sur le côté de la première de ces galeries dans un espace long d'au moins 4 mètres.

« Il appartient à l'administration des mines de décider si des quantités de matières explosives dépassant 75 kilogrammes peuvent être emmagasinées souterrainement et de fixer la distance du dépôt aux galeries où l'on circule. »

D'après le § 75, les dépôts souterrains doivent contenir deux chambres séparées et fermées à clef, dont la première sert à la distribution, la deuxième à la conservation des matières. Des précautions spéciales sont prescrites pour l'éclairage. La poudre ordinaire et les produits à la nitroglycérine ne doivent pas être conservés dans le même compartiment (§ 73). Les capsules ne doivent pas être conservées avec les matières explosives (§ 79).

Le § 94 interdit l'emploi de la poudre ordinaire autrement qu'en cartouches.

Pour le bourrage des explosifs à la nitroglycérine, le § 92 prescrit le sable, l'eau ou l'argile. Pour la poudre ordinaire on peut employer, outre l'argile, les roches tendres qui ne donnent pas d'étincelles. L'emploi du charbon pour le bourrage est interdit. L'emploi de bourroirs en fer est également interdit (§ 92).

Le § 97 prescrit l'allumage à l'électricité lorsque plus de quatre coups doivent être tirés simultanément, sauf difficultés locales particulières.

D'autres explosifs que la poudre ordinaire, la poudre comprimée, les explosifs à la nitroglycérine, le fulmicoton comprimé, la hellhoffite et l'explosif de Bautzen, ne peuvent être employés d'une manière régulière qu'avec approbation spéciale de l'administration des mines (§ 100).

Nous faisons suivre les prescriptions relatives au tirage des coups de mine comprises dans le chapitre de l'aérage.

« § 124. Le tirage des coups de mine à la poudre dans les travaux de mines de houille n'est pas permis si du grisou s'est montré dans le quartier durant les six derniers mois. L'administration des mines peut permettre, s'il y a lieu, l'emploi, dans ce quartier, d'autres explosifs, en fixant les conditions de cet emploi (bourrage à l'eau, etc.).

« Le tirage des coups de mine ne doit avoir lieu que d'après les indications du directeur de l'exploitation ou de son remplaçant (*Obersteiger*, maître mineur chef).

« Immédiatement avant le tirage de chaque coup de mine, une personne déléguée par le directeur ou son remplaçant doit constater soigneusement s'il n'y a pas de grisou dans un rayon de 10 mètres au moins autour du coup de mine à tirer; un examen pareil doit être fait après le tirage du coup de mine et avant la reprise du travail. »

Tous les trous de mine doivent être bourrés (voir § 92).  
Chapitre e. — *Aérage* (§ 101 à § 126).

Le § 101 indique les conditions générales que doit remplir l'aérage.

Le § 102 stipule que les foyers ou feux nus dans la mine et les foyers d'aérage au jour sont soumis au consentement de l'administration des mines.

Le § 103 prescrit le retrait des ouvriers en cas de dérangement de l'aérage.

Les chantiers où le travail a été suspendu doivent être examinés au point de vue des gaz nuisibles avant la reprise du travail (§ 106).

L'administration des mines peut exiger un plan pour l'aérage de la mine et des échantillons de l'air des galeries destinés à être analysés (§ 108).

D'après le § 110, l'administration des mines décide si une mine doit être considérée comme mine à grisou et dans quelles limites. L'alinéa premier de ce paragraphe désigne comme mines à grisou même celles où la production du grisou est seulement probable d'après les observations locales.

Ne sont considérés comme libres de grisou que les « travaux dans lesquels on ne voit pas d'auréole bleue à la flamme réduite de la lampe de sûreté et dans l'air desquels on ne peut déceler plus de 1 p. 100 de grisou. »

L'aérage doit être disposé en principe de telle manière que le courant d'air aille toujours en montant dans les travaux.

Le § 113 prescrit explicitement des ventilateurs pour produire les courants directs; ces ventilateurs doivent produire rapidement 25 p. 100 en plus de la quantité d'air habituelle.

Là où le courant direct ne passe pas, on doit chasser le grisou par le moyen de cloisons ou tuyaux d'aérage, de petits ventilateurs, etc.

« § 114. Les courants directs doivent donner au moins 2 mètres cubes d'air frais par minute et par ouvrier ré-

gulièrement occupé dans le quartier que dessert le courant.

« L'administration des mines peut pour certaines mines ou pour certains quartiers fixer un minimum différent de celui stipulé à l'alinéa premier (\*).

« L'administration des mines peut également exiger que tous les chantiers d'une mine à grisou ou certains d'entre eux reçoivent un minimum d'air par ouvrier. En général on n'exigera pas, dans ce cas, moins de 1<sup>mc</sup>,5 par minute et par homme.

« Si la quantité d'air introduite ou prescrite ne suffit pas temporairement pour maintenir tous les travaux libres de grisou, il y a lieu d'augmenter l'aérage suivant les besoins. »

L'administration des mines peut fixer la vitesse du courant d'air et les sections des galeries d'aérage; pour les galeries principales d'aérage on aura, en général, au moins 3 mètres carrés (§ 115).

La division des travaux en quartiers autant que possible indépendants au point de vue de l'aérage est prescrite par le § 116.

Les dépilages ou anciens travaux doivent être, autant que faire se peut, entourés de séparations étanches (§ 118).

« § 120. En principe, le traçage et le dépilage ne doivent commencer dans un quartier qu'après établissement de la voie d'aérage entre deux niveaux différents. »

« § 121. Dans toutes les galeries principales d'aérage doivent se trouver des stations où l'on mesure au moins une fois par semaine la vitesse du courant d'air.

« La température de l'air entrant et sortant doit être mesurée journellement; aux points où la température s'est montrée particulièrement élevée, il y a lieu de la mesurer de temps à autre.

« On doit également observer journellement la pres-

(\*) Il s'agit, bien entendu, d'un quantum plus considérable.

sion barométrique et la dépression totale du courant d'air.

« Ces observations doivent être consignées sur un registre tenu à la mine. »

*Emploi des lampes de sûreté* (§ 122). — Dans les quartiers où :

*a)* Du grisou s'est montré dans les six derniers mois;

*b)* La production de grisou paraît probable d'après les observations locales.

« On ne doit se servir que de lampes de sûreté.

« Lorsque dans un district de la mine plusieurs quartiers sont grisouteux, l'administration des mines peut prescrire l'emploi exclusif de la lampe de sûreté, pour le district entier, et même pour toute la mine.

« L'examen des chantiers prescrite au § 106 se fait avec la lampe de sûreté.

« § 123. Les travaux dans lesquels on emploie la lampe de sûreté doivent être indiqués matériellement comme tels et il n'est pas permis d'y pénétrer avec des lampes à feu nu. On ne doit y allumer aucun feu.

« § 125. Le propriétaire de la mine doit faire des prescriptions de sûreté spéciale sur les points suivants :

« *a)* Où, quand et par qui doivent être faits l'examen des travaux en ce qui concerne le grisou (§§ 103, 106 et 123), la constatation de l'aérage et les rapports à la direction sur ces examens et constatations;

« *b)* Comment doivent être indiqués les travaux où la lampe de sûreté s'emploie exclusivement;

« *c)* La conservation, l'entretien et la revision des lampes de sûreté;

« *d)* L'allumage et l'extinction, la fermeture et l'ouverture des dites lampes;

« *e)* Les autres mesures de précaution dans l'emploi de ces lampes;

« *f)* Les mesures de précaution à employer dans le tirage des coups de mine, autres que celles prévues au § 124;

« g) Les mesures de précautions éventuelles contre le développement et l'inflammation des poussières de charbon ;

« h) L'obligation des ouvriers d'avertir immédiatement des dangers qu'ils auraient reconnus.

« Ces prescriptions sont soumises à l'approbation de l'administration des mines et ne peuvent être modifiées sans son consentement. A défaut de présentation d'un projet de prescriptions après mise en demeure, l'administration des mines les établit elle-même.

« § 126. La première apparition de grisou dans une mine et toute inflammation ou explosion de grisou ou de poussières, même sans faire de victimes, doivent faire l'objet d'un avis immédiat à l'inspecteur des mines. »

Section IV. — *Ouvriers* (§§ 127 à 141).

Sous ce titre on a réuni diverses dispositions intéressant plus ou moins directement les ouvriers. Elles n'offrent pas un grand intérêt. Nous mentionnerons seulement :

« § 135. A l'endroit où il s'est produit un accident grave, rien ne doit être modifié dans l'état des lieux jusqu'à ce que l'inspection des mines ait fait son enquête locale. Il ne peut y avoir d'exception que pour le sauvetage des victimes ou pour d'autres travaux de sauvetage, ou si la sécurité de l'exploitation l'exige ; les exploitants ont à justifier au besoin leur conduite à cet égard.

« § 138. Il est interdit de fumer dans les mines. »

Section V. — *Prescriptions finales* (§§ 142 à 144).

L'administration des mines peut dispenser, dans des cas particuliers, un propriétaire de mines, de l'une ou l'autre des obligations du règlement. Sauf cette dispense, il ne peut être dérogé à ses prescriptions qu'en cas de force majeure (§ 142).

## NOTE

## SUR LES PRINCIPALES EXPLOSIONS

SURVENUES

DANS LES HOUILLÈRES ANGLAISES

EN 1883, 1884 ET 1885

Par M. ICHON, ingénieur des mines.

Les *Annales* ont publié (\*) successivement l'analyse des principales explosions qui se sont produites dans les houillères anglaises pendant les années 1880 à 1882.

Comme suite à ces notes, nous nous proposons de donner ici l'analyse des principaux accidents de même nature survenus pendant les années 1883 à 1885 inclusivement.

Ces accidents sont les suivants :

DATES.	HOUILLÈRES.	NOMBRES de tués.
7 nov. 1883.	Altham.	68
2 mars 1885.	Usworth.	40
18 juin 1885.	Clifton-Hall.	178
23 déc. 1885.	Mardy.	81

L'année 1884 a été favorisée par l'absence d'explo-

(\*) Note de M. Aguilhon, *Ann. des mines*, t. XX, 5<sup>e</sup> livr., 1881.  
— Note de M. Walckenaër, *Ann. des mines*, t. III, 8<sup>e</sup> série, 1883.

sions importantes; bien qu'il y ait eu 30 explosions dans lesquelles des personnes furent tuées, il n'y eut que 65 victimes en tout et les deux explosions les plus sérieuses comptent dans ce nombre pour 14 chacune. Ce chiffre de 65 victimes était le plus faible signalé, en Angleterre, depuis 35 ans. Par contre, l'année 1885 a été fort meurtrière; on y compte 341 victimes pour 25 explosions et, entre autres, celles précitées de Clifton-Hall, de Mardy Colliery et Usworth Colliery.

A la suite de ce résumé (\*), nous avons cru utile de rendre compte des conclusions tirées par MM. Atkinson de l'examen détaillé fait par eux des principales explosions de Durham dans les dernières années; ces conclusions ont été formulées dans un petit livre intitulé : *Explosions in coal mines*, qui a été assez remarqué en Angleterre.

#### **Explosion de Altham Colliery du 7 nov. 1883**

*Situation de la mine; couche exploitée; travaux.* — La houillère d'Altham se trouve dans le bassin du Lancashire, dans la commune d'Altham (voir le plan, Pl. IX, fig. 1).

L'exploitation de cette houillère comprenait, au moment de l'explosion, deux champs distincts, celui du puits Moorfield et celui des deux puits Whinney Hill, ces puits étant d'ailleurs reliés les uns aux autres, et le puits de sortie d'air de Whinney Hill servant en même temps de sortie d'air pour le champ de Moorfield Pit.

Les trois puits ont 3<sup>m</sup>,35 de diamètre; celui de Moorfield, situé à l'aval-pendage, a une profondeur de 260 mètres; ceux de Whinney Hill, situés à l'amont-pendage, ont 164 mètres. Dans l'une des galeries qui les relient, longue de 1.097 mètres, il y a un trainage mécanique par

(\*) Fait sur les documents officiels remis au Parlement.

câble; cette galerie est alimentée directement d'air frais dans sa partie inférieure par Moorfield Pit, dans sa partie supérieure par Whinney Hill Pit, le retour se faisant au point R.

Il n'y avait qu'une seule couche en exploitation appelée *Gannister* ou *Lower Mountain mine*; à 55 mètres au-dessus se trouve une autre couche de 0<sup>m</sup>,91 de puissance appelée *Upper Mountain*; à 16<sup>m</sup>,50 au-dessus de Lower Mountain se trouve une petite couche de 18 centimètres de puissance.

La couche Lower Mountain n'a elle-même qu'une puissance de 72 centimètres et, en conséquence, les galeries y sont extrêmement basses et évidemment fort incommodes à parcourir; l'inclinaison n'est en moyenne que de 1/7 environ.

Il ne paraît pas, d'après l'enquête et le rapport de M. l'inspecteur Dickinson, que la couche Lower Mountain fût elle-même très grisouteuse. Par contre, M. Dickinson indique que la couche Upper Mountain et les couches voisines ont, à plusieurs reprises, donné des quantités de grisou considérables, une fois à Whinney Hill même, huit ou dix ans plus tôt, d'autres fois dans des mines voisines.

Le système d'exploitation employé était celui des piliers et galeries. A Moorfield Pit, on en était encore à la période de traçage, les chantiers s'éloignant du puits; l'enlèvement des piliers n'avait commencé nulle part. Le champ d'exploitation s'étendait sur une surface d'environ 275.000 mètres carrés et comprenait trois niveaux constitués chacun par des galeries jumelles; chaque niveau est éloigné d'environ 180 mètres du voisin et les deux galeries maîtresses d'un même niveau de 11 mètres l'une de l'autre; le premier et le second niveau avaient déjà une longueur considérable, surtout vers l'est; le troisième était à peine commencé.

Les galeries de niveau partent d'un grand plan incliné appelé *Jig Brow*, lequel du puits se dirige vers le sud-est et sert à un transport mécanique par chaîne sans fin mise en mouvement par l'excédant de poids des bennes pleines. Les *bords* ou galeries de recoupe sont tracés à partir des galeries de niveau parallèlement au *Jig Brow* et les *cut throughs* ou traverses entre les *bords* leur sont perpendiculaires et dirigés sud-ouest-nord-est. L'ensemble du traçage paraît très méthodiquement exécuté, à en juger par le plan.

Ainsi que nous l'avons déjà dit, par suite de la faible puissance de la couche, les galeries ont des dimensions très restreintes. Ces dimensions sont les suivantes :

	Largeur.		Hauteur.		Surface. mèt. car.
	mèt.	mèt.	mèt.	mèt.	
Niveau . . . . .	2,13		0,915 à 1,07		environ 2,00
Bords . . . . .	2,75		0,610 à 0,75		1,85
Traverses . . . . .	2,13		0,610 à 0,75		1,40

Vu ces faibles dimensions, chaque mineur a sa petite voiture à quatre roues pour se transporter plus aisément dans les galeries où il y a des rails.

*Aérage.* — L'aérage de la mine était produit par deux foyers aidés par le foyer d'une chaudière souterraine et par la vapeur d'échappement des machines souterraines, les foyers d'aérage étant placés près des puits *Whinney Hill*. Tout le retour d'air du champ du puits *Moorfield*, réuni à celui du district 4 de *Whinney Hill*, passait sur le foyer d'aérage.

Le courant d'air qui descend par le puits *Moorfield*, sauf une fraction qui va directement au *Jig Brow*, suit d'abord la galerie de niveau n° 1, puis gagne l'avant-dernier *bord* de droite et là se divise en deux parties au point  $\delta$ . La première partie redescend vers le n° 1 au

bout duquel elle passe pour aller aérer les travaux situés en contrebas de ce niveau; puis elle contourne le puits et suit le petit quartier situé à l'ouest de la galerie de traçage mécanique qui relie les deux puits, enfin elle gagne *Whinney Hill Pit* en suivant le retour d'air à l'ouest de ladite galerie de traçage.

La seconde partie du courant d'air a à parcourir tous les travaux des niveaux n° 2 et n° 3 et son circuit est fort accidenté; elle rentre dans le retour d'air à l'est de la galerie de traçage au droit du 2<sup>e</sup> niveau.

Les parcours des deux parties sont les suivants :

1 <sup>re</sup> partie.	{	Jusqu'au retour d'air principal. . . . .	2.220 mèt.
		Dans le — — . . . . .	1.290
Ensemble. . . . .			3.510 mèt.
2 <sup>e</sup> partie.	{	Jusqu'au retour d'air principal. . . . .	4.042 mèt.
		Dans le — — . . . . .	914
Ensemble. . . . .			4.956 mèt.

On voit que la deuxième partie a un parcours considérable à faire. A cela il faut ajouter que, pour faire parcourir au courant les fronts de taille de toutes les galeries de traçage, niveaux, *bords* ou traverses, on divise ces galeries en deux, à partir de leur entrée, par une cloison en planches, et la section déjà si faible des galeries se trouve encore beaucoup plus réduite. En effet, comme on doit laisser un côté, celui de l'arrivée du courant, plus large pour le passage des hommes et du charbon, l'autre côté se trouve réduit à :

Dans les niveaux . . . . .	mèt. car. 0,84
Dans les <i>bords</i> et traverses. . . . .	0,56

Il y avait lors de l'explosion une longueur de cloisons de 450 mètres; par conséquent le courant d'air avait à faire 900 mètres dans des galeries extrêmement étroites.

Il résulte de l'enquête que la quantité moyenne d'air, passant dans le retour d'air et provenant des travaux de Moorfield Pit, aurait été de 450 mètres cubes par minute; cependant on n'est pas très affirmatif quant à l'exactitude du mesurage de ce volume.

*Grisou.* — Nous avons déjà signalé plus haut que la couche exploitée à Moorfield Pit au moment de l'explosion n'est pas très grisouteuse, mais qu'il n'en est pas de même de la couche Upper Mountain.

Le 2 février 1883, l'inspecteur des mines, M. Martin, avait constaté dans les galeries du niveau n° 1 des sorties de grisou suffisamment abondantes pour que la prescription qui défend le tirage de coups de mines, lorsque les ouvriers ordinairement occupés se trouvent à leur poste, fût applicable.

Le 13 octobre 1883, le *Report Book* enregistre un soufflard dans le chantier Bulcock, au point marqué A sur le plan. L'ouvrier Bulcock a déclaré que ce soufflard sortait d'une faille ou veine qui traversait son chantier dans la direction de la ligne pointillée; ce soufflard ne sembla pas important et le grisou put être entraîné en prolongeant la cloison d'aérage dans le chantier.

La veille de l'explosion, peu avant l'heure à laquelle Bulcock devait quitter son chantier, le grisou marqua à sa lampe. Il considéra le fait comme sans importance et n'en avertit pas, n'ayant rencontré aucun *fireman*; ceux-ci ne paraissent pas, d'ailleurs, être venus à la mine l'après-midi. D'après Bulcock, le grisou pouvait provenir du point B, chantier de Broadley. Ce dernier déclara, en effet, avoir également constaté la présence d'un peu de grisou dans son chantier après avoir entamé une veine ou faille, et, pour empêcher une chute, il posa un bois sous le toit de la faille.

Il n'est guère question de poussière dans cette explo-

sion et l'enquête ne mentionne même pas si la mine est poussiéreuse.

*Éclairage.* — Les seules lampes employées étaient des lampes Davy, sauf au bas du puits où se trouvaient des lampes à pétrole. Les lampes Davy étaient fermées à clef; l'enquête fit reconnaître que l'ouvrier occupé à la roue du haut du plan incliné *Jig Brow* possédait une clef et rallumait les lampes des ouvriers qui venaient le lui demander. Le directeur avait acheté, quelque temps avant l'explosion, trois ou quatre lampes Mueseler, mais les ouvriers n'en avaient pas voulu.

*Circonstances de l'explosion.* — L'ouvrier Bulcock ne vint pas à son chantier le matin de l'explosion ni Broadley. On a retrouvé au chantier de ce dernier sa pelle sur laquelle le *fireman* avait inscrit à la craie, le matin même de l'explosion, la marque conventionnelle indiquant que le chantier avait été reconnu accessible. Du reste, il est presque certain qu'à ce moment-là, il n'y avait encore rien de très sérieux, car ce n'est qu'une heure et demie après que les ouvriers des chantiers voisins furent rendus à leurs postes, qu'ils constatèrent la présence d'une quantité de grisou considérable. Ils se sauvèrent aussitôt du côté du puits où ils trouvèrent le directeur et un *fireman* qui, prévenus, se rendirent immédiatement dans les travaux supérieurs pour avertir les autres ouvriers et prêter secours, s'il y avait lieu. Quelques minutes plus tard l'explosion se produisit, tuant ou blessant grièvement tous les ouvriers occupés dans le puits Moorfield, sauf quelques-uns de ceux qui s'étaient réfugiés au bas du puits et quelques autres qui se trouvaient à l'extrémité des travaux du niveau n° 1. — Le nombre des tués fut de 68, celui des blessés de 39.

Il est possible que quelques-unes des victimes qui se

trouvaient au bas du puits eussent été épargnées si l'encaisseur n'avait pas refusé de les laisser monter dans la cage qui contenait déjà quelques bennes et qu'il voulait remplir. On ne put, du reste, lui en faire reproche, car il ne devait pas, en général, laisser monter les ouvriers dans la journée, et, en outre, ainsi qu'il l'a fait observer, la cage chargée d'hommes faisait un contrepoids trop faible à la cage remplie de bennes vides.

La pression barométrique avait légèrement monté depuis la veille de l'explosion; elle ne peut donc être pour rien dans les causes de l'explosion.

Il faut observer qu'en aucun point de Moorfield-Pit il n'y avait encore de dépilages; par conséquent, le toit était partout intact et il ne pouvait se produire nulle part un de ces éboulements d'ensemble susceptible de faire dégager subitement dans les travaux le grisou des couches supérieures.

*Point-origine de l'explosion.* — Les positions dans lesquelles ont été trouvées les victimes d'une part et la situation nettement définie du point où a eu lieu le dégagement du grisou, d'autre part, démontrent que le point d'inflammation a été assez éloigné du point de dégagement.

En effet, l'exploration faite par M. l'inspecteur Dickinson a bien nettement établi que le grisou s'est produit surtout au point B, chantier de Broadley, d'une part, et au point B<sub>1</sub>, dans la galerie voisine, puis en quantité moins forte en D, dans une petite traverse. Ces trois points se trouvent sur le tracé de la veine ou faille, dont nous avons déjà parlé plus haut et qui est indiquée sur le plan par une ligne pointillée. Cette veine a une largeur de 2 mètres; elle renferme de l'argile réfractaire moitié dure, moitié tendre; elle ne dérange pas la stratification des couches. Aux points B et B<sub>1</sub> il s'était produit des

chutes importantes reconnues après l'explosion; en outre, au premier de ces points il tombait un peu d'eau de la fente supérieure. Quant au grisou, il sortait violemment en ces points, avec un bruit de gargouillement qui s'entendait à 36 mètres de distance. Il n'y eut pas de diminution du soufflard pendant trois semaines; le bruit était encore très sensible après cinq semaines. Quatre mois après l'explosion, le gaz sortait encore et se maintenait dans la cavité qui montait à 3<sup>m</sup>,60 au-dessus du charbon.

Dans le voisinage immédiat de ces points de provenance évidente du grisou, on ne trouve pas de victimes; les ouvriers de ce quartier avaient pu se sauver jusqu'au puits ou au moins à une certaine distance de leurs chantiers où ils auront été asphyxiés ensuite. D'autre part, les *stoppings* ou barrages, les cloisons d'air, etc., ne furent pas démolis par l'explosion dans le voisinage immédiat des points en question, et dans toute la partie de la mine située sur la partie antérieure du courant d'air on ne trouva pas de dépôt de poussière; un pareil dépôt était au contraire abondant sur tout le parcours ultérieur du courant d'air, parcours qu'avait suivi l'explosion.

C'est dans les environs du point C, à l'ouest du *Jig Brow*, que furent trouvés des ouvriers morts tout près de leurs chantiers. Il paraît donc probable que c'est aux environs de ce point qu'il faut chercher l'inflammation du mélange explosif, et l'explosion doit être attribuée selon toute vraisemblance à ce que la flamme a été chassée hors du tamis d'une lampe. Une partie des ouvriers qui ont pu se sauver des chantiers des niveaux 2 et 3 à l'est du *Jig Brow* avaient vu le grisou s'enflammer dans leurs lampes. Il est difficile d'expliquer comment la flamme n'a pas été chassée en dehors des lampes dans cette partie où déjà la vitesse du courant d'air devait être considérable. Dans tous les cas aux en-

virons du point C la vitesse devait être probablement très forte (\*).

*Conséquences de l'explosion.* — L'explosion se produisit le 7 novembre 1883, vers 8<sup>h</sup> 45<sup>m</sup> du matin. A cette heure, les surveillants et *firemen* avaient terminé leur tournée et tous les ouvriers présents étaient au travail. L'équipe principale d'une centaine d'ouvriers, à Moorfield Pit, descendait à 6 heures du matin, et une petite équipe d'une douzaine d'hommes l'après-midi, en dehors des ouvriers à la journée ou à la pierre qui travaillaient tantôt le matin, tantôt la nuit. Trente-trois personnes, comprenant tous les ouvriers qui s'étaient sauvés de leurs chantiers, se trouvaient au bas du puits après la rentrée du directeur et d'un *fireman* dans les travaux où ceux-ci perdirent la vie. Un tourbillon de vent et de flammes descendant le *Jig Brow* s'engouffra dans le niveau n° 1, dans le puits et dans la galerie de trainage mécanique. Les cages furent coincées dans le puits et la recette du jour démolie de manière que la rentrée et la sortie par le puits Moorfield étaient devenues impossibles. Heureusement, il restait la communication avec le puits Whinney Hill, par laquelle les secours purent être organisés immédiatement.

En dehors de la démolition des cloisons d'aéragé, etc., limitée, comme nous l'avons dit, à la partie des travaux

(\*) En effet, au courant ayant parcouru les niveaux 2 et 3 à l'est du *Jig-Brow* se joignait ici la fraction d'air qui circulait directement par ce plan incliné. En admettant le chiffre de 450 mètres cubes par minute comme total mesuré dans le retour d'air, soit 7<sup>m</sup>,6 par seconde, et en supposant que la moitié seulement passât par les galeries du point C, on arrive à une vitesse de  $\frac{3,8}{0,558}$ , soit près de 7 mètres dans les retours des galeries cloisonnées; sans doute les pertes réduisaient sensiblement ce chiffre, mais les circonstances doivent néanmoins faire présenter une vitesse fort exagérée.

située sur le parcours du courant d'air au delà du dégagement de grisou, les effets mécaniques de l'explosion furent considérables dans le *Jig Brow* et les travaux supérieurs où les rails avaient été arrachés et par places brisés et tordus violemment. L'ensemble de tous les faits dénotait que la direction de l'effort principal avait été celle du sud-ouest au nord-est et conduisait encore à faire admettre que l'inflammation s'était produite aux environs du point C.

*Conclusions et remarques.* — Le jury chargé de l'examen de l'affaire conclut dans son verdict à « un *sudden outburst* de grisou, la cause de l'explosion ne pouvant être définie. »

Il nous semble, d'après ce qui précède, que les causes de l'explosion ne sauraient guère être douteuses. La division insuffisante du courant d'air et la vitesse exagérée du courant d'une part, l'emploi de lampes Davy d'autre part, expliquent suffisamment l'explosion.

Depuis cet accident, les lampes Davy ont été remplacées par des lampes Marsaut. Les *bords* ne sont poussés qu'au moment où l'on en a besoin pour l'abatage des piliers, et des recoupes sont faites à des distances plus courtes lorsque cela est nécessaire, de manière à éviter les longues cloisons.

On a aussi remplacé les foyers d'aéragé par un ventilateur. Lors des travaux de sauvetage et d'exploration à la suite de l'explosion, on avait constamment la crainte de voir s'en produire d'autres sur les foyers par le grisou que continuaient à dégager les soufflards, et si on les a évitées, c'est seulement parce qu'on a pu diluer le grisou dans le retour d'air par de l'air frais venant du puits descendant de Whinney Hill. Si l'inflammation n'avait pas eu lieu par les lampes Davy, n'aurait-elle pas pu se produire sur les foyers d'aéragé, car le volume de grisou

dégagé subitement a dû évidemment être considérable?

Nous revenons en terminant sur le dégagement de grisou qui offre quelque singularité. En effet, la veine d'argile, dans laquelle il s'est produit, avait été découpée en plusieurs points voisins par des galeries sans qu'il se fût produit rien d'anormal. Ce n'est qu'au mois d'octobre 1883 qu'on avait constaté un soufflard au points A, soufflard qui paraissait devoir être attribué à la veine d'argile. Il est probable que cette argile, assez consistante, formait un tampon au niveau de la couche de charbon et sur quelques mètres au-dessus, tampon qui n'a été sérieusement ébranlé que lorsque la galerie de Broadley est venue à son tour entamer la veine au point B. L'eau, qui s'est montrée en ce point après l'explosion, démontre bien que le tampon devait être assez étanche et assez épais, et il se peut qu'au-dessus la veine fût partiellement vide. Dans tous les cas, l'ébranlement du tampon d'argile au point B aura entraîné un autre ébranlement aux environs, c'est-à-dire aux points B<sub>1</sub> et D, et une fois la voie ouverte, le grisou, qui provenait peut-être des couches de charbon supérieures, a pu se dégager librement.

#### **Explosion de Wharnccliffe Carlton Colliery du 18 octobre 1883.**

Nous ne mentionnerons qu'en passant cette explosion qui a fait vingt victimes. Ce qui la rend particulièrement intéressante à côté de celle de Altham Colliery, c'est que la cause de l'inflammation du grisou a été probablement la même dans les deux cas, c'est-à-dire le passage de la flamme à travers le tamis d'une lampe de sûreté. Quant à la provenance du grisou, elle paraît, d'après l'inspecteur des mines, M. Wardell, devoir être attribuée à une descente du toit ou à un soulèvement du mur. Le verdict

du jury se termine par la formule fréquente « la cause ne peut être définie ». La mine a, d'ailleurs, été inondée après l'explosion à cause des feux.

#### **Explosion de Naval Steam Coal Colliery à Penygraig, le 27 janvier 1884.**

Nous n'entrons dans aucun détail au sujet de cette explosion qui n'a pas fait directement plus de 11 victimes, auxquelles se sont ajoutées malheureusement 3 victimes parmi les sauveteurs.

Il paraît avoir été établi nettement dans l'enquête que la cause de l'inflammation du grisou a été un coup de mine tiré dans un endroit où le toit était fortement fendu et où l'un des *firemen* avait déjà refusé de tirer des coups de mine pour ce motif quatre mois auparavant. Le verdict du jury fut le suivant :

« Nous convenons que la cause de la mort de..... a été accidentelle. Elle a été causée par l'explosion. Nous convenons aussi que l'explosion a été causée par le coup de mine tiré par feu William Williams, mais nous devons ajouter que le directeur aurait dû donner des ordres plus explicites pour le tirage des coups de mine, à ce moment et à cette place. »

Ajoutons qu'on enfreignait constamment, dans ce puits, la prescription formant la huitième des *General Rules* de la loi de 1872, qui défend le tirage des coups de mine lorsque les ouvriers, ordinairement occupés, sont à leur travail.

#### **Explosion de Usworth Colliery du 2 mars 1885.**

*Situation de la mine. Couches exploitées.* — La mine Usworth est située dans le bassin de Durham. Elle com-

prend (V. le plan I, Pl. X) trois puits appelés puits Victoria, Wellington et Back Shaft. Le premier d'entre eux sert de retour d'air, les deux autres sont des puits d'entrée. Ils sont foncés jusqu'à la couche Hutton à une profondeur de 311 mètres, et traversent les couches de Low Main, Maudlin et Main Coal. Le puits Wellington est divisé en deux par une cloison, et l'air descendant est ainsi lui-même divisé en deux parties : l'ouest du puits correspond à l'exploitation de la couche de Maudlin où a eu lieu l'explosion ; l'est n'en a été aucunement affecté.

*Travaux. Nature du charbon.* — Les travaux d'exploitation de la mine étaient très étendus ; le système d'exploitation est celui par piliers et galeries, les dépilages étant, d'ailleurs, déjà considérables.

Dans la partie de la couche Maudlin, alimentée par l'air du puits Wellington-Ouest, huit districts ou quartiers différents étaient en exploitation.

Le charbon de la mine est considéré comme très poussiéreux, mais sans être plus grisouteux que celui d'autres mines de la région.

*Aérage.* — L'aérage de la mine était produit par un ventilateur Guibal de 13<sup>m</sup>,72 de diamètre. Le courant d'air entrant dans les travaux de la couche Maudlin par le West Pit était de 916 mètres cubes par minute, quantité mesurée à environ 140 mètres du puits. A 516 mètres du puits, il y a un premier branchement du courant d'entrée et un deuxième à 1.920 mètres où une quantité de 280 mètres cubes environ entre dans le quartier *Hitch North* et parcourt ce quartier, ainsi que le *Low North* et le *Middle North*, faisant un chemin de 1.580 mètres avant d'arriver au dernier chantier. Les quartiers *Narrow Board*, *Crosscut* et *Right Hand* recevaient bien des branches distinctes du courant d'air frais, mais le dernier

quartier recevait en même temps tout le retour d'air des deux autres.

*Grisou. Poussières.* — Bien que la mine ne fût pas considérée comme plus grisouteuse que les autres de la région, les *deputies*, ou sous-chefs mineurs, de West-Pit avaient signalé le grisou en quatorze endroits dans les trois mois qui précédèrent l'explosion. Le 18 décembre 1884, on en trouva dans le quartier *Narrow Board* en plateure, et les places infectées ne furent débarrassées que le 24, bien que situées à 180 mètres seulement du courant d'entrée principal, ce qui tendrait à faire croire l'aérage insuffisant.

Un *sudden outburst*, ou dégagement instantané, était réputé s'être produit dans les travaux du West-Pit, dans les dix dernières années.

Avant l'explosion, les dernières traces de grisou avaient été constatées le 24 février.

Il s'amassait, en général, de fortes quantités de poussière dans les galeries, et il ne semble pas qu'on se soit préoccupé de l'enlever ou de l'arroser régulièrement.

*Éclairage.* — On se servait de lampes de sûreté des trois systèmes Davy, Geordie et Clanny. Pour allumer les mèches des coups de mine, on ouvrait la lampe, et la règle de la mine était de la refermer immédiatement. Ajoutons que l'on se servait rarement de coups de mine, mais que dans l'explosion dont il s'agit un coup de mine a été considéré comme en étant la cause.

*Circonstances de l'explosion.* — Bien qu'il n'y eût pas de baromètre dans les chantiers de la couche Maudlin, on avait pu constater par d'autres baromètres du voisinage qu'aucun abaissement anormal de la pression atmosphérique ne s'était produit.

A l'heure de l'explosion, huit heures cinquante-huit minutes du soir, il n'y avait dans les travaux qu'un poste supplémentaire en dehors des trois postes qui se partageaient la journée de neuf heures jusqu'à cinq heures de l'après-midi du lendemain. Ce poste supplémentaire, travaillant de quatre heures de l'après-midi jusqu'à une heure du matin, était composé de 8 chargeurs, de charpentiers, de mineurs au charbon et à la pierre, et de pousseurs, en tout 40 hommes dans la couche Maudlin au moment de l'explosion, et parmi eux 4 *deputies* qui avaient à examiner les travaux avant l'arrivée du poste de nuit.

Deux mineurs à la pierre, William et Samuel Brown, faisant partie du poste, avaient à enlever un morceau de rocher dans la galerie principale d'entrée de l'air entre les points 8 et 9 du plan, pour permettre la pose de quelques rails. Ils avaient été autorisés par le directeur de la mine à tirer des coups de mine pour faire leur travail, bien que, dans l'espèce, cette autorisation allât à l'encontre de la Règle générale 8 du Coal Mines Regulation Act de 1872, dont nous avons déjà parlé.

Les autres ouvriers étaient occupés en divers points des divers travaux marqués sur le plan où on a retrouvé leurs corps après l'explosion.

Les surveillants de la mine n'avaient constaté aucun symptôme dangereux lors de leur examen le jour de l'explosion.

*Point-origine de l'explosion.* — Il paraît résulter d'une manière bien nette des constatations faites après l'explosion que celle-ci a dû partir du point où se trouvaient les ouvriers Brown, les effets de l'explosion s'étant fait sentir dans les deux sens opposés à partir de ce point.

Des experts appelés par les propriétaires de la mine ont bien admis un autre point en 2 ou 3, mais cette

hypothèse répond beaucoup moins bien aux effets constatés.

En même temps que les effets mécaniques se montrent dans deux sens opposés à partir du chantier des Brown, il faut remarquer cependant qu'ils sont presque nuls jusqu'à une distance de 50 à 60 mètres de chaque côté de ce point, ce qui contribue à le faire désigner comme point-origine de l'explosion. Notons que ce point se trouve dans la galerie d'entrée d'air qui est au rocher depuis le Hitch, c'est-à-dire depuis une faille marquée sur le plan à 63 mètres à l'ouest, que la galerie descend depuis la faille et que l'aérage y était paresseux. De l'eau descendait dans cette galerie en quantité suffisante pour faire admettre que le sol fût mouillé partout, et, par conséquent, il ne pouvait se trouver de poussière sèche que sur les parois. On reconnut sur celle de gauche (sens du courant d'air) la partie d'un trou de mine et on trouva par terre, au milieu de la galerie, en face de ce point, un morceau de rocher de 50 centimètres de longueur, 35 centimètres de largeur et 30 centimètres d'épaisseur, avec l'autre partie du trou de mine. Le corps de l'ainé des Brown gisait entre la paroi et la grosse pierre, sous l'emplacement du trou de mine; celui du plus jeune était engagé en partie sous une benne vide au milieu de la galerie avec un bras et les deux jambes cassés et un profond trou dans le crâne. Une lampe Clanny fut trouvée dans le chantier, le tamis sur le réservoir, mais non fermée à clef, sans qu'on pût établir exactement à quel endroit; l'huile de cette lampe s'était répandue sur la toile métallique. Les corps des deux Brown n'étaient brûlés qu'à la partie supérieure.

*Effets de l'explosion.* — Au moment de l'explosion, le puits d'entrée d'air fut rempli d'un nuage de poussière. Les cloisons et guidages y furent dérangés sur 9 à 10 mè-

très en dessus et en dessous de la recette de Maudlin. Des bennes chargées furent poussées du côté du puits opposé à celui d'où venait l'explosion et où elles se trouvaient auparavant; l'explosion semblait, d'ailleurs, n'avoir plus exercé d'effets à quelques mètres au delà du puits.

En plusieurs points de la galerie principale d'entrée d'air, il y avait des chutes de toit importantes, qui paraissaient toutefois être une des conséquences de l'explosion.

Les bennes depuis le puits jusqu'au point origine indiqué avaient été en plusieurs endroits brisées, et même les parties hautes de la caisse étaient parfois enlevées; la direction dans laquelle s'était exercée la force était toujours celle partant du point-origine.

D'une manière générale, les cloisons ou portes d'aérage étaient poussées ou renversées vers les chantiers de défilage ou vers les galeries de retour d'air, celles-ci n'étant pour ainsi dire aucunement atteintes par l'explosion.

Au delà du point-origine dans le Narrow Board Way et le Crosscut Way, les effets mécaniques avaient encore été violents jusqu'à l'entrée des chantiers; il s'y était également produit des chutes de toit.

Les efforts des flammes furent constatés en bien des points, que nous avons marqués par des F sur le plan; ces effets étaient même sensibles en plusieurs endroits des chantiers de défilage.

La plupart des victimes avaient également été brûlées. Cependant 8 ouvriers qu'on a trouvés dans le Middle North Way et quelques autres dans le Hitch North Way n'avaient point été atteints par les effets directs de l'explosion; ils avaient parcouru des distances assez considérables après l'explosion et ils auront été asphyxiés ensuite.

En résumé, l'explosion s'était fait sentir par la galerie

principale jusqu'au puits et très peu au delà; dans le Low North District, elle avait gagné les chantiers de défilage; dans le Middle North Way, elle s'était arrêtée après les écuries, à environ 100 mètres de la galerie principale, de même dans le Lawsons Way et dans une ancienne galerie abandonnée, le Barnston Way. Dans le Hitch North Way, quoique cette galerie soit immédiatement contiguë au point-origine, elle s'était arrêtée à 60 mètres environ de la galerie principale; au contraire, elle avait parcouru le Narrow Board Way et le Crosscut Way jusqu'aux fronts de taille à plus de 600 mètres du point-origine où l'on trouva des traces de combustion et des dépôts abondants de poussière cokéfiée sur les bois et par terre.

Il est à noter que dans les galeries de roulage et d'entrée d'air on trouva relativement peu de poussière cokéfiée. A peu d'exceptions près, la poussière déposée par l'explosion se trouvait toujours sur les côtés des bois opposés à la direction d'où est venue l'explosion.

*Hypothèses émises sur les causes de l'explosion.* — Les experts commis par les propriétaires de la mine et qui admettaient, comme nous l'avons indiqué, que le point-origine de l'explosion était en 2, 3, supposaient qu'une chute importante s'était produite soit dans la galerie d'entrée d'air à l'ouest du Low North Way, soit dans les vieux travaux de ce district; que l'une ou l'autre de ces chutes avait fait sortir une grande quantité de grisou et que celui-ci s'était enflammé aux lampes de sûreté des ouvriers placés en 2 et 3. Cette hypothèse a contre elle des objections très sérieuses, et n'a guère trouvé de créance.

La seconde hypothèse a été mise en avant par les représentants de la *Durham Miners Association*. Elle consiste à admettre qu'une explosion de grisou et de pous-

sière a été causée par le tirage d'un coup de mine au chantier de Brown, le coup partant accidentellement avant la retraite des mineurs.

Enfin, la troisième hypothèse est celle de M. Atkinson, inspecteur des mines. Elle attribue l'explosion uniquement aux poussières mises en mouvement par le coup de mine. Bien que cette hypothèse paraisse difficilement admissible en présence de ce qui a été indiqué sur l'état de la galerie au rocher où la poussière ne pouvait s'accumuler que sur les parois et de ce fait que le coup de mine avait produit son effet et n'avait pas fait long feu, nous y reviendrons, parce que la même hypothèse a été appliquée par M. Atkinson aux principales explosions survenues dans le Durham dans les dernières années.

L'inspecteur des mines, M. Willis, résume son opinion, en insistant sur les objections faites aux diverses hypothèses, en ces termes :

« Je ne puis accepter entièrement la conclusion du jury; tout en étant certain que le coup de mine tiré au chantier de Brown était plus ou moins connexe avec l'explosion, je ne puis admettre que l'explosion soit due exclusivement aux poussières, et, d'autre part, la présence du grisou en quantité suffisante au chantier de Brown ne peut être expliquée par les informations que nous possédons. »

*Conclusions. Remarques.* — Le jury s'était rallié, en effet, à la seconde hypothèse, et son verdict portait :

« Mort accidentelle due à l'explosion de poussière, de grisou et d'air, provoquée par le coup de mine tiré au chantier de Brown dans la galerie au rocher. »

Il nous paraît douteux, bien que possible, d'après ce qui précède, que les poussières aient joué le rôle exclusif, au point-origine de l'explosion, que leur assigne M. Atkinson, encore qu'il soit difficile, d'autre part, d'expli-

quer la présence en ce point d'une quantité quelque peu notable de grisou, car il y passait, d'après M. Atkinson, environ 680 mètres cubes d'air absolument frais par minute. Par contre, il se pourrait que les poussières eussent seules joué le rôle de propagateur de l'explosion; nous reviendrons sur ce point en terminant.

Quant à la cause immédiate de l'inflammation, elle peut être cherchée dans le coup de mine lui-même, ou, si réellement il est parti trop tôt, dans la flamme de l'une des lampes de Brown chassée hors de son tamis par le courant plus que suffisant provoqué par le coup de mine d'un air chargé de poussière et peut-être d'une faible proportion de grisou.

Nous avons fait remarquer plus haut que ce coup de mine avait encore été tiré contrairement à la règle générale n° 8 qui défend le tirage d'un coup de mine lorsque les ouvriers ordinairement employés dans la mine s'y trouvent, et cela après un délai de trois mois après la dernière constatation de la présence du grisou. Dans cette circonstance, la poursuite du gérant et du directeur de la mine fut proposée au secrétaire d'État et ils furent condamnés chacun à 500 francs d'amende et aux frais.

#### **Explosion de Clifton Hall du 18 juin 1885.**

*Situation de la mine. Couches exploitées.* — La mine de Clifton Hall fait partie du bassin du Lancashire. Elle est située dans la commune de Clifton, à environ 6 kilomètres de Manchester. (Voir le plan, Pl. IX, fig. 2.)

Comme d'habitude, deux points voisins l'un de l'autre desservent la mine, l'un employé à l'extraction et à l'entrée de l'air, l'autre formant le retour d'air. En outre, les travaux de la mine sont en communication avec les puits de la mine voisine Agecroft appartenant aux mêmes propriétaires. Cette communication a été établie seule-

ment pour la circulation éventuelle des hommes en cas de réparation des puits ou des machines de l'une ou de l'autre des mines, les travaux étant d'ailleurs séparés par un système de quatre portes.

Les puits de Clifton Hall, foncés il y a environ cinquante ans, ont servi d'abord à l'exploitation de couches supérieures. Au moment de l'accident, on exploitait par la recette de 483 mètres, située dans la couche Trencherbone, les trois couches suivantes :

Doe-Mine . . . . .	à 386 mètr.	puissance 2 <sup>m</sup> ,84
Five-Quarters-Mine . .	à 398	couche mince
Trencherbone-Mine . .	à 488	puissance 1 <sup>m</sup> ,83

Les puits ont, en outre, recoupé à 545 mètres la Cannel Mine, mais cette couche n'était pas encore exploitée au moment de l'explosion qui s'est produite dans la Trencherbone Mine.

*Travaux dans Trencherbone Mine.* — La couche Trencherbone qui, avec les couches voisines, se trouve à peu près au milieu de la série des couches du bassin de Lancashire, varie de puissance et de composition d'un point à l'autre. Le charbon disparaît entièrement en certains points, tandis que dans d'autres la puissance atteint près de 3 mètres, le charbon étant alors généralement divisé par des bancs de schiste.

A Clifton Hall, la couche Trencherbone est formée de 1<sup>m</sup>,83 environ de beau charbon (\*), ayant pour toit d'abord 1<sup>m</sup>,80 d'un schiste sableux blanc dur, nommé pierre métallique blanche (\*\*), qui renferme à peu près 30 centimètres de charbon sans valeur, puis 19 mètres d'une roche solide appelée roche de Trencherbone.

Le système de travaux consistait dans la couche Tren-

(\*) Splint Coal.

(\*\*) White metal stone.

cherbone, comme dans les autres couches, en traçages allant au bout du champ d'exploitation et en dépilages par tailles montantes d'une largeur de 18 mètres, au milieu desquelles était ménagée une voie de descente dont les côtés étaient formés de murs soigneusement faits en pierres du toit et autres, les intervalles étant remplis de stériles; ces murs ont 2<sup>m</sup>,70 de largeur. Au bout des murs et autres points des fronts de taille le toit était soutenu par des piles de bois de 60 centimètres de longueur sur une section de 15 centimètres de côté, ou par étais ordinaires.

En général, le charbon descendant des tailles gagnait un plan incliné automoteur et ensuite un plan montant avec machine; dans quelques tailles préparées par des fendues étroites, le charbon était remonté d'abord par un treuil.

Toute la partie de la couche Trencherbone en amont des puits était dépilée; les travaux étaient également déjà fort avancés dans la partie aval où, vers l'ouest, les fronts de taille n'étaient plus qu'à 125 mètres du montage à machine; les travaux des niveaux 1 et 2 à l'est étaient encore un peu plus éloignés. Les travaux des niveaux inférieurs étaient à une distance assez grande et ceux du n° 3 est, qui ne consistaient encore qu'en trois galeries de traçage, ne communiquaient pas avec le niveau n° 2.

*Aérage.* — L'aérage de la mine est produit par un foyer établi en F près du puits du retour d'air, alimenté par le retour d'air de la couche Trencherbone, foyer qui a 2<sup>m</sup>,44 de longueur, 2<sup>m</sup>,74 de large et par les foyers de deux chaudières alimentés d'air frais; enfin la vapeur d'échappement de deux machines souterraines venait se joindre au courant d'air sortant. Le courant des gaz chauds des foyers entre dans le puits à quelques mètres

au-dessus de la couche Trencherbone et les retours d'air des couches supérieures y aboutissent au point où le puits recoupe la couche Doe, c'est-à-dire à environ 91 mètres plus haut.

Le foyer marchait constamment et consommait environ 4 tonnes de charbon en 24 heures; les chaudières en consommaient 3.

La quantité totale d'air était d'environ 2.376 mètres cubes par minute, dont 1.405 mètres cubes pour la couche Trencherbone et de ceux-ci :

1.242 mètres cubes pour les travaux courants descendaient le plan incliné à machine et remontaient le long des fronts de taille ;

95 mètres cubes pour les chaudières, etc.;

68 mètres cubes pour les vieux travaux en amont.

Les longueurs de parcours dans la couche Trencherbone étaient les suivantes :

Trencherbone. . .	}	1 et 2 Est entrée et retour. . .	1.828 mètr.
		3 — — . . .	3.053
		1, 2, 3, 4 Ouest entrée et retour. . .	2.970

On voit sur le plan que l'air pour les travaux gagne les fronts de taille par les galeries de niveau et que le retour se fait à la partie supérieure.

A l'est, le retour du niveau 2 se mêle à l'air frais du niveau 1, puis au point I les trois retours d'air de l'est sont réunis.

A l'ouest, un même courant passe dans les niveaux 4 puis 3, se mêle ensuite à l'air frais du niveau 2 et du niveau 1, et tout le retour vient joindre celui de l'est en I, pour, de là, gagner le puits par le *Mixing Run mm*, où se fait un brassage, sauf avec le retour des vieux travaux de l'amont qui se joint aux autres seulement tout près du puits. Il y a trois croisements d'air ou *crossings*, les deux premiers K et K<sub>1</sub> qui font passer le retour du 3<sup>e</sup> niveau

est au-dessus de l'entrée des 2<sup>e</sup> et 1<sup>er</sup> niveaux, le 3<sup>o</sup> K<sub>1</sub> qui fait passer le retour de l'ouest au-dessus du plan incliné à machine par lequel se fait l'entrée générale de l'air.

Les voies d'aéragé à côté des fronts de taille étaient établies avec 1<sup>m</sup>,80 de hauteur sur 1<sup>m</sup>,35 de largeur, mais la hauteur se réduisait à 0<sup>m</sup>,90 ou 1 mètre lorsque le toit venait à s'affaisser sur les murs en pierres sèches.

*Grisou.* — Il résulte du rapport de M. l'inspecteur Dickinson que le grisou était abondant dans le système des couches exploitées à Clifton Hall, que dans d'autres mines exploitant les mêmes couches, on avait eu des quantités de grisou considérables, nécessitant parfois des installations spéciales pour son évacuation, et que des explosions s'étaient produites presque dans toutes les mines exploitant la couche Trencherbone (ou *six feet*) à Wigan.

A la mine de Clifton Hall, on pouvait entendre le chant du grisou aux fronts de taille nouvellement ouverts, mais il était entraîné par la ventilation. Il ne se produisait quelque accumulation que dans le cas de dérangement de la ventilation; mais dans ce cas, elle pouvait devenir suffisante pour obliger à renvoyer les ouvriers des chantiers voisins, comme cela avait eu lieu en 1884.

La mine était poussiéreuse, et on arrosait les parties sèches; on consommait, à cet effet, environ 1.350 litres d'eau par jour.

Notons encore qu'au delà des fronts de taille on laissait une ou deux voies ouvertes pour permettre au courant d'air de balayer le grisou qui pouvait sortir des dépilages, ceux-ci ayant, d'ailleurs, été bouchés plus loin.

*Éclairage.* — On se servait de lampes de sûreté seulement pour la reconnaissance des chantiers au commen-

cement de chaque poste. Les *firemen* passaient d'abord, puis permettaient aux mineurs de dépasser, avec leurs lampes de sûreté, un point limite fixé. Les mineurs faisaient à leur tour l'examen de leur chantier, et ensuite les *firemen* revenaient et leur donnaient des lampes à feu nu. On éteignait alors toutes les lampes de sûreté, sauf celles destinées à la reconnaissance du grisou; les lampes de sûreté employées étaient presque exclusivement les lampes Davy.

*Circonstances de l'explosion.* — Nous mentionnerons l'abaissement de la pression atmosphérique qui a été de 3 1/2 millimètres depuis le 17 juin à 10 heures du soir jusqu'à 9<sup>h</sup> 20<sup>m</sup> du matin du 18, jour de l'explosion. Ainsi que l'observe M. Dickinson, cette circonstance peut avoir contribué à faire sortir du grisou des dépilages, mais ne paraît pas avoir pu provoquer une sortie aussi abondante que celle qui a dû se produire.

Nous parlerons également pour mémoire seulement des dires de divers témoins entendus dans l'enquête, veuves d'ouvriers, etc., d'après lesquels plusieurs des ouvriers tués auraient parlé peu de temps avant l'explosion du mauvais état de certains travaux et de la possibilité d'un accident. Ces dires méritent peu de considération de même qu'une lettre anonyme adressée à M. Dickinson, en novembre 1884, en suite de laquelle l'inspecteur, M. Martin, fit une visite à la mine, trouva tout en ordre et ne constata point de grisou.

Une circonstance qui mérite d'être notée, c'est que le mineur Thomas Price et ses collègues constataient à trois heures du matin, vingt minutes avant de quitter ce chantier, situé au front de taille du niveau 2, à l'est, la présence d'une petite quantité de grisou dans le dépilage. Ils la considérèrent comme insignifiante et ne signalèrent pas le fait.

*Point-origine de l'explosion.* — De toutes les constatations faites après l'explosion, il résulte d'une manière évidente que le point-origine de l'explosion a été à l'extrémité des quartiers des niveaux 1 et 2 est. C'est là que les effets de l'explosion ont été les plus violents; le toit était entièrement tombé dans le n° 4 est. Au chantier de Price, on a trouvé du coke de poussière épais d'un demi-pouce sur les côtés des piles de bois et des étais; la flamme y est entrée dans les dépilages, et en est sortie.

*Causes de l'explosion.* — Les positions dans lesquelles on a trouvé la plupart des victimes de la catastrophe qui semblaient avoir été tuées net sur place, soit en travaillant, soit en déjeunant, indiquaient que l'invasion de grisou a été subite et que l'explosion a suivi immédiatement cette invasion.

Si l'on rapproche de ces faits cette autre circonstance que dans tout le quartier est on a trouvé le toit forçant après l'explosion, que le toit de la galerie de niveau 1 Est éboulée bâillait comme s'il avait été secoué par un tremblement de terre, il paraît certain qu'il se sera produit un effondrement subit du toit dans les vieux travaux où les murs de soutènement auront cédé sous la pression de plus de 300 kilogrammes par centimètre carré (105 kilogrammes par centimètre carré rapportés à la surface totale); que cet effondrement aura chassé subitement dans les travaux en cours le grisou contenu dans les espaces vides des vieux travaux et peut-être d'autre grisou provenant du toit (\*). Cela admis, la présence des lampes à feu nu suffit pour expliquer l'explosion, et elle l'aurait provoquée dans toute circonstance où une cause

(\*) M. Dickinson, dans ses conclusions, dit qu'il est possible aussi qu'une chute de toit se soit produite avant l'explosion, que le courant d'air ait été intercepté de cette manière ou d'autre et que l'explosion ait été occasionnée par cette interception.

quelconque aurait augmenté subitement la proportion de grisou dans l'air circulant dans les travaux.

*Conséquences de l'explosion.* — L'explosion s'est produite à 9<sup>h</sup> 20' du matin, le 19 juin 1885. Une épaisse colonne de fumée et de poussière sortit des deux puits pendant quelques secondes avec quelques flammes au puits d'entrée d'air. Le courant d'air se renversa ensuite dans le puits de sortie d'air pendant 15 minutes et il sortit du puits d'entrée de la fumée noire pendant 13 minutes et de la fumée blanche pendant les deux dernières, puis le courant d'air reprit son cours normal.

La mine occupait habituellement de jour environ 350 ouvriers souterrainement. Sur ce nombre, 180 se trouvaient lors de l'explosion dans les travaux de la couche Trencherbone ou aux environs de la recette de cette couche; 158 d'entre eux furent trouvés morts dans la mine; 11 qui se trouvaient aux environs du puits furent amenés au jour vivants, mais mourants. Outre ceux-ci, neuf ouvriers des couches Doe et Five Quarters moururent d'épuisement et de suffocation dans leur voyage par la galerie qui conduit aux puits Agecroft; tous les autres ouvriers de ces couches purent se sauver par ce chemin.

Un fait digne de remarque, c'est que dix ouvriers occupés dans les chantiers à l'extrémité du 3<sup>e</sup> niveau est, lesquels ne communiquaient pas avec le 2<sup>e</sup> niveau, purent être sauvés. D'après leurs dires, la pression de l'air éteignit toutes leurs chandelles et leurs lampes de sûreté sauf deux; ils ne purent entrer qu'à 4<sup>h</sup> 30' du soir dans la galerie de roulage mécanique, remplie jusque-là des produits de l'explosion. Cela démontre que l'aérage ne se faisait plus aucunement dans ce niveau 3 et que la colonne d'air qui s'y trouvait y est restée en quelque sorte confinée.

Les effets mécaniques de l'explosion furent la destruction des portes d'aérage et des *crossings*, le renversement des étais et des piles de bois dans les galeries et les tailles. Le foyer d'aérage avait été détruit. Une partie du muraillement du puits de retour d'air, ébranlée par l'explosion, céda pendant l'exploration subséquente, ce qui occasionna un renversement du courant d'air et obligea les explorateurs à gagner la voie de sortie vers les puits Agecroft; la chute du muraillement ouvrit aussi une ancienne communication entre les deux puits et les fumées du puits de retour se mêlèrent à l'air entrant.

*Conclusions et remarques.* — Le verdict du jury, en date du 9 juillet 1885, concluait que l'explosion était due à une sortie subite de grisou des dépilages et à son inflammation par une chandelle. Vu la diversité des opinions qui s'étaient produites concernant l'emploi de feux nus, ce jury déclina de se prononcer à cet égard. Par contre, un nouveau jury ayant dû être réuni au sujet d'un corps retrouvé sous une grosse chute, celui-ci, par onze voix contre trois, conclut à l'emploi de la lampe de sûreté.

Il est certain que pour une mine du continent dans les conditions de celle de Clifton-Hall cette question n'aurait pas été douteuse. Il est probable aussi que la responsabilité des exploitants eût été considérée comme gravement engagée. En effet, il résulte de l'enquête et des dispositions de M. l'inspecteur Dickinson que celui-ci, à maintes reprises, soit verbalement, soit par écrit, avait appelé l'attention des exploitants sur ce point et sur celui de l'alimentation du foyer d'aérage avec de l'air frais.

L'objection que les exploitants avaient toujours formulée contre l'emploi des lampes de sûreté était qu'il en résulterait un nombre d'accidents plus considérable par les chutes de toit et des parois qu'on n'en éviterait par

explosions. M. Dickinson, dans son rapport, considère cette objection comme n'étant pas sans fondement et il cite le chiffre de 7.959 morts en suite d'explosions en 34 ans jusque fin 1884, contre 14.307 par des chutes de blocs dans les mines de charbon ; cette statistique n'aurait de valeur que si l'on savait dans combien de cas, toutes choses égales d'ailleurs, les chutes de pierres ont lieu avec l'emploi de feux nus et avec l'emploi de lampes de sûreté.

Si l'on compare, d'autre part, les morts par chutes de blocs dans les mines de houille et dans les mines métalliques, on trouve, en 1885 :

Pour les mines de houille . . . 1 mort pour 966 ouvriers du fond  
— métalliques . . . 1 — 803 —

Ces chiffres ne semblent pas indiquer que l'emploi des lampes à feu nu soit un empêchement aux accidents par chutes de blocs, bien que les circonstances ne soient pas absolument comparables. Si l'on examine le diagramme (Pl. IX, *fig. 3*) qui indique le nombre d'ouvriers employés pour un mort par chutes de blocs dans les houillères anglaises, de 1851 à 1883 (\*), on reconnaît que ce nombre s'élève successivement de 600 environ à 1.080, et cependant dans cet intervalle de temps l'emploi des lampes de sûreté s'est certainement développé considérablement.

Dans l'espèce, il semblerait que les murs en pierre qu'on élevait au milieu des tailles et qui restaient ensuite dans les vieux travaux, murs que l'on considère parfois comme avantageux pour empêcher les effondrements du toit sur de trop grandes surfaces, aient été, au contraire, la cause d'un effondrement pareil ; il est probable, en effet, que le toit ayant été retenu par eux et la surface non défilée

(\*) Emprunté au rapport final de la Commission anglaise pour les accidents.

étant devenue ainsi beaucoup plus grande qu'elle ne l'eût été sans appuis, l'effondrement se sera étendu lui-même à une surface beaucoup plus grande et aura eu pour conséquence l'expulsion dans les travaux d'une beaucoup plus forte quantité de grisou. Le seul moyen véritablement efficace pour empêcher ces grands effondrements et en atténuer les effets serait un remblai complet et soigné.

Bien que dans l'explosion dont il s'agit le foyer d'aérage alimenté par le retour d'air n'ait pas été la cause déterminante de l'explosion, on conçoit qu'il aurait pu le devenir si l'on avait employé des lampes de sûreté. M. Dickinson relève cette circonstance dans son rapport sur l'accident.

Il n'est pas nécessaire d'insister sur la grande utilité de l'existence de la galerie de communication avec les puits Agecroft qui a permis à tous les ouvriers des couches autres que la couche Trencherbone de se sauver, sauf neuf d'entre eux morts de fatigue dans le voyage ; l'enquête n'indique pas quel était l'état de l'air dans les autres couches après l'explosion.

#### **Explosion de Mardy Colliery du 23 décembre 1885.**

*Situation de la mine. Couches exploitées.* — La mine Mardy appartenant à la Lockett's Steam Coal Company est située dans le pays de Galles-du-Sud (Voir le plan, Pl. XI).

Elle comprend deux puits foncés jusqu'à une profondeur de 347 mètres et ayant l'un, le puits d'entrée de l'air, un diamètre de 4<sup>m</sup>,50, l'autre, le puits de retour, un diamètre de 4<sup>m</sup>,80. On y exploite les couches Abergorkie, Two feet nine inches, Four Feet, Six Feet et Lower Four Feet.

Les effets de l'explosion ne se sont fait sentir que dans

les travaux des couches exploitées par le puits d'entrée d'air, c'est-à-dire les trois couches intermédiaires. Ce sont ces travaux qui sont représentés sur le plan et qui sont compris dans cinq quartiers nommés, d'après leur direction à partir du puits d'entrée d'air :

Le North-West Dip District.	
Le Main-West	—
Le South-West	—
Le South-East	—
Le North-East	—

Ainsi qu'on le voit, ces travaux sont fort étendus. Le système d'exploitation est exclusivement celui du Long Wall.

*Grisou. Poussières.* — D'après les témoignages de l'enquête, il semble que la mine soit fort grisouteuse et également très poussiéreuse et sèche; au moins c'est ce qui résulte de la déposition de M. Galloway relativement à ce dernier point.

Dans les trois mois qui précédèrent l'explosion, on trouve journallement dans le carnet des *firemen* la mention de soufflards plus ou moins importants; le jour avant l'explosion, on en mentionne 4 petits (*small*) et 2 forts (*strong blowers*); sept jours après, 35 *small* et 16 *strong blowers*.

*Aérage.* — L'aérage de la mine est produit par un ventilateur Waddle, de 13<sup>m</sup>,50 de diamètre qui, avec une vitesse de 40 tours par minute, produisait une dépression d'eau de 6<sup>cm</sup>,3 et un volume de 7.000 mètres cubes environ par minute, lequel était divisé en huit branches principales. Sur cette quantité, 4.068 mètres cubes vont dans les travaux dépendant du puits d'entrée de l'air et se partagent comme suit entre les quartiers :

N.-O.,	814 mètres cubes.
O.,	887 —
S.-O.,	1.309 —
N.-E.,	551 —
S.-E.,	521 —

Les parcours des courants sont longs; néanmoins tout le monde s'est trouvé d'accord, y compris les inspecteurs, pour reconnaître que l'aérage était très largement suffisant.

*Éclairage.* — Lors de l'explosion on se servait encore dans la mine Mardy d'un éclairage mixte. Il y avait des stations de lampes dans les divers quartiers à des distances considérables des puits d'entrée d'air, et depuis celui-ci jusqu'aux stations de lampes on se servait partiellement de lampes à feu nu. Et cependant la station du quartier nord-ouest, à 700 mètres du puits, se trouvait au delà d'anciens travaux dans lesquels on constatait fréquemment de petits soufflards.

Une grande lampe à feu nu, *comet lamp*, était employée au bas d'un travail de maçonnerie destiné à isoler par une voûte une vaste cavité, résultat d'un éboulement, tandis que les lampes de sûreté étaient prescrites au-dessus de la voûte. Nous mentionnons spécialement ce point sur lequel nous aurons à revenir, cette lampe ayant probablement occasionné l'explosion.

En tout, les lampes à feu nu étaient admises sur une longueur de 2.400 mètres du courant d'entrée d'air. Il est assez curieux d'indiquer le motif donné par la direction de la mine pour avoir disposé les emplacements des stations de lampes aussi près des chantiers; « ce rapprochement était nécessaire, d'après elle, pour permettre aux ouvriers de fumer en ces points, sans quoi les moins consciencieux d'entre eux fumeraient aux chantiers mêmes. »

*Circonstances de l'explosion.* — L'explosion de Mardy Colliery s'est produite vers trois heures de l'après-midi, où l'on vit un nuage de poussières sans flamme sortir du puits d'entrée de l'air. Au moment de l'explosion, c'est-à-dire du travail de l'équipe de jour, il y avait à peu près 750 ouvriers dans la mine occupés, en général, au charbon. Toutefois on faisait également dans la journée un travail de maçonnerie dans une galerie au rocher GG, commencée quatre mois avant l'explosion. Il s'était produit, au point de départ de cette galerie, un éboulement considérable dû, sans doute, au dérangement des couches occasionné par la faille voisine; cet éboulement avait laissé une cavité de 9 mètres de hauteur environ et de 3 mètres de largeur au sommet, laquelle, étant éminemment propre à servir de réservoir au grisou, devait être fermée. A cet effet, on avait commencé une voûte de 4<sup>m</sup>,80 de hauteur sous couronne, de 0<sup>m</sup>,915 d'épaisseur en couronne, au-dessus de laquelle l'espace vide devait être rempli de pierres sèches. Sur les 7<sup>m</sup>,32 de largeur que devait avoir la voûte, 2 mètres environ étaient achevés au moment de l'explosion et 2 autres mètres étaient en construction. Au-dessus de la voûte se trouvait un remplissage en pierres sèches de 2 mètres de hauteur et il restait environ 1<sup>m</sup>,20 jusqu'au sommet de la cavité. On avait, avant de commencer la voûte, préparé une petite voie d'aérage qui descendait depuis le haut de la cavité jusqu'à la galerie d'entrée d'air, et la circulation d'air était obtenue au moyen d'une demi-toile suspendue dans la galerie d'arrivée de l'air.

Au moment de l'explosion, trois maçons et deux aides travaillaient à la voûte. Un plancher avait été établi pour eux à environ 1<sup>m</sup>,80 de hauteur; on y arrivait par une échelle qui montait jusqu'au-dessus de la voûte. Les maçons avaient des lampes de sûreté, mais leurs aides se servaient de la « comet lamp » indiquée plus haut.

La galerie dans laquelle se trouvait ce travail était dans le rocher; sa longueur, au 23 décembre, était d'environ 35 mètres; elle avait été faite entièrement à la mine et, la nuit avant l'explosion, on y avait tiré quatre coups de mine. Le dépôt de poussière y était léger, puisqu'elle ne pouvait provenir que de la galerie de roulage.

Il paraît que le toit de la cavité menaçait depuis quelques jours avant l'explosion et notamment le jour même de l'explosion, de manière que les maçons auraient attendu pour commencer leur travail. On avait constaté la présence du grisou marquant à la lampe trois mois avant l'explosion, dans le haut de la cavité au-dessus de la voie d'aérage; d'après l'enquête, on n'en aurait point trouvé la veille ni le matin même de l'explosion. Il est juste de dire que la manière de s'en assurer laisse assez de doutes sur l'exactitude des résultats, puisqu'on suspendait simplement la lampe de sûreté au bout d'un long bâton.

Un *strong blower* fut trouvé dans la cavité après l'explosion, le 31 décembre, et toute la cavité au-dessus de la voie d'aérage était, à ce moment, remplie de grisou qu'on ne pouvait évacuer, bien qu'on eût posé un tuyau et fermé l'entrée d'air par une toile entière. Il est permis d'en conclure qu'avec l'installation antérieure à l'explosion toute la cavité au-dessus de la voûte pouvait se remplir d'un mélange fortement grisouteux, sinon de grisou pur, et cette cavité pouvait avoir un volume d'environ 150 mètres cubes.

*Point-origine de l'explosion.* — Dans les deux hypothèses émises pour l'explication de l'explosion, on admet que le point-origine se trouve dans la galerie au rocher GG et que la cause première de l'explosion a été la « comet lamp »; mais tandis que M. Wales, l'inspecteur des mines, croit que l'explosion a été produite par l'inflammation à l'aide de la lampe des poussières de char-

bon mises en suspension dans l'air par un coup de mine débouillant, MM. Galloway et Randall pensent que la lampe a enflammé d'abord le grisou contenu dans la cavité supérieure et qu'il s'est produit ensuite une explosion de poussières.

Il est fort peu probable qu'un coup de mine ait été tiré dans le jour à l'endroit où les maçons devaient travailler et lorsque ceux-ci se trouvaient juste en dessous de leur chantier; en outre, la galerie au rocher contenait fort peu de poussière, ainsi que nous l'avons déjà indiqué; l'hypothèse de M. Wales a donc des objections sérieuses contre elle. Celle de MM. Galloway et Rondall paraît, au contraire, répondre aux faits constatés et aux conséquences de l'explosion.

*Conséquences de l'explosion.* — Bien qu'une colonne de poussière et de fumée soit sortie du puits d'entrée d'air, le ventilateur ne fut pas affecté et l'on put descendre presque immédiatement dans la mine et la dégager des produits de l'explosion dans l'espace de trois heures.

Comme dans l'explosion de Usworth Colliery, les effets de l'explosion à Mardy sont presque entièrement limités aux galeries d'entrée de l'air. L'explosion s'est étendue principalement dans le montage ascendant vers le sud-ouest à partir de la galerie de niveau ouest où ses effets ont été constatés jusqu'à environ 600 mètres, et dans le montage descendant en sens opposé jusqu'à environ 360 mètres, puis dans la galerie de niveau ouest jusqu'à 320 mètres du puits. Toutefois, dans cette galerie les effets n'ont été violents que du côté du puits. Au delà du puits, dans la galerie de niveau est, l'explosion ne s'est fait sentir que jusqu'à 80 mètres environ du puits. La plus forte chaleur paraît avoir été développée près de la voûte, près du puits et aux points extrêmes sud-ouest et

nord-est de l'explosion. Les effets mécaniques ont été insignifiants près de la voûte où les divers objets, tels que l'échelle, ont été trouvés en place; les portes avaient toutes été renversées dans les galeries parcourues par l'explosion du côté du retour d'air; on trouve partout dans ces galeries des traces de suie et de poussière transformées en coke.

Le volume des galeries parcourues par l'explosion est, d'après M. Galloway, d'environ 6.700 mètres cubes. Le volume de la partie supérieure de la cavité, lequel pouvait être rempli entièrement de grisou, serait d'environ 12 mètres cubes seulement; mais en admettant même que la moitié de toute la cavité supérieure fût remplie de grisou on n'arriverait encore qu'à 75 mètres cubes environ, volume apparemment insuffisant pour expliquer l'extension de l'explosion au volume de galeries indiqué. C'est ce qui conduit à admettre que l'inflammation du grisou a occasionné ensuite une explosion de grisou et de poussières, la mine étant d'ailleurs notoirement poussiéreuse et l'arrosage se faisant fort irrégulièrement et d'une manière insuffisante.

Bien que les effets de l'explosion aient été restreints à une partie relativement limitée de la mine, elle ne fit pas moins de 81 victimes.

*Conclusions. Remarques.* — Le verdict du jury doit paraître assez singulier après ce qui précède. Il dit: « Une explosion de gaz (grisou) s'est produite dans la houillère de Mardy le 23 décembre, par laquelle N... a perdu la vie; mais les témoignages recueillis ne suffisent pas pour nous permettre de dire où et comment le gaz s'est enflammé. Nous sommes toutefois convaincus que l'explosion n'est pas due au tirage d'un coup de mine dans la galerie au rocher. »

Cette conclusion purement négative, en présence de

l'opinion nettement formulée tant de M. Wales que de MM. Galloway et Rondall, qui considérèrent la « comet lamp » comme la cause première de l'explosion, surprendrait peut-être partout ailleurs qu'en Angleterre.

On peut s'étonner également que l'explosion attribuée par le jury au grisou ne lui ait pas suggéré d'autres recommandations que les suivantes :

1° « Qu'il soit pris des moyens efficaces pour mouiller et ensuite enlever la poussière des mines de charbon produisant des gaz explosifs » ;

2° « Que les garçons fréquentant les écoles élémentaires d'un district houiller soient instruits des règlements de la houillère ou des houillères voisines ».

A cet égard, les conclusions de M. Wales, l'inspecteur des mines, sont beaucoup plus radicales. Il dit que d'après la connaissance qu'il a depuis plus de trente ans du gisement houiller du South Wales rien d'autre que l'interdiction absolue du tirage de coups de mine et de l'éclairage à feu nu (sauf dans le voisinage des puits d'entrée d'air) ne pourra empêcher ces explosions sérieuses. Il demande, en outre, que les principales galeries soient constamment arrosées de manière à prévenir, autant que possible, l'accumulation des poussières.

#### **Observations de MM. Atkinson sur les récentes explosions du Durham.**

Dans leur livre intitulé : *Explosions in Coal mines*, MM. Atkinson, inspecteurs des mines, passent en revue, avec beaucoup de détails, les explosions survenues dans le bassin du Durham dans ces dernières années et qui ont fait l'objet de notes dans les *Annales*. Ce sont celles de Seaham, Trindon Grange, Tudhoe, West Stanley, Usworth. MM. Atkinson concluent au rôle prépondérant des poussières dans ces explosions.

Les faits principaux sur lesquels ils insistent pour appuyer leur manière de voir sont les suivants :

L'explosion ne s'est étendue dans aucun des cinq cas à un deuxième étage d'exploitation ; autrement dit, il n'y a pas eu de propagation dans le sens vertical, tandis qu'il semble qu'une explosion due à des gaz seulement ne devrait pas s'étendre horizontalement plutôt que verticalement, le gaz devant se répandre partout. Il semble qu'à cela on pourrait répondre qu'en général, les communications d'étage à étage sont rares et peu larges, de manière que la non propagation pourrait s'expliquer par là.

Dans les cinq explosions, les puits d'entrée d'air furent endommagés, mais l'explosion ne s'étendit sérieusement au delà du puits que dans celle de Seaham où le puits était sec ; dans les quatre autres, elle était arrêtée au puits, d'après MM. Atkinson, parce que les poussières étaient mouillées dans le voisinage.

Dans les cinq explosions, les effets principaux de l'explosion furent limités aux galeries contenant le plus de poussières, c'est-à-dire aux galeries de roulage et d'entrée d'air. Les retours d'air ont été presque partout complètement épargnés ; à West Stanley et à Trindon Grange seulement ils ont été atteints dans le voisinage des fronts de taille que l'explosion a parcourus.

D'autre part, des galeries d'entrée d'air par lesquelles il ne passait pas de charbon ont également été épargnées, comme par exemple les deux galeries de circulation pour les hommes à Seaham et la galerie d'entrée d'air du quartier Hitch North à Usworth Colliery.

Les effets de l'explosion cessaient dans beaucoup d'endroits où les galeries de roulage étaient humides ; ce cas s'est présenté notamment au North Main Coal, à Seaham, au Crosscut Way, à Trindon Grange, aux Shieldfield et n° 6 Ways, à Tudhoe et au Middle et Hitch North Ways, à Usworth. De même, les effets cessaient en des points où

le charbon était traîné par des chevaux et où alors, d'une part, sur le sol la poussière de charbon était mélangée au crottin ou à d'autre poussière, et, d'autre part, sur le haut des parois la poussière n'avait pu se déposer en abondance comme dans les galeries à trainage mécanique; dans ces dernières, en effet, la poussière des bennes est exposée à un courant d'air beaucoup plus vif. On trouve des exemples de ce genre au South Way du n° 3 Pit à Seaham, et probablement au Lawson's Way à Usworth.

Les effets des explosions indiquent dans tous les cinq cas qu'elles étaient dirigées vers les vieux travaux.

Dans aucune des catastrophes les ouvriers ne semblent avoir été alarmés avant le moment même de l'explosion (comme ils l'ont été, par exemple, à Clifton Hall), ce qui n'aurait pas manqué si des quantités notables de grisou avaient passé sur leurs lampes avant l'explosion, comme on serait obligé de le supposer si on ne veut pas admettre des dégagements simultanés de gaz en plusieurs points. Il serait également difficile d'expliquer, avec le grisou seul, comment certaines parties des galeries en communication directe avec les autres auraient été épargnées et comment aussi les retours d'air seraient restés tout à fait exempts.

MM. Atkinson admettent donc qu'on ne saurait trouver une explication que dans la présence des poussières dans les galeries parcourues par l'explosion. Ils admettent d'ailleurs qu'il pouvait y avoir une faible proportion de grisou dans certaines parties. Ils attribuent aux coups de mine tirés dans les galeries au rocher les explosions de Seaham, Tudhoc et Usworth; en faisant remarquer que l'un de ces coups a été allumé par un feu nu, et qu'il passait aux points en question des volumes d'air de 1.708, 650 et 730 mètres cubes d'air par minute, ils considèrent dans ces trois cas l'air comme y ayant

été pratiquement dépourvu de grisou, et admettent, par conséquent, l'explosion des poussières seules. Dans l'explosion de West Stanley, également attribuée par eux à un coup de mine, ils admettent la présence d'une faible quantité de grisou; quant à celle de Trindon Grange, ils admettent franchement que l'explosion initiale est due au grisou.

Il faut encore remarquer que, dans les quatre premières explosions attribuées à des coups de mine, les effets mécaniques de l'explosion ne se sont fait sentir qu'à plus de 50 à 70 mètres de chaque côté du point-origine, ce qui n'a pas eu lieu à Trindon Grange. Cette circonstance est, en effet, à remarquer; elle semblerait démontrer qu'il n'y a eu, à l'origine, qu'une simple inflammation (la flamme ne remplissant pas même toujours toute la galerie, comme à Usworth) et que l'explosion ne s'est produite que plus loin. MM. Atkinson pensent que ce passage de l'inflammation à l'explosion pourrait être dû à la compression de l'air devant le mélange enflammé d'air et de poussière, compression due à l'expansion provoquée par la chaleur. Nous ferons remarquer tout d'abord que l'absence d'effets mécaniques au point-origine s'est également montrée dans l'explosion de Mardy, dans laquelle cependant la cause originelle de la catastrophe paraît bien avoir été le grisou seul. D'autre part, on peut admettre, d'une façon générale, abstraction faite de la cause originelle de la catastrophe, grisou ou poussières, qu'au point-origine il y a d'abord une simple inflammation qui se propage avec la vitesse normale d'inflammation jusqu'à ce que, à une certaine distance de ce point et sous l'influence de diverses causes, la vitesse s'accélère subitement au point de provoquer les phénomènes et les effets de l'onde explosible.

MM. Atkinson se sont préoccupés de répondre à l'objection faite souvent, en ce qui concerne l'effet des coups de mine sur les poussières, qui consiste à dire que si cet

effet était possible, bien des houillères déjà auraient dû sauter. Ils font remarquer que dans les trois explosions dont il s'agit les coups de mine ont été tirés dans d'anciennes galeries au rocher, dont les parois n'ont pas été remuées depuis longtemps et sur lesquelles a pu s'accumuler une quantité considérable de poussière de l'espèce la plus fine enlevée par l'air du haut des bennes, et qu'il est rare que des coups de mine soient tirés dans ces conditions particulières; ils inclinent à croire que cette poussière serait encore plus dangereuse que celle déposée sur les voies. Ils citent, en outre, deux explosions qui se sont produites à Seaham, en 1871 et 1872, tout près du point-origine de l'explosion de 1880 et lors desquelles il avait été également tiré des coups de mine dans la galerie au rocher.

Si MM. Atkinson admettent que le grisou a joué un rôle dans l'origine de deux des explosions considérées, ils pensent, au contraire, qu'une fois l'explosion commencée les poussières ont propagé les cinq explosions; ils admettent pour cela : 1° une onde d'air précédant l'explosion et remplissant l'atmosphère des galeries de poussière; 2° la flamme suivant immédiatement dans l'air comprimé chargé de poussière.

Si l'on ne peut nier aujourd'hui la possibilité, dans certaines circonstances, de l'inflammation d'un mélange d'air et de certaines poussières en quantité suffisante, par une flamme, ou un coup de mine, rien ne démontre encore que l'inflammation de poussières seules ou même avec une faible proportion de grisou puisse se propager par elle-même et par les poussières à des distances considérables comme celles parcourues par les explosions examinées. Au contraire, les remarques de MM. Mallard et Lechâtelier (\*) semblent démontrer qu'il y aurait une

(\*) *Ann. des mines*, t. IX, 3<sup>e</sup> livr. de 1886.

limite à cette distance de propagation, variable avec la nature même de la poussière, mais dans tous les cas assez restreinte. Cependant, il paraît difficile d'admettre la présence du grisou en proportions tant soit peu notables dans quelques-unes des explosions, et, d'autre part, certains faits seraient difficilement explicables en admettant la présence du grisou. Ne serait-il pas possible que l'inflammation première une fois produite, soit de poussières seules, soit d'un mélange de grisou et de poussières et cette inflammation ayant donné lieu à une explosion, la combustion des poussières ne se propageant d'ailleurs qu'à une distance relativement faible, celles-ci mises en suspension dans l'air chassé par l'explosion fussent enflammées plus loin à nouveau, soit directement à un feu nu, soit à la flamme chassée hors du tamis d'une lampe de sûreté? Si l'on passe en revue les diverses explosions examinées, y compris celle de Mardy, on trouve partout, sauf une exception, des lampes dans des positions telles que l'explication précédente pourrait trouver son application. L'hypothèse que nous faisons là expliquerait en même temps comment les effets de la flamme ne se font pas sentir sur tout le parcours de l'explosion, tandis que les effets mécaniques suivent naturellement la colonne gazeuse mise en mouvement. L'exception signalée se trouve dans l'explosion d'Usworth où les effets se sont fait sentir jusqu'au front de taille du quartier Crosscut, à une distance de 900 mètres environ du Narrow Board Way, où se trouvaient les dernières lampes; cette exception est d'autant plus remarquable que depuis l'embranchement du Right Hand Way avec le Crosscut Way jusqu'au front de taille, sur une longueur de 600 mètres environ, le roulage se faisait dans le Crosscut Way par chevaux et, par conséquent, d'après ce qu'admettent MM. Atkinson eux-mêmes, cette galerie ne devait pas se trouver dans des conditions favorables

aux poussières et à la propagation par elles de l'explosion.

Il résulterait, en définitive, de l'examen des explosions en question que les coups de mine même non débou-rants, mais surchargés et donnant lieu à une flamme, pourraient enflammer des poussières dans les conditions particulières indiquées plus haut, même en l'absence du grisou ou au moins en présence d'une proportion insignifiante de grisou (\*), et que les effets de l'inflammation pourraient se propager à des distances considérables; l'inflammation se propagerait directement, ou de nouvelles inflammations se produiraient dans la poussière soulevée par le courant d'air provenant de la première explosion au contact des feux nus ou peut-être même de la flamme chassée en dehors du tamis des lampes de sûreté.

La commission anglaise dont les travaux ont été résumés dans les *Annales* (\*\*) dit, dans une de ses conclusions, que le tirage à la poudre devrait être interdit dans les mines sèches, où l'atmosphère peut être mélangée de grisou, et dans lesquelles, en même temps, des accumulations de poussières sont inévitables, sauf enlèvement préalable des poussières et arrosage abondant dans le voisinage des coups de mine à tirer (\*\*\*). Nous avons vu plus haut que l'inspecteur M. Wales demande même la prohibition absolue du tirage à la poudre pour les mines du pays de Galles, qui paraissent remplir les conditions indiquées par la commission anglaise.

Il est à remarquer que la Commission anglaise ne prévoit pas l'interdiction du tirage à la poudre en raison du grisou seul. Les résultats de son enquête diffèrent, sous ce rapport, de ceux tirés des enquêtes des commissions

(\*) Le même fait a été signalé pour quelques explosions, en France, en 1882 et 1883, *Ann. des mines*, t. VIII, 6<sup>e</sup> livr. de 1885.

(\*\*) Note de M. Lorieux, *Ann. des mines*, t. X, 6<sup>e</sup> livr. de 1886.

(\*\*\*) *Final Report of H. M. Commissioners*, p. 115.

prussienne et saxonne. Elle prévoit même ce tirage et recommande que, là où l'on emploie des lampes de sûreté et où l'on tire à la poudre, on s'assure de l'absence de grisou en proportion dangereuse (*to a dangerous extent*) dans un rayon de 20 yards (18 mètres) autour du point où le coup de mine doit être tiré (\*). La Commission anglaise recommande, comme dénué de danger pour le tirage des coups de mine, l'emploi de la dynamite, de la dynamite-gomme, du fulmicoton et de la tonite avec bourrage à l'eau.

La Commission prussienne a conclu dans ses prescriptions (art. 19) (\*\*) à l'interdiction du tirage à la poudre ou à d'autres explosifs à effet lent dans les mines à grisou (c'est-à-dire celles où l'on a rencontré du grisou dans les deux dernières années) et elle n'interdisait, comme dangereux, l'emploi de la dynamite ou autres explosifs à action rapide que là où la proportion de grisou dépasse 3 p. 100 et devient appréciable à la lampe de sûreté ordinaire.

La Commission saxonne, à la suite d'une explosion du 23 janvier 1885 à Hohndorf et d'expériences directes faites par elles, a été conduite à conclure que les coups de dynamite, débou-rants ou non, pouvaient également être dangereux; aussi a-t-elle été plus loin. Le règlement de police des mines pour le royaume de Saxe, du 25 mars 1885, interdit d'abord le tirage à la poudre noire ordinaire dans les quartiers de travaux où du grisou a été constaté durant les six derniers mois (§ 124), puis il ne permet l'emploi d'autres explosifs qu'avec l'autorisation spéciale de l'administration des mines donnée pour cha-

(\*) *Final Report*, p. 115, dernier alinéa. — La Commission n'indique pas nettement quelle est la proportion dangereuse; d'après son rapport, ce serait de 3 à 4 p. 100.

(\*\*) Voir Comptes rendus mensuels de la Société de l'industrie minière, *Bulletin* de septembre 1885.

que quartier spécialement, et avec les restrictions et conditions qu'elle juge utiles (bourrage à l'eau, etc.); enfin, pour que l'on puisse tirer un coup de mine, il faut qu'il n'y ait point de grisou dans un rayon de 10 mètres autour du coup de mine, c'est-à-dire que la teneur en grisou de l'air ne dépasse pas 1 p. 100 (\*).

Ni les prescriptions prussiennes ni celles de la Saxe ne mentionnent les poussières. A la vérité, le projet primitif du règlement saxon renfermait un dispositif prescrivant de mouiller les galeries avant le tirage d'un coup de mine dans le rayon de son action ou de faire évacuer tout le quartier par les ouvriers, sauf ceux nécessaires au tirage. Bien que des essais directs aient démontré que certaines poussières des houillères saxonnes sont susceptibles de s'enflammer et de donner des phénomènes explosifs, même en l'absence du grisou, on a renoncé au dispositif en question en tenant compte de ce que l'emploi d'explosifs à action rapide avec bourrage à l'eau paraît donner une sécurité suffisante.

(\*) Sont considérés comme non grisouteux les travaux dans lesquels la flamme réduite de la lampe de sûreté ne marque pas et où l'on ne peut trouver plus de 1 p. 100 de grisou (§ 110).

## RECHERCHES EXPÉRIMENTALES

SUR

## LA CONSTITUTION DES MORTIERS

## HYDRAULIQUES

Par M. H. LE CHATELIER, Ingénieur des mines.

## INTRODUCTION.

L'objet principal de ce travail est l'étude des réactions chimiques qui se produisent dans les chaux et ciments hydrauliques soit pendant leur cuisson, soit pendant leur durcissement. Ayant rencontré dans ces recherches des difficultés dont je ne soupçonnais pas tout d'abord l'existence, je me suis décidé à reprendre au préalable l'étude de corps analogues plus simples : celle du *plâtre*, puis celle des *silicates de baryte*, espérant qu'une connaissance exacte des phénomènes dont ces composés sont le siège pourrait jeter quelque jour sur la théorie des ciments calcaires.

Ce travail comprendra donc trois parties :

1<sup>re</sup> Partie : *Plâtre* ;

2<sup>e</sup> Partie : *Silicates de baryte* ;

3<sup>e</sup> Partie : *Ciments et Chaux hydrauliques*.

## PREMIÈRE PARTIE

## PLÂTRE

HISTORIQUE.— L'étude scientifique des phénomènes qui accompagnent la cuisson et le durcissement du plâtre est due à Lavoisier. Le détail de ses expériences est consigné dans un mémoire extrêmement remarquable pour l'époque à laquelle il a paru. La chimie n'existait pas encore; ses lois les plus importantes, celle des proportions définies, entre autres, n'étaient même pas soupçonnées. Mais le jeune savant, âgé alors de vingt et un ans seulement, était déjà en possession de la méthode expérimentale qu'il devait appliquer à toutes ses recherches et à laquelle il doit, à juste titre, d'être considéré comme le fondateur de la chimie moderne. Il a résumé ses expériences dans le passage suivant d'une courte note insérée aux *Comptes rendus de l'Académie des sciences* (\*):

« Si après avoir enlevé par le feu au gypse son eau d'hydratation on la lui rend (ce qu'on appelle communément gâcher le plâtre), il la reprend avec avidité, il se fait une cristallisation subite et irrégulière, et les petits cristaux qui se forment se confondant les uns avec les autres, il en résulte une masse très dure. » Il a reconnu, de plus, qu'une cuisson à une température trop élevée enlève au plâtre la propriété de faire prise; il a signalé enfin une particularité importante de la cuisson du plâtre (\*\*), qui a échappé aux auteurs qui se sont occupés, après lui, de cette question. La déshydratation du gypse

(\*) *Comptes rendus*, 17 février 1765.

(\*\*) Lavoisier, *Œuvres complètes*, t. III, p. 122.

se fait en deux temps; les trois premiers quarts de l'eau combinée sont beaucoup plus faciles à chasser que le dernier quart.

Nos connaissances actuelles sur le plâtre se bornent, à bien peu de choses près, aux résultats précédents, c'est à peine s'ils ont été complétés sur quelques points secondaires.

Berthier (\*) remarqua que le plâtre tel qu'on l'emploie dans l'industrie renferme de 4 à 8 p. 100 d'eau. Ce fait a été confirmé depuis par les recherches récentes de M. Landrin (\*\*).

Payen (\*\*\*), vers 1830, chercha à déterminer la température exacte de la cuisson du plâtre. Il reconnut que le gypse commençait à perdre son eau vers 115 degrés et la perdait ensuite de plus en plus rapidement à mesure que la température s'élevait.

Mes recherches personnelles ont porté sur la *cuisson* et la *prise* du plâtre.

CUISSON. — L'expérience journalière des fabricants de plâtre a appris que la cuisson du plâtre se produit à basse température, bien au-dessous du rouge. D'après les expériences de laboratoire dues à Payen, la désydratation complète se produirait entre 115 et 120 degrés. Cependant les chiffres donnés par différents auteurs sont tout à fait discordants et varient de 110 à 300 degrés. Il y avait intérêt à reprendre cette étude évidemment restée incomplète.

J'ai employé à cet effet la méthode par échauffement progressif imaginée par Regnault pour étudier les transformations allotropiques du soufre fondu. Du gypse pul-

(\*) Berthier, *Ann. des mines*, 3<sup>e</sup> série, t. XIX, p. 655, 1841.

(\*\*) Landrin, *Ann. de phys. et de chim.*, 5<sup>e</sup> série, t. III, p. 441.

(\*\*\*) Payen, *Chimie industrielle*, 1851, p. 304.

vérisé fut placé dans un tube en verre au milieu d'un bain de paraffine dont la température était élevée d'une façon progressive et très régulière; un thermomètre donnait à chaque instant la température du sel, et le passage de la colonne mercurielle devant chaque division de la tige était pointé sur un chronographe enregistreur. La loi d'échauffement ainsi déterminée devait rester régulière, tant qu'il ne se produirait aucun phénomène particulier, et présenter dans sa marche ascensionnelle, au moment de la déshydratation, un temps d'arrêt accusant une absorption correspondante de chaleur, puis reprendre au delà une allure normale. Contrairement à ces prévisions, au lieu d'un seul temps d'arrêt, j'en ai obtenu deux, ainsi que le montrent les chiffres du tableau suivant :

*Loi d'échauffement du gypse.*

Température.	Heures.	Différences.
100°	0 <sup>h</sup> 0' 0"	0 <sup>h</sup> 0' 0"
105	20	20
110	45	25
115	1 20	35
120	2 0	40
125	2 50	50
130	18 0	15 10
135	21 30	3 30
140	23 30	2 0
145	24 40	1 10
150	25 40	1 0
155	26 50	1 0
160	27 50	1 10
165	30 40	2 50
170	31 40	1 0
175	32 40	1 0
180	33 30	50
185	34 15	45
190	34 55	40
195	35 30	35
200	36 0	30

La courbe d'échauffement présente deux temps d'arrêt bien nets quoique inégalement marqués. Le premier, correspondant à la température de 128 degrés, est évidemment produit par la déshydratation du gypse; le deuxième, correspondant à 163 degrés, pouvait être attribué soit à la fin de la déshydratation dans le cas où ce phénomène se produirait en deux phases distinctes, soit à une transformation allotropique succédant à la déshydratation.

Pour trancher cette question, j'ai déterminé la perte de poids éprouvée par le gypse quand on le chauffe à une température supérieure à l'un seulement des temps d'arrêt ou aux deux à la fois. L'expérience fut faite sur 5 grammes de gypse chauffés dans un bain de paraffine maintenu à température constante au moyen d'un régulateur Schlœsing.

Température.	Durée de la cuisson.	Perte totale sur 5 grammes.	Perte p. 100
155°	0 <sup>h</sup> 0'	0 <sup>s</sup> ,00	0,0
	15	0,33	6,6
	30	0,68	13,6
	45	0,76	15,2
	1 0	0,78	15,6
	1 15	0,78	15,6
194	0 0	0,78	15,6
	15	0,89	17,8
	30	0,99	19,8
	45	0,99	19,8
	1 0	1,04	20,8
270	0 0	1,04	20,8
	15	1,04	20,8

Cette expérience montre d'une façon bien nette que :  
 1° *La déshydratation est incomplète à 155 degrés et qu'elle est complète à 194 degrés.* La quantité d'eau contenue dans le gypse pur  $\text{SO}^3, \text{CaO}, 2\text{HO}$  est en effet de 21,4 p. 100. Les deux temps d'arrêt de la courbe d'échauffement correspondent donc à deux phases distinctes de la déshydratation;

2° La quantité d'eau abandonnée pendant la première phase est parfaitement définie et correspond exactement à 1<sup>er</sup>,5 d'H<sub>2</sub>O.

Le produit obtenu peut donc être représenté par la formule  $\text{SO}^3, \text{CaO}, 0,5\text{H}_2\text{O}$  et renferme 6,2 p. 100 d'H<sub>2</sub>O.

On trouve dans ce fait l'explication de quelques particularités antérieurement signalées.

Le temps d'arrêt dans la cuisson du plâtre signalé par Lavoisier résulte de l'élévation plus grande de température nécessaire pour chasser le dernier quart de l'eau d'hydratation.

La présence d'une quantité à peu près constante d'H<sub>2</sub>O dans le plâtre cuit est due à ce que sa cuisson industrielle est généralement limitée à la première phase. La proportion d'eau de 7 p. 100 trouvée par M. Landrin diffère bien de la quantité théorique qui est de 6,2 p. 100. Les motifs de cette cuisson incomplète paraissent être surtout une question d'économie de combustible, car le plâtre complètement cuit fait également prise et a l'avantage de solidifier une plus grande quantité d'eau.

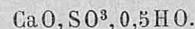
On peut se demander si le produit de la cuisson incomplète du plâtre est un composé chimique ou un simple mélange de sulfate de chaux anhydre et de sulfate à deux équivalents d'eau.

Le gypse cuit est une matière amorphe qui ne présente aucune garantie d'homogénéité. Il était intéressant de préparer ce corps à l'état cristallisé; j'y suis arrivé en chauffant dans un tube scellé entre 130 et 150 degrés une dissolution saturée de sulfate de chaux. On obtient ainsi de longs prismes rectangulaires excessivement déliés, cristallisés dans le système rhombique. Mais la quantité de ces cristaux obtenus dans une expérience est très petite par suite de la faible solubilité du gypse. Pour en obtenir une quantité un peu considérable il faut mettre dans l'eau un excès de sulfate de chaux; la cristalli-

sation alors est plus confuse. Il est indispensable de séparer rapidement les cristaux de l'eau au milieu de laquelle ils se sont formés, car au-dessous de 130 degrés ils s'hydratent promptement pour régénérer le gypse. On y arrive en brisant le tube encore chaud, ce qui provoque la vaporisation instantanée de la majeure partie de l'eau, et projetant la matière humide dans l'alcool absolu, puis l'égouttant rapidement et la faisant sécher dans une étuve à 100 degrés. L'analyse de ces cristaux m'a donné :

	Observé.	Calculé.
Eau . . . . .	6,7	6,2
CaO, SO <sup>3</sup> (différence.) . . . .	93,3	93,8
	<hr/> 100,0	<hr/> 100,0

ce qui montre que le corps ainsi obtenu est bien représenté par la formule



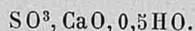
C'est le même composé qui constitue les incrustations des chaudières alimentées avec de l'eau de mer. Voici le résultat que m'a donné l'analyse d'un échantillon semblable provenant des chaudières des paquebots de la Compagnie transatlantique :

<i>Analyse.</i>	
CaO, CO <sup>2</sup> . . . . .	0,3
Fe <sup>2</sup> O <sup>3</sup> . . . . .	2,0
H <sub>2</sub> O . . . . .	5,8
CaO, SO <sup>3</sup> (différence) . . . . .	91,9
	<hr/> 100,0

Cet hydrate obtenu dans l'eau surchauffée se comporte comme le plâtre cuit; sa température de déshydratation rapide est comprise entre 160 et 170 degrés; broyé finement et gâché avec de l'eau, il s'hydrate et durcit. La prise, il est vrai, est moins rapide et moins complète

qu'avec le plâtre, ce qui peut tenir à la compacité plus grande du produit.

*Il est donc bien démontré que le plâtre ordinaire pur et de bonne qualité, le plâtre à mouler par exemple, n'est pas du sulfate de chaux anhydre comme on l'admettait jusqu'ici, mais un hydrate défini :*



On sait, depuis les expériences de M. Debray sur les hydrates salins, que leur décomposition est limitée à une température donnée par une tension de vapeur définie et que les différents hydrates d'un même sel sont caractérisés par des tensions différentes à une même température. J'en avais conclu immédiatement que les températures de décomposition des deux hydrates du sulfate de chaux étaient précisément celles pour lesquelles leur tension de vapeur sont égales à la pression atmosphérique et que par conséquent on abaisserait la température de décomposition en diminuant la pression. L'expérience a été de tout point contraire à ces prévisions, comme le montre le tableau suivant :

Pressions.	1 <sup>re</sup> température. stationnaire.	2 <sup>e</sup> température. stationnaire.
760 <sup>mm</sup>	128°	163°
346	128	»
280	»	165
200	125	164

La température de décomposition est donc complètement indépendante de la pression; le phénomène observé n'est pas un phénomène de dissociation. J'ai reconnu, du reste, en employant les méthodes d'expérimentation habituelles, que la température de dissociation du sulfate de chaux à deux équivalents d'eau sous la pression de 760 millimètres est voisine de 110 degrés, c'est-à-dire no-

tablement inférieure à sa température de décomposition rapide. L'équilibre de pression est très long à atteindre, ce qui rend les expériences précises fort difficiles et m'a fait renoncer à les poursuivre.

La vitesse de décomposition, très lente à la température normale de dissociation, devient de plus en plus rapide à mesure que la température s'élève, pour devenir en quelque sorte instantanée ou du moins tellement rapide qu'elle échappe à tout moyen de mesure; c'est cette température de décomposition rapide que l'on observe dans les expériences d'échauffement progressif. Les expériences précédentes montrent qu'elle est indépendante de la pression; j'ai reconnu de plus qu'elle diffère peu de celle à laquelle le gypse commence à se déshydrater en présence de l'eau liquide.

On pouvait prévoir que cette température de décomposition varierait avec la rapidité de l'échauffement. J'ai pu, en effet, l'élever jusqu'à 133° en chauffant très rapidement le bain de paraffine employé dans les expériences. Pour la même raison, la température de cuisson industrielle pouvait être un peu plus basse à cause du temps plus considérable exigé pour l'échauffement des blocs relativement volumineux de pierre à plâtre. Des expériences faites sur une centaine de kilogrammes de matières par M. Lacauchie, directeur des usines à plâtre d'Argenteuil, ont donné 125°, nombre différant à peine de 128° que j'avais trouvé en opérant sur 10 grammes de gypse.

*Il reste donc acquis que la température de cuisson du gypse diffère de sa température de dissociation et qu'elle lui est toujours supérieure, qu'elle est indépendante de la pression, qu'elle n'est théoriquement susceptible d'aucune définition précise, mais qu'en fait elle varie dans des limites peu étendues et qu'elle reste comprise entre 120° et 130°.*

PRISE DU PLÂTRE. — Lavoisier, comme je l'ai dit plus haut, a fait voir que le plâtre pendant sa prise reprenait une quantité d'eau égale à celle qu'on lui avait enlevée pendant la cuisson pour reproduire du gypse cristallisé identique à celui qui constitue la pierre à plâtre. Cette analyse du phénomène de la prise est évidemment incomplète, elle ne montre ni comment l'hydrate qui se produit *cristallise*, ni comment sa cristallisation peut amener le *durcissement* de toute la masse.

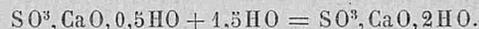
Dans tous les mémoires spéciaux ou traités de chimie générale qui se sont occupés jusqu'ici du plâtre, le mécanisme de la cristallisation a généralement été passé sous silence et le durcissement est attribué sans aucune explication à l'enchevêtrement, au feutrage des cristaux formés. On ne conçoit guère pourtant comment des cristaux rectilinéaires pourraient s'enchevêtrer à la façon des fils tordus qui constituent un feutre. La flexion de ces fils élastiques détermine une force de réaction qui les presse l'un contre l'autre et provoque au point de contact le développement d'efforts tangentiels de frottement; c'est là la seule cause de la résistance longitudinale de semblables systèmes. Des cristaux rigides ne sauraient donner naissance à des phénomènes analogues. Une expérience bien simple peut montrer l'insuffisance de cette explication; en précipitant par l'alcool une dissolution de sulfate de chaux on obtient un dépôt de petits cristaux de gypse, présentant un enchevêtrement aussi complet qu'on peut le désirer, et pourtant ne possédant aucune cohésion.

Je me crois donc autorisé à dire que cette question du mécanisme du durcissement du plâtre était restée entière au moment où j'en ai abordé l'étude. La solution de ce problème présentait une importance considérable, car il était bien probable a priori que la prise de tous les mortiers devait se faire d'une façon ana-

logue, et qu'il y avait lieu de distinguer dans chaque cas :

- Le phénomène chimique d'hydratation,
- Le phénomène physique de cristallisation,
- Le phénomène mécanique de durcissement.

*Hydratation.* — Au point de vue de la réaction chimique, il n'y a pas grand'chose à ajouter à ce qu'en a dit Lavoisier; le gypse  $\text{SO}^3, \text{CaO}, 2\text{HO}$  se reforme identique à celui qui constituait la pierre à plâtre. Seulement le plâtre renfermant déjà 0,5 équivalent d'eau, n'en fixe plus que 1,5 au contact de l'eau.



*Cristallisation du plâtre.* — Dans tous les exemples connus de cristallisation de sels au contact de l'eau, la formation des cristaux est précédée de la dissolution du sel qui donne aux molécules la mobilité nécessaire pour leur permettre de se déposer suivant un ordre géométrique. Il est donc bien probable a priori que la cristallisation du plâtre se produit par le même mécanisme, ou s'il n'en est pas ainsi, il faut de toute nécessité qu'il existe un état intermédiaire pendant lequel les molécules du plâtre possèdent une mobilité analogue à celle que leur communiquerait la dissolution, il n'y a pas d'exemple de corps solides prenant une forme cristalline sans changer d'état (\*).

La difficulté d'admettre que la cristallisation du plâtre

---

(\*) Les prétendues formes cristallines obtenues par M. Spring en comprimant des corps solides ne sont que des surfaces de glissement produites par le frottement du corps sur les parois du moule. Les expériences de M. Fizeau sur la compression du précipité d'iode d'argent, bien antérieures, du reste, à celles de M. Spring, ont été complètement démonstratives à cet égard.

soit précédée de sa dissolution, provient de ce que la quantité d'eau libre contenue dans le mortier, qui est de 20 p. 100 environ, ne suffirait à dissoudre que 1/2.500 du sulfate de chaux auquel elle est mêlée; et l'on ne voit pas de raison pour que ce sel, une fois dissous, se précipite et permette ainsi à l'eau d'en dissoudre une nouvelle quantité.

Cette difficulté me paraît pouvoir être très aisément résolue en s'appuyant sur l'expérience suivante de M. Marignac. Ce savant a reconnu que, si l'on préparait une dissolution de sulfate de chaux en agitant du plâtre cuit avec une certaine quantité d'eau et filtrant la liqueur au bout de quelques instants, cinq minutes environ, on obtenait une dissolution cinq fois plus concentrée que si on l'avait préparée avec du sulfate de chaux hydraté à deux équivalents d'eau. Mais cette dissolution se trouble bientôt, laisse déposer des cristaux de gypse et revient, au bout d'un temps plus ou moins long, à sa concentration normale. La solution saturée de sulfate de chaux déshydraté est donc sursaturée par rapport au sulfate hydraté (\*).

Le mécanisme de la cristallisation du plâtre, pendant sa prise, serait alors le suivant : le plâtre cuit s'hydrate au contact de l'eau qui a servi à le gâcher et donne

(\*) L'intervention des phénomènes de sursaturation avait été invoquée par M. Landrin (*Ann. de phys. et de chim.*, 5<sup>e</sup> série, t. III, p. 441), dans une théorie fort complexe de la prise du plâtre. Cet auteur admettait que le plâtre, après s'être hydraté, donnait une solution saturée de sulfate de chaux qui se sursaturait ensuite en se concentrant par évaporation; cette évaporation serait la condition indispensable du durcissement. Pour démontrer l'inexactitude d'une semblable théorie, il suffit de mettre du plâtre gâché avec de l'eau dans un vase hermétiquement fermé, où toute évaporation est impossible, on voit la prise se faire aussi rapidement qu'à l'air. Du reste, la quantité de plâtre qui pourrait ainsi cristalliser par évaporation ne serait qu'une fraction négligeable de la masse totale.

une dissolution qui laisse bientôt cristalliser du sulfate hydraté et devient alors capable de dissoudre de nouvelles quantités de sulfate déshydraté. Le phénomène continue ainsi jusqu'à hydratation et cristallisation complète du plâtre. En réalité, ces deux actions contraires se produisent simultanément en des points voisins; la dissolution continue de nouvelles quantités de plâtre compense l'appauvrissement de la liqueur résultant du dépôt également continu des cristaux hydratés. Le degré de saturation auquel se maintient la liqueur dépend de la vitesse relative de ces deux phénomènes contraires. Quand l'hydratation est très lente la sursaturation reste faible; quand elle est rapide, la sursaturation, au contraire, devient considérable.

Si cette explication est la vraie, il doit en résulter que les points où se déposent les cristaux hydratés ne sont pas nécessairement à l'emplacement occupé par les grains de plâtre; c'est bien ce que l'on constate en suivant l'hydratation sous le microscope. On voit se former de grandes aiguilles au milieu de vides remplis d'eau.

Pour démontrer d'une façon incontestable la réalité de la dissolution momentanée de la totalité du sulfate de chaux, il aurait fallu produire la cristallisation complètement en dehors de la masse de plâtre. Jé n'ai pas réussi l'expérience avec ce sel, mais avec le sulfate de soude anhydre, sel beaucoup plus soluble qui fait également prise au contact de l'eau.

M. de Coppet (\*) a montré que ce sel anhydre, mis en présence de l'eau, donne des solutions fortement sursaturées, même lorsqu'on a soin de *s'opposer à toute élévation de température*. Ce fait a été nié *a priori* par M. Gernez (\*\*), qui attribue la sursaturation à une simple

(\*) C. R. LXXIII, p. 1.324.

(\*\*) *Ann. de l'École normale*, 1878, 2<sup>e</sup> série, t. VII, p. 67.

élévation de température, mais j'ai vérifié à diverses reprises l'exactitude de l'affirmation de M. de Coppet, soit sur le sulfate, soit sur le carbonate de soude. On peut donc établir une analogie complète entre la façon dont se comportent ces sels, et le sulfate de chaux pour lequel l'élévation de température ne joue certainement aucun rôle, puisqu'elle ne fait pas varier notablement sa solubilité.

Avec le sulfate de soude, la cristallisation à distance du sel hydraté, s'obtient facilement en utilisant la plus grande densité de ses dissolutions sursaturées. Dans un tube en verre de 1 centimètre de diamètre divisé à mi-hauteur par une toile métallique et rempli d'eau, je place à la partie supérieure du sulfate de soude fondu et concassé en morceaux de la grosseur d'un pois. Il est nécessaire que les morceaux ne soient pas trop fins pour permettre, d'une part, la circulation facile du liquide et éviter, d'autre part, l'élévation de température qui résulterait de l'hydratation simultanée d'une trop grande quantité de sel. Le tube est plongé dans une masse d'eau considérable et je me suis assuré que dans la condition de mes expériences l'élévation de la température ne dépassait pas un demi-degré. Au bout de quelques heures, il se forme au fond du tube, c'est-à-dire au-dessous de la toile métallique et à plusieurs centimètres de distance du sel anhydre, des cristaux de sel hydraté qui remplissent peu à peu le tube sur tout son diamètre. La prise, le durcissement résultent précisément de la formation de cette masse solide et cohérente. Dans les conditions normales de prise, cette cristallisation se produit au début dans les interstices même existant entre les grains de sel anhydre et ensuite dans ceux qui sont produits par la dissolution progressive de ces mêmes fragments.

Je parlerai ici incidemment des ciments et produits

similaires pour n'avoir pas à répéter la même chose à propos de l'étude de chacun d'eux.

Le *silicate de baryte* qui s'hydrate au contact de l'eau en faisant prise donne des solutions sursaturées qui, filtrées rapidement et gardées à l'abri de l'acide carbonique de l'air, laissent déposer le silicate hydraté cristallisé.

Il en est encore de même pour les divers aluminates de chaux qui concourent à la prise des ciments.

Ces expériences montrent bien que pour les sels faisant prise par simple hydratation la cristallisation est la conséquence de la production préalable d'une dissolution sursaturée. Il en est encore de même lorsque la prise ne résulte pas d'une simple hydratation, mais de la combinaison en présence de l'eau de deux composés différents.

M. Sorel a montré, en 1855, qu'une solution concentrée de chlorure de zinc additionnée d'oxyde de zinc donne, au bout de peu de temps, une masse solide d'oxychlorure présentant une dureté considérable. J'ai reconnu qu'en employant un excès de chlorure de zinc et filtrant au bout de cinq minutes d'agitation la liqueur non encore solidifiée, celle-ci laissait déposer, après vingt-quatre heures de repos, de l'oxychlorure cristallisé formant entre les parois de la fiole un enduit consistant de 1 millimètre d'épaisseur; la dissolution était donc bien sursaturée.

De même une solution de chlorure de calcium agitée avec une certaine quantité d'hydrate de chaux, puis filtrée, laisse déposer de volumineux cristaux d'oxychlorure de calcium.

M. Ditte (\*) a fait voir que du gypse pulvérisé, gâché avec une solution saturée de sulfate de potasse se prend en une masse solide. J'ai reconnu que le liquide filtré après cinq minutes d'agitation, avant le commencement

(\*) *Ann. de l'École normale*, 1876, 2<sup>e</sup> série, t. V, p. 102.

de la prise, se remplit, au bout de quelques heures, de cristaux de sulfate double. Dans ce cas, la sursaturation est tellement forte et, par suite, la cristallisation tellement abondante que la liqueur filtrée devient pâteuse par suite de la grande quantité de cristaux qu'elle tient en suspension. Les phénomènes sont absolument les mêmes pour l'iodure double de plomb et de potassium.

Tous les composés qui prennent naissance dans les expériences précédentes sont fortement hydratés, mais on obtient encore les mêmes phénomènes de sursaturation dans la formation de composés anhydres. Ainsi, le carbonate de chaux s'obtient très facilement sursaturé en agitant de l'hydrate de chaux avec une solution d'un carbonate alcalin et filtrant la liqueur au bout de quelques instants.

La conclusion à tirer de toutes ces expériences est donc que la cristallisation qui accompagne la prise de tous les corps durcissant au contact de l'eau résulte de la production préalable d'une dissolution sursaturée.

La formation de ces dissolutions sursaturées se rattache très simplement aux lois générales des phénomènes de dissolution que j'ai établies dans un travail antérieur (\*).

J'ai montré que si l'on appelle :

- S le coefficient de solubilité du sel,
- Q la chaleur moléculaire de dissolution à saturation,
- T la température absolue,

on a la relation :

$$\log S = M \int \frac{Q}{T^2} dT + K.$$

Pour un autre hydrate du même sel on aura :

$$\log S' = M \int \frac{Q}{T^2} dT + K'.$$

(\*) *Comptes rendus*, t. C, p. 50.

D'où l'on tire pour le rapport des deux solubilités :

$$\log \frac{S}{S'} = M \int \frac{Q - Q'}{T^2} dT + K - K'.$$

Mais l'expérience montre que conformément à une loi générale d'équivalence des systèmes en équilibre chimique (\*), les coefficients de solubilité des deux hydrates sont les mêmes à leur température de transformation réciproque. En appelant  $T_0$  cette température, il vient :

$$\log \frac{S}{S'} = M \int_{T_0}^T \frac{Q - Q'}{T^2} dT.$$

Pour le plâtre, la température de transformation est de 130° environ, d'où :

$$T_0 = 273 + 130 = 403.$$

La chaleur de déshydratation  $Q - Q'$  est d'environ 1<sup>cal</sup>,8.

Ces nombres reportés dans l'équation ci-dessus montrent qu'à 15° le rapport de la solubilité du plâtre cuit à celle du gypse est voisin de 7.

M. Marignac avait trouvé par l'expérience le rapport 5; ces deux nombres sont aussi concordants qu'on peut le désirer, étant donné le peu de stabilité de cette dissolution qui commence à se désaturer avec une très grande rapidité.

*Il est donc bien établi que la cristallisation qui accompagne le durcissement des mortiers résulte de la différence de solubilité des corps qui font prise et de ceux qui se forment pendant la prise, les premiers se trouvant à l'état d'équilibre instable en présence de l'eau et ne pouvant y subsister que momentanément.*

La production de dissolutions sursaturées joue encore un autre rôle dans les phénomènes de durcissement en

(\*) *Comptes rendus*, juin 1886.

influant sur la forme des cristaux qui se précipitent. Ceux-ci prennent très fréquemment, dans ces conditions, un développement anormal suivant une direction et se présentent alors sous la forme de longs prismes extrêmement déliés, de véritables fils dont la longueur peut dépasser cent fois l'épaisseur. C'est ainsi que cristallisent de leurs dissolutions sursaturées l'acétate, le sulfate, l'hyposulfite de soude qui, dans les conditions normales, se présentent en cristaux également développés dans tous les sens. Ces prismes déliés ne restent pas isolés, mais se groupent autour d'un point central en se soudant par une de leurs extrémités. Les autres extrémités des cristaux forment une surface sensiblement sphérique et qui reste telle pendant toute la durée de la cristallisation. Les cristaux qui se produisent pendant la prise des mortiers se présentent toujours en groupements sphériques semblables à ceux que je viens de décrire, mais souvent les cristaux sont tellement déliés qu'il faut recourir aux plus forts grossissements du microscope pour les distinguer. Avec le plâtre, par exemple dans les conditions de prise normales, la cristallisation est à peine discernable et pour la mettre en évidence, il faut gâcher le plâtre avec de l'eau alcoolisée qui ralentit l'hydratation et permet aux cristaux de prendre un développement plus considérable. Le sulfate double de chaux et de potasse, au contraire, donne des groupements de près de 1 centimètre de diamètre dans lesquels chacun des cristaux est discernable à l'œil nu.

*Ainsi, les cristaux qui se forment pendant le durcissement sont fréquemment, sinon toujours, des prismes extrêmement déliés, soudés par une de leurs extrémités autour de points centraux de façon à constituer de petits groupements sphériques.*

La solubilité des corps mis à durcir au contact de l'eau influe évidemment sur la rapidité de la cristallisation et,

par suite, sur celle de la prise. Le sulfate de chaux, relativement soluble, fait prise plus vite que l'aluminate de chaux, qui lui-même prend plus rapidement que le silicate de chaux. J'ai reconnu qu'en faisant dissoudre dans l'eau employée au gâchage des corps qui tendent à augmenter la solubilité des produits mêlés à l'eau, on augmente la rapidité de prise de ces derniers. L'acide sulfurique, l'hyposulfite de soude produisent un semblable effet pour le plâtre :

	Durée de prise du plâtre.
Eau pure. . . . .	15 minutes
Solution de NaO, S <sup>2</sup> O <sup>2</sup> à 1 p. 100. . . .	11 —
— à 3 — . . . .	8 —

*Durcissement.* — J'ai, dans le paragraphe précédent, rattaché les phénomènes *physiques de cristallisation* aux phénomènes *chimiques d'hydratation*; je me propose maintenant de montrer comment le phénomène *mécanique* du durcissement peut se rattacher à la cristallisation.

Pour étudier cette question, je me suis laissé guider par l'idée préconçue que le durcissement des mortiers ne devait pas être un fait isolé et sans analogie, qu'il était certainement semblable, peut-être même identique à l'un des modes de durcissement connus. Tous ceux-ci : durcissement par *compression* d'une matière pulvérulente, par *dessiccation* d'une matière pulvérulente (argile) ou colloïdale (gélatine), par fusion et *solidification* (métaux), par *cristallisation* (sel soluble), peuvent être ramenés à deux phénomènes plus simples et plus généraux :

*Adhérence* mutuelle des particules solides, amenées à une très petite distance l'une de l'autre;

*Mobilité* de ces mêmes particules leur permettant de se rapprocher.

Ce sont là les deux facteurs dont j'ai cru devoir étudier le rôle dans le durcissement des mortiers. Pour ce qui

concerne la mobilité, le problème est résolu par ce que j'ai dit du mécanisme de la cristallisation, c'est la dissolution momentanée du sel faisant prise qui procure la mobilité nécessaire. La prise des mortiers rentre évidemment dans la catégorie des phénomènes de durcissement par dissolution et cristallisation.

Une fois le rapprochement des particules solides produit, la dureté définitive dépendra de la *cohésion* interne des cristaux et de leur *adhérence* mutuelle.

La *cohésion* varie d'un corps à l'autre entre des limites très étendues, dont les deux termes extrêmes parmi les corps entrant dans la composition des divers mortiers, sont : le *plâtre* assez mou pour se laisser rayer par l'ongle et le *quartz* assez dur pour rayer l'acier. La cohésion des corps est une propriété primordiale de la matière, que nous ne pouvons, dans l'état actuel de nos connaissances, chercher à rattacher à aucun fait plus simple et plus général. On ne peut donc de ce côté essayer de pousser plus loin l'analyse du durcissement des mortiers.

L'*adhérence*, contrairement à la cohésion, est un phénomène très complexe et par suite très variable. Ce sont ses variations qui expliquent presque exclusivement les différences considérables de résistance que présentent souvent des mortiers analogues.

Elle varie avec la *nature chimique* des corps en contact ; l'adhérence d'un cristal de sulfate de chaux avec une lame de verre sur laquelle il se forme est complètement nulle ; elle est, au contraire, tellement considérable avec le silicate de baryte que les cristaux se brisent plutôt que de se laisser arracher du verre. Elle varie également avec l'état physique, le poli plus ou moins parfait des surfaces de contact.

L'adhérence totale est évidemment proportionnelle à l'étendue des surfaces de contact ; elle sera d'autant plus grande que : 1° le volume des espaces vides provenant

de l'excès d'eau employé dans le gâchage sera moindre ; 2° que chaque cristal pour un poids donné de matière présentera un plus grand développement de surface. La forme de prismes allongés que j'ai reconnue dans la cristallisation du plâtre et de tous les produits similaires est donc éminemment favorable au développement de l'adhérence ; 3° que les cristaux seront groupés de façon à augmenter le volume des espaces vides en en diminuant le nombre, et en les isolant les uns des autres. Une répartition des vides semblable à celle de la pierre ponce sera particulièrement favorable. Mais de très légères variations dans les conditions extérieures : nature du dissolvant, température, germes cristallins en présence modifient considérablement les conditions de développement des cristaux et doivent, par suite, exercer une influence semblable sur la résistance finale du mortier.

---

## DEUXIÈME PARTIE

### CIMENT DE BARYTE

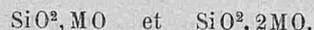
---

Les analogies de la chaux et de la baryte permettent de prévoir l'existence de composés barytiques jouissant de propriétés analogues à celles des ciments calcaires, c'est-à-dire susceptibles de faire prise sous l'eau. J'ai reconnu, en effet, que la silice et la baryte peuvent donner ensemble des composés hydrauliques. Ces produits ne présentent aucun intérêt au point de vue industriel par suite du prix élevé de la baryte, mais au point de vue théorique,

ils sont intéressants à étudier à cause des renseignements qu'ils peuvent fournir sur les composés calcaires correspondants dont la préparation est plus difficile.

J'ai commencé par l'étude des silicates de baryte anhydres et hydratés qui n'avait pas encore été faite.

*Silicates anhydres.* — Tous les protoxydes se combinent à la silice en deux proportions au moins pour donner des sels anhydres répondant aux formules :



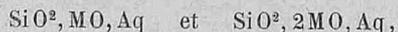
On peut préparer les silicates de baryte correspondants en fondant au creuset brasqué un mélange de silice et de baryte anhydre en proportions voulues.

Le silicate monobarytique  $\text{SiO}_2, \text{BaO}$  est facilement fusible au four à vent, un peu moins cependant que le silicate de chaux correspondant. Il se présente après refroidissement sous la forme d'un culot compact à cassure cristalline. Taillé en lame mince et examiné au microscope polarisant, il présente un enchevêtrement confus de longs cristaux prismatiques sans contours nets, à double réfraction faible, à clivages faciles.

Le silicate dibarytique  $\text{SiO}_2, 2\text{BaO}$  s'agglomère au four à vent sans fondre complètement; il donne, après refroidissement, un culot poreux qui se laisse difficilement tailler en lame mince et ne donne au microscope polarisant que l'apparence d'une cristallisation confuse.

*Silicates hydratés.* — Les silicates hydratés, simples, bien définis que l'on connaît sont très peu nombreux.

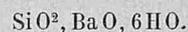
Ils répondent à l'une des deux formules :



c'est-à-dire à celles des silicates anhydres, plus de l'eau.

J'ai cherché à obtenir les silicates de baryte correspondants, mais je n'ai pu préparer que celui qui ren-

ferme un équivalent de base dont la formule est :



Je le prépare en précipitant l'eau de baryte par une dissolution de silicate de soude, ou de silice colloïdale.

Le précipité au premier instant est extrêmement volumineux et ne présente, sous le microscope, aucune apparence cristalline; c'est donc ce que l'on appelle un précipité amorphe. Il est pourtant bien probable qu'il est cristallisé, mais que la rapidité de la précipitation et sa faible solubilité rendent les cristaux trop petits pour être visibles, même sous un fort grossissement.

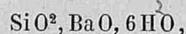
Au bout de 24 heures ce précipité de silicate de baryte change complètement d'aspect; il se rassemble au fond du liquide sur une très faible épaisseur après s'être transformé en cristaux tabulaires visibles à l'œil nu. Cette cristallisation des précipités est, d'ailleurs, un fait très fréquent. Le mécanisme de ce phénomène est tout à fait analogue à celui que j'ai reconnu pour la prise des mortiers. Au moment de la précipitation du silicate de baryte, ce n'est pas la variété la plus stable de ce sel, et, par suite, la moins soluble qui se forme, mais bien, soit un hydrate particulier comme on en obtient parfois avec les solutions fortement sursaturées de sulfate de soude, soit une variété dimorphe comme on en obtient avec les solutions sursaturées d'azotate de potasse, de chlorate de soude dans l'eau, d'iodure de mercure dans l'alcool. Après la précipitation de cette variété plus soluble, la dissolution reste sursaturée par rapport à la variété plus stable et, par suite, peut la laisser cristalliser à son tour; elle diminue alors de concentration, redissout une certaine quantité du premier sel précipité et se sursature de nouveau par rapport au second sel dont elle peut laisser cristalliser une nouvelle quantité, et ainsi de suite jusqu'à la transformation totale du précipité. En réalité, ces deux

phénomènes de dissolution et de cristallisation se produisent simultanément, mais en des points différents. Les nouveaux cristaux formés seront d'autant plus gros que la transformation aura été plus lente. C'est exactement le même mécanisme que celui de la cristallisation du plâtre et de tous les mortiers.

On peut vérifier l'exactitude de l'interprétation que je propose de ce phénomène, en suivant au microscope la transformation de sels assez solubles pour que le premier précipité paraisse déjà nettement cristallisé. On voit les cristaux du premier précipité se dissoudre et se ronger complètement au fur et à mesure de la formation de la seconde variété. L'expérience est très nette avec l'oxalate double de cuivre et de potasse et surtout l'iodure de mercure précipité de sa dissolution alcoolique.

En refroidissant la dissolution alcoolique saturée à chaud d'iodure rouge, on obtient un précipité cristallin d'iodure jaune se présentant parfois en larges lamelles très minces. Celles-ci, abandonnées dans un peu de liqueur alcoolique où elles se sont formées, se corrodent peu à peu au bout de quelques heures, et il se développe au milieu des échancrures de petits cristaux d'iodure rouge qui grossissent au fur et à mesure que les lamelles jaunes se rongent de plus en plus jusqu'à disparaître complètement.

Le précipité de silicate de baryte définitivement obtenu présente une composition qui peut être représentée par la formule



comme le montre l'analyse suivante :

	Observé.	Calculé.
SiO <sub>2</sub> . . . . .	18,2	17,7
BaO . . . . .	45,5	45,2
H <sub>2</sub> O . . . . .	35,3	37,1
Total . . . . .	99,00	100,00

Dans différentes analyses, la proportion d'eau a varié de 6 à 7 équivalents; j'ai pris le nombre le plus faible, car on est plutôt exposé à des erreurs par excès résultant de l'eau d'interposition entraînée par les cristaux.

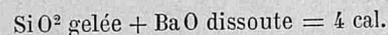
On peut obtenir des cristaux relativement volumineux et propres aux déterminations cristallographiques, en faisant réagir par diffusion des dissolutions superposées de silicate de soude et d'hydrate de baryte. M. Mallard a bien voulu déterminer ces cristaux.

Cristaux orthorhombiques :

$$a : b : c = 1,1723 : 1 : 0,6628.$$

Bissectrice aiguë positive normale à  $h_1$ . Plan des axes perpendiculaires à  $g_1$ . Dispersion  $\rho < v$ . Double réfraction faible.

Angle des axes dans l'air pour la lumière jaune,  $59^\circ 40'$ . J'ai reconnu que la formation de ce sel dégage

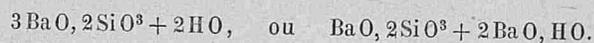


Ce sel est décomposé par l'eau comme le sont en général les sels des acides faibles. La décomposition s'arrête à la température de 15 degrés lorsque la quantité de baryte renfermée dans un litre de liqueur est de 0<sup>g</sup>,91.

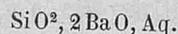
Des lavages prolongés faits avec une quantité suffisante d'eau amènent la décomposition complète de ce sel et laissent un résidu de silice pure; une partie de la silice se dissout dans les eaux de lavage et est entraînée avec la baryte.

Le silicate neutre de baryte est légèrement soluble dans l'eau renfermant une quantité de baryte suffisante pour s'opposer à sa décomposition. On reconnaît la présence de silice dans la liqueur au moyen de l'eau de chaux qui donne immédiatement un précipité blanc, laiteux, résultant de la bien moindre solubilité du silicate de chaux.

Ce même silicate de baryte se produit spontanément dans les flacons d'eau de baryte des laboratoires aux dépens de la silice du verre; il se présente alors en cristaux assez volumineux adhérant fortement aux parois des flacons. La nature de ces cristaux des flacons d'eau de baryte avait été reconnue antérieurement à mes recherches, mais sans que j'en aie eu connaissance, par M. Pisani (\*). Ce savant en avait donné l'analyse et les caractères cristallographiques, mais il leur avait attribué par suite d'une erreur de virgule dans ses calculs les formules inexactes :



J'ai essayé sans succès d'obtenir le silicate à deux équivalents de base



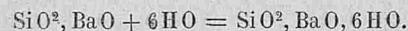
Ce résultat n'a rien qui doive surprendre, il est d'accord avec ce que nous savons de la stabilité décroissante des sels d'un même acide polybasique.

Les expériences calorimétriques de M. Berthelot ont montré que les acides boriques, phosphoriques, etc., donnent avec les alcalis des sels basiques très facilement décomposés par l'eau; il ne se forme même une petite quantité de ceux-ci que grâce à la solubilité de tous les produits de leur décomposition, qui permet à ces derniers de rester en présence et par conséquent de limiter la décomposition. Dans le cas des sels de baryte, le silicate monobarytique, qui est évidemment un des produits de la décomposition du silicate dibarytique, étant insoluble, se sépare du champ de la réaction, conformément aux lois de Berthollet, et permet à la décomposition de se continuer

(\*) *Comptes rendus*, 27 novembre 1876.

indéfiniment. Cette expérience ne prouve donc pas la non-existence d'hydrates du silicate dibarytique, mais seulement l'impossibilité de les obtenir en présence de l'eau liquide, c'est-à-dire au point de vue spécial qui m'occupe dans les conditions habituelles de la prise des ciments.

*Ciments de baryte.* — Le plus simple des ciments de baryte est celui que l'on obtient en pulvérisant le silicate monobarytique anhydre  $\text{SiO}^2, \text{BaO}$  obtenu par fusion et le gâchant avec de l'eau. La prise résulte d'une simple hydratation



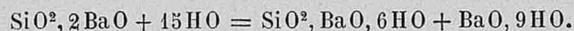
La réaction qui amène la prise est donc identique à celle qui se produit avec le plâtre. De même pour le mécanisme de la cristallisation et du durcissement.

Le silicate dibarytique  $\text{SiO}^2, 2\text{BaO}$  fait également prise au contact de l'eau. Il donne une masse compacte, légèrement translucide, traversée en tous sens par de grands cristaux lamellaires dont la section se détache d'une façon très nette sur la surface de rupture des morceaux de ciment. En laissant la prise se faire sous une couche d'eau distillée dans un vase hermétiquement clos, la surface du ciment se hérissé de lamelles cristallines qui sont le prolongement même de celles qui traversent la masse. En les détachant avec soin au moyen d'une pince et les analysant, j'ai reconnu des cristaux d'hydrate de baryte souillés d'un peu de silicate.

BaO. . . . .	43,7
HO . . . . .	52,0
SiO <sup>2</sup> . . . . .	3,0
	99,7

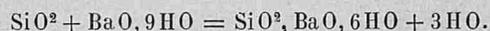
En rapprochant cette formation de baryte libre de l'impossibilité d'obtenir, en présence de l'eau, le silicate

dibarytique, on en conclut que la réaction amenant la prise est un dédoublement du silicate anhydre suivant la formule :



Cette réaction présente un intérêt particulier au point de vue de l'étude des ciments calcaires ; la prise de ces derniers, comme je le montrerai plus loin, résulte également du dédoublement d'un silicate de chaux basique en présence de l'eau avec formation de grandes lamelles cristallisées d'hydrate de chaux.

La silice calcinée et l'hydrate de baryte pulvérisé gâchés avec la plus petite quantité d'eau possible, font encore prise par suite de la combinaison de ces deux corps :



La dureté du produit est très faible ; l'inconvénient, signalé pour le plâtre, de la combinaison incomplète de l'eau se trouve ici encore exagéré. La formule de la réaction montre que non seulement aucune partie de l'eau employée au gâchage n'entre en combinaison, mais encore une partie de celle combinée à la baryte est mise en liberté. Les solutions de continuité occasionnées par la présence de cette eau liquide sont donc plus considérables que pour tout autre mortier.

*En résumé, la prise de tous les ciments de baryte siliceux résulte de la formation d'un même silicate de baryte hydraté*



*qui peut être produit par des réactions diverses :*

*Soit par hydratation pure et simple du silicate monobarytique anhydre,*

*Soit par dédoublement de silicates anhydres plus basiques avec mise en liberté de baryte,*  
*Soit par combinaison directe de la silice et de la baryte.*

---

### TROISIÈME PARTIE

#### MORTIERS CALCAIRES

---

Les mortiers calcaires se divisent en deux catégories :

Mortiers *aériens* ;

Mortiers *hydrauliques*.

Je dirai seulement quelques mots des premiers. Je ne les ai étudiés qu'en tant qu'ils pouvaient jeter quelque jour sur les mortiers hydrauliques, les seuls que j'aie en vue ici.

#### Mortiers aériens.

Ces mortiers s'obtiennent en gâchant avec du sable de la *chaux éteinte*, c'est-à-dire l'hydrate de chaux pulvérent obtenu par l'action de l'eau sur la chaux vive. Leur prise, comme l'a montré Vicat, résulte exclusivement, au moins dans sa première phase, de la dessiccation qui amène en contact intime les particules extrêmement ténues de chaux. Ce phénomène est identique à celui du durcissement de l'argile. Le sable joue le même rôle que lorsqu'il est ajouté à l'argile pour la fabrication des briques. Il s'oppose à ce que le retrait accompagnant néces-

sairement la dessiccation se fasse sentir sur toute la masse et se traduise par des fentes traversant le mortier sur toute son épaisseur, lui enlevant ainsi toute solidité. Les grains de sable au contact forment une carcasse incompressible qui ne permet au retrait de s'effectuer que dans l'intervalle existant entre ces grains et produisant ainsi des vides discontinus qui diminuent, il est vrai, la section pleine, et, par suite, la résistance, mais n'amènent nulle part de solution complète de continuité.

On voit pourquoi ces mortiers sont dits *aériens*; ils ne peuvent évidemment jamais durcir sous l'eau, ni dans tout autre endroit où l'évaporation serait impossible. On a trouvé au milieu de massifs épais de maçonnerie des mortiers semblables âgés de cinq cents ans aussi mous qu'à le jour de leur emploi. Si ces mortiers après dessiccation viennent à être mouillés, ils se ramollissent de nouveau et perdent toute consistance. Ils ne présenteraient donc jusqu'ici aucun avantage sur les mortiers faits avec de l'argile. Mais il existe une seconde phase de durcissement pour les mortiers de chaux grasse, dite *période de carbonatation* pendant laquelle ils augmentent encore la résistance et perdent en même temps leur altérabilité sous l'influence des eaux pluviales. Cette modification résulte de l'absorption de l'acide carbonique de l'air qui transforme l'hydrate de chaux en carbonate; elle est très lente à se produire et reste toujours superficielle; elle ne se fait dans de bonnes conditions que lorsque le mortier est humide, sans être pourtant complètement imbibé d'eau.

*Cuisson de la chaux.* — La chaux s'obtient par la décomposition du carbonate de chaux sous l'influence de la chaleur. On sait, depuis les expériences de M. Debray, que cette décomposition est soumise aux lois de la dissociation, c'est-à-dire qu'elle est limitée à une température

donnée par une tension définie de l'acide carbonique. Mais les déterminations numériques précises sur ce sujet faisaient défaut. Je me suis proposé de combler cette lacune. J'ai employé pour la mesure des températures un couple thermoélectrique platine, platine rhodié relié à un galvanomètre aperiodique de MM. M. Deprez et d'Arsonval (\*).

Il était probable, par analogie avec ce que j'avais observé dans la cuisson du gypse, que la température de cuisson rapide du calcaire devait être supérieure à celle de dissociation sous la pression atmosphérique. J'ai déterminé tout d'abord cette température de cuisson en plaçant la soude du couple au milieu d'une petite masse de carbonate de chaux pulvérisé et étudiant la loi d'échauffement, comme je l'avais fait pour le gypse. J'ai observé un point d'arrêt assez net variant de 890 à 930 degrés pour les diverses variétés de carbonate de chaux (carbonate précipité, craie et marbre). La cuisson industrielle de la chaux se faisant plus lentement doit exiger une température au plus égale à 890 degrés; ce nombre est une limite supérieure, de même que le chiffre de 128 degrés que j'ai déterminé pour la cuisson du plâtre. Lorsque le carbonate de chaux renferme de la magnésie, on observe un premier point d'arrêt voisin de 720 degrés qui correspond à la décomposition du carbonate de magnésie.

Avant d'aborder l'étude complète de la dissociation du carbonate de chaux, j'ai fait quelques recherches préliminaires sur la rapidité avec laquelle l'équilibre est atteint. On sait qu'une des principales causes d'erreur dans les recherches de ce genre provient de ce que l'on n'attend généralement pas assez longtemps pour laisser l'équilibre

(\*) Le Chatelier, De la mesure des températures élevées par les couples thermo-électriques (*Bull. de la Soc. de phys.*, juillet 1886).]

s'établir. Les expériences préliminaires m'ont montré qu'à une même température, la tension limite est la même pour le carbonate précipité, la craie et le marbre, mais que la limite est beaucoup plus rapidement atteinte avec le carbonate précipité, aussi me suis-je exclusivement servi de ce dernier pour les mesures définitives. J'ai reconnu, en outre, qu'aux températures inférieures à 500 degrés, la décomposition est tellement lente que les expériences précises deviennent impraticables. A 500 degrés, la limite n'était atteinte qu'au bout de deux heures, ce qui représentait, étant donné le poids des matières et le volume des appareils, une décomposition à l'heure de 1/10.000 seulement de la matière mise en expérience.

Les expériences définitives ont été faites dans un tube en porcelaine bourré de carbonate précipité dans la partie chauffée et rempli au delà de fragments de marbre pour diminuer l'espace vide. Le couple était placé au milieu du carbonate. Le tube était chauffé dans un four à température assez constante pour que, dans une expérience prolongée douze heures, la température n'ait monté que de 10 degrés du commencement à la fin de l'expérience. Le couple avait été gradué immédiatement avant les expériences au moyen des points d'ébullition du soufre, du sélénium et de la fusion de l'or. On s'est assuré que le couple n'avait pas éprouvé d'altération pendant le cours des expériences, en reprenant immédiatement après le point de fusion de l'or. Le couple avait été enveloppé d'une petite feuille d'or avant d'être placé dans le carbonate, et une fois la dissociation terminée, la température a été élevée graduellement, de façon à obtenir la fusion de la feuille d'or dans l'appareil même où les expériences venaient d'être faites.

*Graduation du couple.*

	Température de la soudure		Déviations du galvanomètre, N
	chaude.	froide.	
	$t$	$t_0$	
Ebullition du soufre . . . .	degr. 448	degr. 28	32,0
— du sélénium . . . .	665	28	56,0
Fusion de l'or, avant . . . .	1.045	28	98,0
— après . . . .	1.045	28	98,5

Ces chiffres montrent que, dans l'intervalle de température considéré, on peut remplacer la courbe représentant les déviations en fonctions des températures par sa tangente dont l'équation est

$$N = -14 + 0,11(t - t_0),$$

formule empirique qui a servi pour les calculs ultérieurs.

La tableau suivant donne les résultats définitifs des expériences :

*Dissociation de CaO, CO<sup>2</sup>.*

Galvanomètre.	Soudure froide.	Température.	Pression.
N	$t_0$	$t$	$h$
millim.	degr.	degr.	millim.
43,5	22,0	547	27
50,2	22,0	610	46
51,5	24,0	625	56
64,6	25,5	740	255
64,8	26,0	745	289
72,0	26,5	810	678
72,2	25,0	812	763
78,0	27,0	865	1.333

Ces pressions et ces températures doivent, comme l'on sait, être reliées par l'équation connue :

$$\log p + \frac{1}{AR} \frac{L}{T} = \text{constante.}$$

En admettant que la chaleur latente de réaction à pression constante  $L$  reste invariable dans l'intervalle de température considéré, et en représentant cette équation par une courbe dont les ordonnées sont les logarithmes des pressions et les abscisses les inverses des températures, on doit avoir une droite. Les expériences se plaçant, en effet, toutes bien régulièrement sur une droite, sauf la première pour laquelle la pression demanderait à être réduite de 10 millimètres. Il y a très vraisemblablement là une erreur d'expérience due à la rentrée de petites quantités de gaz dans le tube en porcelaine. Cette expérience avait duré trois heures, et il est difficile de trouver des tubes qui tiennent plusieurs heures le vide lorsqu'ils sont chauffés au rouge.

L'équation rapportée plus haut permet de calculer la chaleur moléculaire de combinaison  $C^2O^4 + 2CaO$  dans les conditions de température de l'expérience. On trouve ainsi :

$$L_{750} = 28^{cal}.$$

Tandis qu'à la température ordinaire.

$$L_{15} = 38^{cal}.$$

L'écart est dans le sens qu'on pouvait prévoir d'après le jeu des chaleurs spécifiques.

La valeur de la chaleur de dissociation ainsi trouvée, 28 calories pour un poids moléculaire d'acide carbonique, est d'accord avec une loi que j'ai formulée récemment (\*)

et qui veut que le quotient  $\frac{L}{T}$  soit sensiblement constant et renfermé dans les limites 0,021 à 0,026.

On trouve, en effet

$$\frac{28}{273 + 812} = 0,025.$$

(\*) *Bull. de la Soc. chim.*, mai 1887.

Ces chiffres montrent que la tension de dissociation est égale à la pression atmosphérique vers 812 degrés. Ce chiffre est notablement inférieur à la température de cuisson rapide que j'avais trouvée égale à 890 degrés. La cuisson industrielle, qui est assez lente, doit se faire à température intermédiaire entre ces deux chiffres. On peut prendre en nombre rond 850 degrés.

### Mortiers hydrauliques.

Les produits hydrauliques se divisent en trois catégories bien tranchées :

*Ciments;*

*Chaux hydrauliques;*

*Mortiers de pouzzolane et chaux grasse.*

1° *Ciments.* — Les ciments s'obtiennent en cuisant des mélanges naturels ou artificiels de calcaire et d'argile renfermant au moins 21 p. 100 et au plus 27 p. 100 d'argile. Mis en morceaux dans l'eau, ils ne s'éteignent pas comme la chaux, mais s'ils ont été finement pulvérisés au préalable, ils font prise et durcissent en se combinant à une partie de l'eau qui a servi à les gâcher et acquièrent au bout d'un temps suffisamment long une dureté considérable. Les ciments se divisent en *ciments à prise lente* et *ciments à prise rapide*.

Les premiers sont cuits à une température beaucoup plus élevée que les seconds et suffisante pour les ramollir de telle sorte qu'à leur sortie du four, ils se présentent en morceaux scoriacés, compacts, très difficiles à pulvériser. Leur prix de revient est plus élevé, mais aussi, ce sont de tous les mortiers hydrauliques ceux qui prennent la résistance la plus considérable. La lenteur de

leur prise, qui dure quelques heures, facilite beaucoup leur emploi.

2° *Chaux hydrauliques*. — Les chaux hydrauliques s'obtiennent par la cuisson de mélanges naturels ou artificiels de calcaires et d'argile renfermant moins d'argile que les mélanges à ciments. Elles sont caractérisées par la propriété qu'elles ont de s'éteindre comme la chaux, ce qui dispense de les pulvériser mécaniquement avant leur emploi. Elles font prise beaucoup plus lentement et atteignent une dureté moins grande que les ciments. Elles furent employées de toute antiquité, confondues avec les chaux grasses. C'est seulement en 1818, que Vicat reconnut la nature et les propriétés de ces chaux.

3° *Mortiers de pouzzolane*. — Les pouzzolanes sont des corps qui, mêlés à la chaux grasse éteinte, communiquent à celle-ci la propriété de faire prise sous l'eau; ce sont des composés essentiellement siliceux et dans lesquels la silice est en partie soluble dans la potasse. Les mortiers de pouzzolane ont été inventés par les Romains, qui en ont fait un grand usage et, depuis eux, ils sont restés jusqu'au commencement de ce siècle, jusqu'aux travaux mémorables de Vicat sur les chaux hydrauliques, les seuls mortiers employés d'une façon régulière pour les travaux à l'eau.

*Historique*. — Les recherches théoriques sur la constitution des mortiers hydrauliques ont été nombreuses; je les résumerai rapidement en discutant au fur et à mesure la valeur des opinions que je rapporterai.

Smeaton (\*), ingénieur anglais, signala, en 1756, la présence d'argile dans les calcaires à chaux hydrauliques,

(\*) *Opuscules chimiques*, t. II.

mais cette observation passa inaperçue. Praticien distingué, auteur de travaux importants, il jouissait d'une grande réputation comme ingénieur, mais n'avait aucune autorité comme chimiste.

Quelques années plus tard, le savant suédois Bergmann ayant analysé le calcaire à chaux hydraulique de Lena, y trouva quelques centièmes de manganèse et attribua à la présence de ce corps les qualités hydrauliques de la chaux. Cette opinion, grâce à l'autorité du nom illustre de son auteur, fut acceptée sans discussion.

Guyton de Morveau (\*), cherchant à contrôler les idées de Bergmann, analysa les principales chaux hydrauliques de France; il reconnut que toutes renfermaient de l'argile, mais une seule du manganèse. Il n'en affirma pas moins, sur la foi du chimiste suédois, que le manganèse était la cause de l'hydraulicité des chaux.

Saussure (\*\*), fit le même travail pour les chaux de Suisse et n'en trouva pas qui fussent manganésifères.

Il n'en déclara pas moins, sur la foi de Bergmann et de Guyton de Morveau, que le manganèse était la substance hydraulisante par excellence; mais il ajoute timidement que l'argile peut, dans une certaine limite, remplacer le manganèse tout en lui étant bien inférieure. Il expliqua l'action de l'argile en supposant qu'elle jouait le rôle de pouzzolane, c'est-à-dire qu'après la cuisson du calcaire il reste un mélange de chaux vive et d'argile cuite non combinées; opinion erronée, qui a pourtant été reproduite encore dans ces dernières années et donnée comme nouvelle.

La première observation précise et exacte sur les chaux hydrauliques est due à Collet-Descotils, ingénieur des mines, professeur de chimie à l'École des mines. Il

(\*) Académie de Dijon, 1785.

(\*\*) *Voyage dans les Alpes*, t. III, p. 192.

donna, en 1813, dans une note de quelques lignes insérée aux *Annales des mines* (\*), l'analyse des calcaires et de la chaux de Senonches et fit observer, à cette occasion, que la silice de la chaux était soluble dans les acides, tandis que celle du calcaire ne l'était pas, ce qui montrait que pendant la cuisson il y avait combinaison de la silice et de la chaux. Il attribuait au composé ainsi produit les propriétés hydrauliques de la chaux.

C'est quelques années plus tard, en 1818, que Vicat (\*\*) donna son premier mémoire sur les chaux hydrauliques. On sait que c'est à cet ingénieur qu'appartient de beaucoup la plus grande part dans le développement de nos connaissances théoriques et expérimentales sur les mortiers. Secondé par l'intelligente protection de M. Becquey, directeur général des ponts et chaussées et des mines, il se consacra exclusivement à l'étude de cette importante question et réussit à établir la constitution générale des chaux et des ciments hydrauliques, à définir les conditions les plus favorables à leur fabrication et leur emploi; aussi est-il considéré, à juste titre, comme le créateur de cette industrie qui ne tarda pas à se répandre de la France dans l'Europe entière.

Reprenant l'observation de Smeaton, il montra par de nombreuses analyses que toutes les chaux hydrauliques provenaient de calcaires argileux, et que réciproquement tous les calcaires renfermant une proportion convenable d'argile pouvaient servir à la fabrication de chaux hydrauliques. Enfin, il réussit à obtenir des produits hydrauliques artificiels en cuisant des mélanges de chaux et d'argile préparés à l'avance. Il démontra ainsi d'une façon absolue que les propriétés hydrauliques de chaux étaient dues exclusivement à la présence de l'argile, et réduisit

(\*) *Ann. des mines*, 1813, t. XXXIV, p. 308.

(\*\*) *Recherches expérimentales sur les mortiers en 1818.*

à néant la théorie de Bergmann sur le rôle de l'oxyde de manganèse, théorie qui avait toujours la vogue malgré les nombreux démentis qu'elle avait reçus de l'expérience.

Généralisant l'observation de Collet-Descotils, il montra que les éléments de l'argile formaient avec la chaux des combinaisons qui jouissaient seules de propriétés hydrauliques. Enfin, il reconnut, par de nombreuses expériences analytiques et synthétiques, que des deux éléments de l'argile, la silice jouait le rôle prépondérant, sinon exclusif, dans le durcissement des mortiers.

Toutes ces conclusions ont été pleinement confirmées par les recherches postérieures, et même il n'y a pas été ajouté grand'chose. Ces résultats, tout incomplets qu'ils soient, résument encore à bien peu de chose près tout ce que nous savons sur la constitution des mortiers hydrauliques.

Aussitôt la publication des recherches de Vicat, Berthier (\*) répéta, avec la précision qui lui était habituelle, la plupart des expériences de son devancier et en confirma l'exactitude. Il essaya de plus de déterminer la composition du silicate de chaux qui se formait pendant la cuisson en calcinant au laboratoire des mélanges de  $\text{SiO}^2$  et  $\text{CaO}$  et utilisant la solubilité de la chaux libre pour la séparer de la chaux combinée à la silice. Cette méthode, qui a été employée depuis à plusieurs reprises, ne peut donner aucun résultat exact; elle a conduit à attribuer au silicate de chaux trois formules différentes :

Berthier . . . . .	$\text{SiO}^2, \text{CaO}$
Rivot . . . . .	$\text{SiO}^2, 3 \text{CaO}$
M. Landrin . . . . .	$\text{SiO}^2, 2 \text{CaO}$ (**)

(\*) *Ann. des mines*, 1822, 1<sup>re</sup> série, t. VIII, p. 483.

(\*\*) On reconnaît à première vue dans ces formules l'influence directe de la formule  $\text{SiO}^2$  attribuée autrefois à la silice.

Cette méthode est fautive pour les trois motifs suivants :

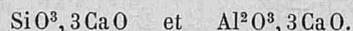
1° Il est impossible, par une cuisson de quelques heures au laboratoire, d'obtenir la combinaison intégrale de la silice et de la chaux, corps infusibles et donnant des composés également infusibles, si la chaux est en proportion un peu forte ;

2° Les silicates basiques de chaux anhydres sont partiellement décomposés par l'eau avec mise en liberté de chaux ; cette méthode permettrait donc au plus de déterminer la formule du silicate hydraté ;

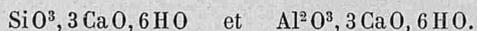
3° Les silicates de chaux hydratés eux-mêmes sont complètement décomposés par un excès d'eau suffisant, de telle sorte qu'ils donnent à l'analyse une composition variable suivant la durée des lavages.

Je démontrerai plus loin chacune de ces affirmations.

Après Berthier, Rivot (\*), qui lui succéda comme professeur de docimasie à l'école des mines, fit sur ce même sujet des recherches étendues, d'où il crut pouvoir conclure qu'il se forme, pendant la cuisson des ciments, les deux composés :



La prise résulterait ensuite, comme pour le plâtre, de la simple hydratation de ces corps pour former les composés.



Cette théorie est celle qui est la plus en faveur aujourd'hui et qui est généralement enseignée ; elle n'est pourtant en réalité qu'une simple hypothèse qui doit son succès au nom de son auteur beaucoup plus qu'aux preuves expérimentales sur lesquelles elle est appuyée.

La méthode suivie par ce savant est celle de Berthier,

(\*) *Ann. des mines*, 5<sup>e</sup> série, t. IX, p. 505.

c'est-à-dire la détermination de la chaux libre par dissolution ; seulement il l'a appliquée à des ciments réels, soit cuits, soit ayant fait prise depuis longtemps et non à des produits de laboratoire. Il évitait ainsi l'inconvénient d'opérer sur des composés incomplètement formés et ne présentant peut-être aucune des propriétés des véritables ciments ; mais il se trouvait, d'autre part, en présence de difficultés bien plus considérables provenant de la présence d'un grand nombre des corps différents qui se trouvent toujours dans les argiles et les calcaires qu'emploie l'industrie.

Ces expériences ne peuvent être concluantes pour les raisons que j'ai déjà données, décomposition partielle et progressive des silicates de chaux par l'eau. Elles sont de plus fautives en ce que Rivot a admis que l'oxyde de fer était simplement un corps inerte, tandis qu'en réalité il joue le rôle d'acide et est combiné à une quantité importante de chaux. Enfin, les résultats des analyses des silicates de chaux ne sont pas très concordants, ce qui ne peut surprendre, étant donné que les expériences ont porté principalement sur des blocs de béton immergés depuis longtemps dans le port de Marseille, et qu'il fallait, pour avoir la composition du silicate, distinguer dans l'analyse brute des mortiers ce qui appartenait au sable plus ou moins calcaire employé comme gangue, ce qui provenait des altérations dues à l'eau de mer, et enfin à la chaux libre.

M. Freymy (\*), prenant pour point de départ les travaux de Rivot, a cherché à vérifier synthétiquement l'exactitude d'une théorie qui reposait exclusivement sur l'emploi de la méthode analytique. Il échoua complètement dans la reproduction du silicate de chaux faisant prise au contact de l'eau, mais réussit au contraire avec l'alu-

(\*) *Comptes rendus*, 1865, t. LX, p. 993.

minate de chaux. Il fut ainsi amené à attribuer une influence prépondérante à l'alumine dans le durcissement des mortiers hydrauliques. Cette théorie fut contestée très vivement; on lui opposa ce fait que les meilleures chaux hydrauliques de France (celle du Teil, de Senonches, de Paviers) ne renferment pour ainsi dire pas d'alumine, à peine 2 p. 100. Dans un second travail sur le même sujet, M. Fremy réussit à obtenir des silicates de chaux faisant prise, non pas au contact de l'eau, mais en présence d'un excès de chaux, c'est-à-dire se comportant comme de véritables pouzzolanes, et il en conclut que la silice dans les ciments devait former de semblables silicates qui, se trouvant en présence d'un excès de chaux libre, réagissent mutuellement par voie humide.

M. Fremy a donc montré que les aluminates de chaux font prise, que certains silicates de chaux jouent le rôle de pouzzolanes; ce sont là des faits très intéressants en eux-mêmes, dont il est impossible de ne pas tenir compte dans une étude sur les produits hydrauliques et sur lesquels j'aurai l'occasion de revenir. Mais il n'a prouvé en aucune façon par ces expériences que de semblables réactions soient les seules qui se produisent dans les ciments, ni même qu'elles s'y produisent aucunement.

Enfin je rappellerai, pour mémoire, les publications récentes de M. Landrin et de M. Merceron, sur le même sujet.

M. Landrin (\*), dans l'espace d'une année, a proposé trois théories différentes du durcissement des mortiers. L'une n'est que la reproduction de celle de Saussure: l'argile se comporterait simplement comme une pouzzolane. Dans la seconde, le durcissement est attribué à l'hydratation d'un prétendu silicate de chaux, le *pouzzo-Portland*,  $3\text{SiO}_2, 4\text{CaO}$ . La troisième théorie, au con-

(\*) *Comptes rendus*, t. XCVI, p. 156 et 1229; t. XCVIII, p. 1053.

traire, invoque l'action de l'acide carbonique sur les silicates mono- et dicalciques.

M. Merceron (\*) a proposé une théorie toute particulière qui attribue le durcissement à la dessiccation de l'argile sous l'influence de la chaleur dégagée par l'hydratation de la chaux.

Il résulte de cet historique sommaire que les seuls faits établis d'une façon certaine sont :

La production, pendant la cuisson des ciments et des chaux hydrauliques, de combinaisons de la chaux avec la silice et probablement l'alumine qui possèdent la propriété de durcir au contact de l'eau sans que l'on sache rien de précis sur la nature de ces combinaisons, ni sur l'action de l'eau.

Si j'insiste sur le peu de résultats obtenus par des savants éminents, c'est pour montrer la difficulté de cette étude et m'excuser de publier un travail qui ne permet pas de formuler sur ce sujet des conclusions aussi complètes que je l'aurais voulu. Je n'ai pas la prétention d'avoir résolu complètement le problème que j'ai abordé; j'espère seulement avoir fait connaître un assez grand nombre de faits nouveaux qui pourront servir de matériaux utiles pour établir un jour la théorie complète des mortiers hydrauliques.

En commençant mes recherches sur les ciments, je me suis laissé guider par l'idée préconçue que tous les phénomènes, dont ces produits sont le siège, sont d'ordre purement chimique, c'est-à-dire résultent des réactions mutuelles de composés définis donnant naissance à d'autres composés définis. Ces composés peuvent se mêler en proportions variables et être difficiles à séparer les uns des autres, mais leur existence n'en

(\*) *Association française*, Grenoble, 1885.

est pas moins certaine, et on doit arriver par leur connaissance exacte à donner la théorie complète du durcissement des mortiers hydrauliques, sans qu'il soit nécessaire de faire intervenir aucune force mystérieuse, telle que l'affinité capillaire ou toute autre.

Dans cet ordre d'idées, la marche à suivre est de commencer par étudier, au point de vue chimique et minéralogique, les diverses combinaisons de la chaux avec la silice, l'alumine, etc., déterminer leurs caractères et ensuite chercher à reconnaître la présence des uns et des autres dans les ciments et les chaux hydrauliques.

#### ÉTUDE SYNTHÉTIQUE DES SELS CALCAIRES.

##### Chaux.

*Ca O.* — La chaux anhydre s'obtient par calcination du carbonate de chaux, entre 800 et 900 degrés ou de l'azotate de chaux au rouge sombre. Sa propriété essentielle est de se combiner directement à l'eau en dégageant une grande quantité de chaleur et en s'éteignant, c'est-à-dire en se gonflant, se fissurant et se réduisant finalement en une poussière impalpable. Cette propriété joue un grand rôle dans les mortiers hydrauliques dont elle produit la pulvérisation sans aucune dépense de force mécanique; elle amène souvent, d'autre part, la destruction des maçonneries dans lesquelles on a employé des produits renfermant de la chaux libre non éteinte. Il est donc très important de rappeler ici les conditions qui rendent cette extinction plus ou moins énergique.

L'eau à l'état de vapeur ou plus exactement l'air humide donne un foisonnement beaucoup plus considérable que l'eau liquide; mais la rapidité de l'extinction est moindre avec l'eau à l'état de vapeur par suite de

la nécessité d'un renouvellement progressif de la vapeur absorbée.

Certains produits qui font prise sans gonfler au contact de l'eau liquide s'éteignent sous l'action de l'air humide; d'autres, au contraire, restent inaltérés dans les mêmes conditions.

L'élévation de la température augmente d'une façon énorme la rapidité de l'extinction et la grandeur du foisonnement. Des produits qui ne renferment que peu de chaux libre et ne donneraient à froid qu'un gonflement insignifiant, se fissurent dans tous les sens quand on les fait prendre dans l'eau chaude.

La compacité de la chaux, qui modifie l'étendue des surfaces de contact avec l'eau, exerce une très grande influence sur la rapidité de l'extinction. La chaux cuite rapidement au-dessous de 1000 degrés s'éteint instantanément quand on vient à la plonger dans l'eau. Chauffée au blanc, elle mettra plusieurs minutes à s'éteindre. Enfin la chaux d'azotate fortement calcinée met des heures et même des jours à s'éteindre.

Le mélange *homogène* (\*) des matières étrangères à la chaux diminue cette propriété d'une façon considérable. On a remarqué depuis longtemps que les calcaires impurs donnent des chaux difficiles à éteindre et que l'on appelle chaux *maigres*. On obtient très facilement des produits semblables au laboratoire en fondant ensemble de la chaux vive avec une petite quantité de chlorure de calcium, d'aluminate de chaux. Pour des mélanges en proportions convenables, les produits font prise avec l'eau froide, s'éteignent à l'eau chaude et à l'air humide. Souvent la prise à l'eau froide est suivie à la longue d'une extinction qui amène la désagrégation de la masse soli-

(\*) J'entends par mélange *homogène* celui qui se produit dans la dissolution, les mélanges isomorphes, les verres.

difiée. Ce sont les chaux limites de Vicat. Les chaux magnésiennes peuvent être prises comme un exemple très instructif de ce genre de phénomène. Les dolomies, carbonate double de chaux et de magnésie, donnent par la cuisson normale des chaux maigres d'une extinction difficile, mais qui ne sont jamais susceptibles de faire prise. En les cuisant à une température supérieure à celle de fusion du fer, comme cela se fait dans la fabrication du revêtement des cornues pour Bessemer basique, on obtient une roche cristalline et compacte formée par la juxtaposition de cristaux d'une combinaison ou d'un mélange isomorphe de chaux et de magnésie. Finement pulvérisé et gâché avec de l'eau froide, ce produit fait prise comme un ciment; mis, au contraire, en présence d'air et de vapeur d'eau à la température de 300 degrés, il s'éteint rapidement. Abandonné à l'air à la température ordinaire, son extinction ne commence à se manifester qu'au bout d'une année et continue ensuite pendant des années sans arriver à un terme. J'ai ainsi dans mon laboratoire depuis six ans un fragment gros comme le poing de cette chaux magnésienne surcuite qui n'est encore effrité que sur 1 centimètre d'épaisseur. La lenteur avec laquelle se produit cette extinction est importante à retenir au point de vue de l'étude de la destruction lente des ciments à l'air.

*CaO, HO.* — L'hydrate de chaux est un des hydrates les plus stables que l'on connaisse; quand on le chauffe rapidement, sa température stationnaire de décomposition se fixe entre 530 et 540 degrés; sa tension de dissociation, d'après les expériences que j'ai faites, n'atteint une atmosphère que vers 450 degrés. A 360 degrés elle n'est encore que de 100 millimètres de mercure. Au-dessous de 100, elle est un infiniment petit qui échappe à tous nos procédés d'observation. Aussi l'hydrate de chaux peut-il se conserver indéfiniment dans l'air sec à la

température ordinaire et même au-dessus de 100 degrés sans s'effleurir. Il n'est que très lentement attaqué à la température ordinaire par l'acide carbonique; sa dissolution, au contraire, absorbe très rapidement ce gaz.

On sait que la solubilité de ce corps dans l'eau est de 1<sup>er</sup>,3 par litre, c'est comme nous le verrons le plus soluble de tous les composés calcaires qui puissent se former dans les ciments.

**Silicates de chaux simples. Silicates anhydres.**  
*SiO<sup>2</sup>, CaO.* — Ce silicate est connu depuis longtemps; il existe dans la nature où il a été appelé wollastonite; il a été reproduit à diverses reprises au laboratoire.

Je l'ai préparé en fondant dans un creuset brasqué un mélange de silice et de chaux en proportions convenables. On obtient une masse très dure, à cassure cristalline, remplie de cavités. Examinée en lame mince au microscope polarisant, on reconnaît que les cristaux se présentent en lamelles minces et larges qui, vues par leur tranche, présentent une double réfraction très énergique, et, au contraire, vues par leur épaisseur, une double réfraction très faible, sinon nulle.

Ce silicate finement pulvérisé et mis en digestion à froid, pendant plusieurs jours, dans de l'eau pure, dans des dissolutions de sels ammoniacaux ou dans de l'eau de chaux, n'éprouve aucune espèce d'altération, ce qui montre qu'il ne peut jouer aucun rôle dans le durcissement normal des ciments. Il est rapidement attaqué par les acides forts avec production de silice en gelée; il est lentement attaqué par les acides faibles, tel que l'acide carbonique. Gâché avec de l'eau chargée d'acide carbonique et abandonné dans une atmosphère d'acide carbonique, il fait complètement prise. Ce fait a également été observé par M. Landrin et a été le point de départ d'une de ses théories sur la prise des ciments.

$SiO^2, 2CaO$ . — Le composé correspondant à cette formule doit appartenir à la famille des péridots; il n'existe pas dans la nature et n'a pas jusqu'ici été obtenu au laboratoire.

Je l'ai produit par fusion directe d'un mélange en proportion convenable de silice et de chaux; la température nécessaire pour obtenir la fusion est voisine de la température de fusion du fer doux. On obtient ainsi un culot qui, retiré tout chaud du creuset, est compact, très dur et ne se laisse que difficilement casser au marteau.

En laissant au contraire refroidir le creuset avant de l'ouvrir, on ne trouve plus qu'une masse blanche, pulvérulente, d'aspect identique à celui du mélange mis en expérience. La combinaison n'en est pas moins complète, car l'action des acides donne immédiatement un dépôt de silice en gelée. C'est qu'il se passe là, pendant le refroidissement, un phénomène très intéressant que l'on peut suivre en abandonnant à l'air le culot retiré tout chaud du creuset. On voit la masse absolument compacte au début se fendiller peu à peu, se gonfler, se désagréger progressivement et se réduire finalement en une poussière blanche analogue comme aspect à la chaux éteinte. Examinée au microscope, cette poussière est formée de fragments prismatiques à double réfraction faible s'éteignant suivant leur plus grande longueur et présentant parfois de fines stries suivant cette direction.

Ce phénomène de pulvérisation spontanée est connu depuis longtemps dans la métallurgie du fer; on l'observe avec tous les laitiers de hauts fourneaux suffisamment calcaires. Jusqu'ici, on avait attribué cette pulvérisation à l'action de l'humidité atmosphérique qui amènerait une extinction des laitiers par hydratation comme elle le fait avec la chaux vive. Le même phénomène s'observe encore dans la fabrication des ciments

Portland; on voit fréquemment des morceaux de ciments cuits retirés encore chauds du four se pulvériser au bout d'un certain temps. Cette transformation serait accompagnée d'un dégagement de chaleur, rendu manifeste la nuit par une nouvelle incandescence des matières déjà refroidies. La valeur de cette poussière comme ciment est assez faible; aussi sa production est une cause de déchet important dans la fabrication. L'étude de cette question présente donc un intérêt direct au point de vue qui m'occupe ici.

J'ai commencé par m'assurer que cette propriété appartient au silicate  $SiO^2, 2CaO$  et à lui seul, que par conséquent la pulvérisation spontanée dans les ciments et les laitiers est un indice certain de la présence de ce composé. En faisant varier dans les mélanges soumis à la fusion les proportions relatives de silice et de chaux, on constate que la pulvérisation est d'autant plus lente et plus incomplète que l'on s'écarte davantage de la composition répondant à la formule ci-dessus. Le mélange  $SiO^2 + 1,5CaO$  donne des fragments non pulvérisés assez volumineux pour qu'on puisse les tailler en lames minces. Des plages très brillantes à double réfraction très énergique indiquent la présence de wollastonite. Cela montre en passant que le pouzzo-portland de M. Landrin n'existe pas comme produit défini et n'est qu'un mélange des deux silicates  $SiO^2, CaO$  et  $SiO^2, 2CaO$ , qui conservent chacun leurs propriétés individuelles. En remplaçant une partie de la chaux par la magnésie dans le composé  $SiO^2, 2CaO$ , on diminue encore sa pulvérisation. Pour équivalents égaux de chaux et de magnésie, on obtient un culot qui reste absolument compact, dur et nettement cristallisé, c'est la monticellite  $SiO^2, CaO, MgO$ . L'addition d'alumine et d'oxyde de fer diminue également la pulvérisation; c'est ainsi que les laitiers de hauts fourneaux mettent souvent plusieurs jours à se désagréger et ne

donnent parfois qu'un sable grossier bien différent de la farine impalpable produite par le péridot calcaire pur.

Quelle est la cause de la pulvérisation spontanée de ces silicates bicalciques, y a-t-il moyen de rattacher ce phénomène à quelque autre fait plus simple et plus général? L'hydratation sous l'influence de la vapeur d'eau atmosphérique doit être éliminée de prime-abord; le silicate de chaux en question est inaltérable par l'eau. L'air est également sans action, car le culot fondu plongé encore chaud sous le mercure se désagrège de la même façon. J'avais supposé un moment qu'il pouvait se former à haute température un composé instable à froid dont la décomposition amènerait la désagrégation. D'après cette hypothèse, de la chaux aurait dû être mise en liberté et on aurait pu reconnaître sa présence en la dissolvant dans l'eau, mais l'expérience n'a pas justifié davantage cette prévision.

Une observation fortuite m'a mis sur la voie de l'explication que j'avais cherchée en vain. Me proposant de préparer par fusion du sulfate de potasse cristallisé, dont M. Mallard étudiait alors le dimorphisme, je me suis aperçu que ce sel, après sa solidification, conservait tant qu'il était chaud une grande dureté comparable à celle des cristaux produits par dissolution; mais une fois complètement refroidi, il devient tellement friable qu'une simple pression des doigts suffit pour le réduire en poussière. Les petits fragments pulvérulents observés au microscope se présentent sous forme de lamelles finement striées qui se sont séparées les unes des autres suivant un plan de clivage perpendiculaire à l'axe. Le phénomène est donc de tout point comparable à celui que présente le silicate de chaux. Dans le cas du sulfate de potasse, il se produit au rouge naissant, d'après les recherches de M. Mallard, une transformation dimorphique réversible extrêmement nette qui est accompagnée de macles nom-

breuses. Ces macles amènent en contact des plans réticulaires différents, dont le voisinage détermine des tensions moléculaires internes qui s'augmentent pendant le refroidissement par suite de l'inégalité des coefficients de dilatation. On conçoit que ces tensions puissent amener la désagrégation de cristaux présentant des clivages suffisamment faciles. Si réellement la transformation dimorphique d'un corps solide peut être une cause de désagrégation, on devra en trouver d'autres exemples parmi les cas si nombreux de dimorphisme aujourd'hui connus. Il suffit de citer la litharge, qui se présente habituellement sous forme d'écaillés obtenues par le refroidissement lent de l'oxyde de plomb fondu. Cet oxyde est dimorphe; à chaud, la variété stable est jaune, c'est le *massicot*; à froid, la variété stable est rouge, c'est la *litharge*. Le passage du corps d'un de ces états à l'autre pendant le refroidissement amène sa désagrégation. Mais c'est avec le sulfate double de cuivre et de potasse anhydre que ce phénomène est le plus marqué. La pulvérisation se produit au-dessous de 100 degrés, ce qui la rend facilement observable.

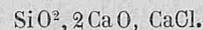
Au point de vue des propriétés chimiques, le silicate  $\text{SiO}_2, 2\text{CaO}$ , se distingue du précédent par la facilité avec laquelle les sels ammoniacaux le décomposent à chaud ou à froid en solution concentrée ou étendue. L'action des acides, comme de juste, est plus rapide encore; la décomposition par l'acide carbonique et la prise qui en résulte sont beaucoup plus promptes qu'avec la wollastonite, mais l'eau reste toujours sans action tant à froid qu'à chaud; elle ne peut ni hydrater directement ni décomposer ce silicate. Dans les expériences prolongées pendant un mois, la quantité de chaux dissoute par l'eau était assez faible pour ne donner qu'un léger louche avec l'oxalate d'ammoniaque. Enfin, j'ai vérifié que ce composé

gâché avec de l'eau ne faisait pas prise. Après six mois, un échantillon de pâte enfermée dans un tube à l'abri de l'acide carbonique s'effritait immédiatement par une simple pression des doigts. Je ne voudrais pas cependant affirmer qu'au bout d'un temps très long, l'eau ne finisse par exercer une certaine action, car on sait que tous les silicates, même les plus acides, se laissent lentement décomposer par l'eau. Ces expériences suffisent néanmoins pour établir que le silicate dicalcique  $\text{SiO}_2, 2\text{CaO}$  ne peut jouer dans le durcissement des ciments qu'un rôle tout à fait secondaire, sinon complètement nul.

$\text{SiO}_2, 3\text{CaO}$ . — On ne connaît pas de silicate de protoxyde tribasique, cependant quelques analyses de grappiers de chaux hydrauliques siliceuses m'avaient conduit à prévoir l'existence d'un silicate répondant à la formule donnée ci-dessus. Mais, pendant longtemps, toutes mes tentatives de reproduction synthétique restèrent infructueuses. La calcination d'un mélange de silice et de chaux ne donne jamais qu'un mélange de silicates de chaux et de chaux libre. Cette dernière se reconnaît au dégagement rapide de chaleur et à l'extinction produite par l'action de l'eau. Mais après extinction, la masse pulvérulente gâchée avec l'eau fait prise plus ou moins lentement se comportant ainsi comme une véritable chaux hydraulique. Cela semble indiquer que, parmi les silicates obtenus, il en est qui diffèrent des silicates précédemment étudiés. Mais cet indice est trop faible pour en tirer aucune conclusion.

J'ai pensé obtenir de meilleurs résultats en me rapprochant des conditions pratiques de la fabrication des ciments, c'est-à-dire en me servant d'un fondant pour faciliter la réaction de la silice et de la chaux. Le chlorure de calcium était tout indiqué par sa grande fusibilité et sa solubilité dans l'eau et l'alcool qui devaient permettre sa séparation facile des cristaux. En opérant en présence

d'un excès de chlorure de calcium, j'ai obtenu de très jolis cristaux inaltérables dans l'alcool, mais très altérables dans l'eau; ce devaient donc être les cristaux des ciments. L'analyse chimique m'a montré qu'il n'en était rien; j'avais affaire à un chlorosilicate de chaux :



*Analyse chimique.*

	Trouvé.	Calculé.
$\text{SiO}_2$ . . . . .	20,5	21,2
$\text{CaO}$ . . . . .	59,6	59,3
$\text{Cl}$ . . . . .	25,4	25,4
	105,5	105,7
A déduire O éq. à Cl. . . . .	5,7	5,7

J'ai déterminé quelques propriétés physiques de ce composé.

Densité. . . . . = 2,77  
 Point de fusion, voisin de . . . . . 800°  
 Chaleur moléculaire de dissolution dans HCl étendu. = 36<sup>cal</sup>

M. Mallard a bien voulu faire les déterminations des cristaux. Ils appartiennent au système orthorhombique et présentent les formes simples :

$$m = 110, \quad g_1 = 100, \quad e_1 = 101.$$

Il existe un clivage très net parallèle à  $h_1$  et un moins net parallèle à  $g_1$ .

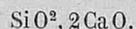
$$a : b : h = 1 : 0,726 : 0,287.$$

Double réfraction énergique. Plan des axes  $g_1$ . Bissectrice négative perpendiculaire à  $h_1$ ; angle des axes dans l'air 25 degrés environ ;

$$\rho > \nu.$$

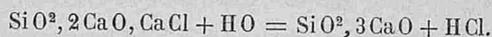
Le fluorure de calcium employé comme fondant à la place du chlorure n'a pas été plus satisfaisant; le culot

refroidi s'est toujours pulvérisé, caractère qui indique la présence de :



Un grand nombre d'essais poursuivis dans la même voie restèrent infructueux. Je me trouvais donc toujours au point où s'était arrêté M. Fremy : impossibilité d'obtenir au laboratoire un silicate de chaux défini faisant prise par l'action directe de l'eau.

J'eus l'idée alors de partir du chlorosilicate de chaux précédemment obtenu et de le décomposer par la vapeur d'eau à une température supérieure à 450 degrés, température normale de dissociation de l'hydrate de chaux. J'obtins en effet la réaction :



La décomposition est très lente et reste superficielle ; il faut pulvériser à plusieurs reprises la masse pour obtenir l'élimination à peu près complète du chlore. Le produit le plus pur ainsi préparé avait pour composition :

	Observé.	Calculé.
SiO <sup>2</sup> (par différence) . . . . .	26,7	26,3
CaO (essai alcalimétrique) . . . . .	72,1	73,7
CaCl (essai à l'argent) . . . . .	1,2	»
	<hr/>	<hr/>
	100,0	100,0

C'est une masse pulvérulente ne présentant évidemment aucune trace de cristallisation ; il n'est donc pas possible d'établir par des caractères fixes si l'on a réellement affaire à un composé défini, et ensuite s'il est identique aux cristaux des ciments. Mais en pulvérisant cette masse finement, la gâchant avec de l'eau et la mettant à durcir dans l'eau bouillante, on obtient, au bout de huit jours, des briquettes comparables par leur dureté à celle des ciments et ne présentant aucune trace de gon-

flement ni de fendillement. Cette absence de gonflement est l'indice certain de l'absence de chaux libre : lorsqu'en effet à un ciment de bonne qualité ne gonflant pas dans l'eau chaude, on ajoute seulement 1 p. 100 de chaux libre fortement calcinée, on observe dans les mêmes conditions un fendillement considérable et un gonflement de volume d'environ 10 p. 100. Ce caractère, joint à la propriété de faire prise que ne possède aucun des silicates inférieurs, montre bien que l'on a affaire à une combinaison et non à un simple mélange dont les propriétés seraient simplement la somme de celles des corps mêlés.

Je laisse de côté ici la question théorique de savoir si c'est là une combinaison à proportion définie, ou une combinaison à proportion variable comme le sont les mélanges isomorphes.

*Verres siliceux.* — La fusion des mélanges de silice et de chaux renfermant moins de 1 équivalent de chaux pour 1 de silice donne des verres, c'est-à-dire des mélanges homogènes ou dissolutions mutuelles de silice et de silicate de chaux. Les cristaux de wollastonite deviennent de plus en plus rares et informes à mesure que la proportion de silice augmente. Ils ont à peu près complètement disparu pour le mélange : SiO<sup>2</sup>, 0,5 CaO. Ces verres sont inattaquables par l'eau et de moins en moins attaquables par les acides à mesure qu'ils deviennent plus siliceux. Les alcalis les attaquent lentement ; ils peuvent jouer avec la chaux le rôle de pouzzolanes, assez médiocres, du reste, se comportant ainsi comme toutes les matières siliceuses renfermant de la silice libre. La présence d'une petite quantité d'alcalis augmente considérablement la grandeur de leur action pouzzolanique. Ce doivent être là les silicates pouzzolaniques obtenus par M. Fremy.

**Silicate de chaux hydraté, SiO<sup>2</sup>, CaO, 2,5HO.** —

Le silicate de chaux hydraté ne peut s'obtenir à l'état de pureté par l'hydratation des silicates anhydres, puisqu'ils sont les uns complètement inaltérables dans l'eau, les autres seulement très lentement altérables. Mais on peut suivre le procédé indiqué par Guyton de Morveau, au commencement de ce siècle : précipiter un silicate alcalin par un sel de chaux, ou faire réagir sur la silice hydratée l'hydrate de chaux. Le précipité ainsi obtenu est amorphe et ne paraît pas présenter de composition définie. Suivant les proportions relatives de chaux et de silice, on peut obtenir depuis  $\text{SiO}_2, 0,1\text{CaO}$  jusqu'à près de  $\text{SiO}_2, 2\text{CaO}$ . En opérant en présence d'un excès de chaux, la composition du précipité, moins variable, l'est encore puisqu'on a pu lui attribuer les formules différentes qui suivent :

$\text{SiO}_3, \text{CaO}$	ou	$3\text{SiO}_2, 2\text{CaO}$	Berthier;
$\text{SiO}_3, 2\text{CaO}$	ou	$3\text{SiO}_2, 4\text{CaO}$	M. Landrin;
$\text{SiO}_3, 3\text{CaO}$	ou	$\text{SiO}_2, 2\text{CaO}$	Rivot.

Pour préparer ce corps à l'état de pureté, j'ai précipité une dissolution colloïdale de silice par un excès d'eau de chaux ; le précipité formé est tellement volumineux qu'après dépôt complet, un gramme de ce corps occupe encore un volume de deux litres. Les lavages sont ainsi rendus très longs, mais je me suis aperçu de plus que les lavages le décomposaient et lui enlevaient de la chaux. On arrive, en employant un volume d'eau suffisant, à obtenir un résidu de silice à peu près pur, mais la totalité de la silice ne reste pas à la fin de l'opération, une partie disparaît dans les lavages, comme cela a lieu pour le silicate de baryte.

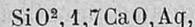
Il était intéressant d'étudier cette décomposition du silicate par l'eau tant au point de vue de la détermination de sa composition qu'au point de vue des conséquences qui pouvaient en résulter pour la destruction des ciments par l'eau. Un certain poids du silicate hydraté fut mis en

suspension dans de l'eau de chaux presque saturée ; après dépôt, la moitié de la liqueur fut enlevée, analysée, remplacée par de l'eau pure, et la même opération fut renouvelée un certain nombre de fois. Le tableau ci-joint donne les résultats de l'expérience :

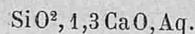
Quantités totales de chaux enlevée.	Quantité de chaux existant en dissolution dans 1 litre de liqueur.
0 <sup>g</sup> ,00	1 <sup>g</sup> ,00
0 ,50	0 ,51
0 ,755	0 ,27
0 ,89	0 ,14
0 ,955	0 ,085
0 ,99	0 ,065
1 ,03	0 ,053
1 ,07	0 ,052

On voit que le titre de la dissolution décroît d'abord proportionnellement au volume d'eau ajouté, ou à très peu près ; cela indique que la quantité de chaux cédée à l'eau de lavage par le précipité est sensiblement nulle. Mais lorsque la teneur en chaux des eaux de lavage est tombée à 0<sup>gr</sup>,052 par litre, le phénomène change d'allures. L'addition des nouvelles quantités d'eau ne change plus la teneur en chaux de la liqueur, qui reste fixée à 0<sup>gr</sup>,052 par litre. Le silicate cède sa chaux à l'eau jusqu'à un titre constant, se conformant ainsi aux lois générales de la décomposition des sels par l'eau.

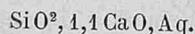
Pour faire l'analyse d'un silicate de chaux défini, il est donc nécessaire de ne pas pousser les lavages au delà de la limite indiquée ci-dessus. Au-dessus de cette limite, il semblerait que l'on doive trouver au précipité une composition constante, mais il n'en est rien. En présence d'eau de chaux saturée et après un contact de six mois, la composition du précipité se rapproche de celle qu'indique la formule :



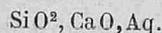
tandis qu'au premier moment de la précipitation en présence d'une liqueur appauvrie en chaux par le fait même de la précipitation, on se rapprocherait de la formule :



Enfin, en lavant le précipité, et s'arrêtant à une teneur en chaux de la liqueur un peu supérieure à celle pour laquelle commence la décomposition normale, on arrive aux produits :



Ces faits me conduisent à admettre que la composition normale du silicate de chaux hydraté est comme pour le silicate de baryte :

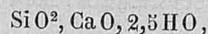


La chaux en excès serait fixée par un phénomène d'entraînement superficiel bien connu pour les précipités chimiques très divisés, semblable à l'entraînement de la chaux par les précipités d'alumine et d'oxyde de fer, du sulfate de potasse par le sulfate de baryte, etc. La quantité de chaux ainsi entraînée croît nécessairement avec la concentration des liqueurs.

L'analyse du précipité lavé m'a donné pour résultats :

Analyse.		Équivalents.
SiO <sup>2</sup> . . . . .	36,4	1,21
CaO . . . . .	35,7	1,28
HO . . . . .	27,0	3,00
	99,1	

ce qui conduit, en déduisant 1/15 d'équivalent de CaO,HO, à la formule :



que je considère comme le seul silicate de chaux hydraté

et défini pouvant se former en présence de l'eau et d'un excès de chaux. La formation de ces sels dégage pour un équivalent de silice :



**Aluminates de chaux.** — Les aluminates définis peu nombreux qui ont été étudiés jusqu'ici montrent bien nettement que l'alumine est un acide polybasique. On connaît plusieurs composés de la forme  $\text{Al}^2\text{O}^3, \text{MO}$ ; la réaction de l'alumine sur le carbonate de soude donne, comme l'a montré M. Mallard, un composé de même formule  $\text{Al}^2\text{O}^3, \text{NaO}$ . En présence de l'eau, l'alumine et la baryte donnent, d'après H. Sainte-Claire Deville, le composé  $2\text{AlO}^3, 3\text{BaO}, \text{Aq.}$  Enfin, M. Fremy a montré que la dissolution d'aluminate de potasse laisse déposer des cristaux ayant pour formule :  $\text{Al}^2\text{O}^3, 3\text{KO}, \text{Aq.}$

Il était donc bien probable a priori qu'il devait exister plusieurs aluminates de chaux. J'en ai reconnu, en effet, au moins trois différents.

$\text{Al}^2\text{O}^3, \text{CaO}$ . — Pour étudier les aluminates anhydres, j'ai fait fondre des mélanges d'alumine et de chaux en proportions variables; les culots obtenus taillés en lames minces ont été examinés au microscope polarisant.

L'aluminate monocalcique correspondant au spinelle est à peine fusible, d'une très grande dureté et cristallise dans le système cubique. Réduit en poudre fine et gâché avec de l'eau, il fait rapidement prise; mis en suspension dans un grand excès d'eau, il laisse dissoudre de l'alumine et de la chaux. Je reviendrai avec plus de détails sur cette action de l'eau à propos de l'aluminate suivant, qui se comporte d'une façon analogue.

$2\text{Al}^2\text{O}^3, 3\text{CaO}$ . — En fondant un mélange contenant, pour un équivalent d'alumine, 1,5 à deux équivalents de chaux, on obtient un culot assez facilement fusible, très

dur, qui, taillé en lames minces, laisse voir des cristaux à double réfraction très énergique, appartenant au système orthorhombique (*fig.* 5, p. 426). On est donc en présence d'un nouvel aluminat défini, différent du précédent. Malheureusement les culots fondus ne sont jamais totalement cristallisés, même après recuit; il reste toujours une partie vitreuse, ce qui laisse subsister une petite incertitude sur la composition exacte de l'aluminat défini cristallisé; la formule  $Al^2O^3, 2CaO$  pourrait aussi bien être adoptée. Je me suis laissé guider pour le choix de la formule par celle de l'aluminat de baryte.

Cet aluminat de chaux, finement pulvérisé, gâché avec de l'eau, fait prise avec une rapidité comparable à celle du plâtre; mais les hydrates ainsi formés sont peu stables, car la masse chauffée à 100 degrés en présence de l'eau se désagrège et finit parfois par se réduire de nouveau en bouillie.

Finement pulvérisé et agité en présence d'un grand excès d'eau, cet aluminat laisse dissoudre de l'alumine et de la chaux en proportion variable. Je citerai comme exemple les analyses suivantes de la dissolution filtrée:

	Matières dissoutes après 10 minutes d'agitation.	
	$Al^2O^3$	CaO
1 <sup>re</sup> de $2Al^2O^3, 3CaO$ dans 1 litre d'H <sub>2</sub> O	0 <sup>s</sup> ,19	0 <sup>s</sup> ,39
10 — — — — —	0,21	0,24

Mais cette dissolution est sursaturée; elle laisse bientôt déposer des cristaux d'aluminat de chaux hydraté et la majeure partie de l'alumine se précipite ainsi. En ajoutant à la liqueur de l'eau de chaux, la cristallisation est immédiate, et il ne reste plus du tout d'alumine en dissolution.

En introduisant dans l'eau l'aluminat de chaux en gros fragments, l'action reste superficielle; il se forme une croûte d'aluminat de chaux hydraté de 1/2 millimètre environ d'épaisseur qui protège absolument le noyau intérieur. Après trois ans de séjour dans l'eau, l'épaisseur de la couche hydratée ne paraît pas avoir dépassé celle qu'elle avait atteinte au bout de deux ou trois mois. Si, au lieu d'immerger les fragments d'aluminates, on les abandonne à l'air humide, on les voit peu à peu se fendre, puis se réduire en poussière. Ils éprouvent alors une véritable extinction, et cette action continue pendant des années sans atteindre sa limite.

$Al^2O^3, 3CaO$ . — En augmentant la proportion de chaux dans le mélange soumis à la fusion, on voit bientôt disparaître les cristaux à double réfraction énergique. Quand on arrive à la composition  $Al^2O^3, 3CaO$ , les plaques minces taillées dans le culot cessent d'agir sur la lumière polarisée. On voit néanmoins des contours très nets, montrant que toute la masse est uniformément cristallisée. Il existe donc un aluminat défini répondant à la formule  $Al^2O^3, 3CaO$ , et cristallisant dans le système cubique. C'est le plus fusible des aluminates. Pulvérisé et gâché avec de l'eau, il fait prise comme les aluminates précédents.

Cet aluminat est également soluble dans l'eau. En filtrant, après dix minutes d'agitation, la liqueur obtenue, en mettant 1 gramme d'aluminat dans 1 litre, j'ai obtenu les résultats suivants:

	$Al^2O^3$ contenu dans 1 litre.	CaO contenu dans 1 litre.
Eau froide à 15°. . . . .	0 <sup>s</sup> ,08	0 <sup>s</sup> ,15
Eau froide avec 3 p. 100 NaCl.	0,12	0,40
Eau bouillante . . . . .	0,03	non dosé

Pour les proportions de chaux supérieures, on obtient encore un culot fondu, inactif sur la lumière polarisée,

s'éteignant rapidement à l'air humide. Pulvérisés et gâchés avec de l'eau, les mélanges inférieurs à  $Al^2O^3, 4CaO$  font encore une bonne prise; les mélanges plus calcaires gonflent de plus en plus et finissent par s'éteindre comme de la chaux sans faire aucune prise. L'ensemble de ces caractères semble indiquer que l'on se trouve en présence d'un mélange de chaux et d'aluminate de chaux participant aux propriétés de ces deux corps.

*Aluminates de chaux hydratés.* — Il existe plusieurs aluminates de chaux hydratés. L'un d'eux, qui peut s'obtenir en évaporant des dissolutions d'alumine et de chaux, très pauvres en chaux, obtenues par l'action de l'eau sur un aluminate anhydre, ne présente aucun intérêt au point de vue de l'étude des ciments, qui renferment toujours après la prise un excès de chaux libre. Je m'occuperai seulement de l'aluminate le plus basique, dont la production à l'état de pureté est aussi la plus facile.

$Al^2O^3, 4CaO, 12HO$ . — Le procédé de préparation qui m'a donné les meilleurs résultats consiste à partir d'une dissolution filtrée d'aluminate anhydre et à y ajouter un volume égal d'eau de chaux. Il se forme immédiatement un précipité blanc cristallin qui se dépose rapidement. Pour obtenir des dissolutions renfermant le plus possible d'alumine, il est bon de partir d'aluminate anhydre, très peu calcaire, et de conduire les opérations de dissolution et de filtration le plus rapidement possible. Il faut opérer sur une dizaine de litres de liqueur pour obtenir 1 gramme de précipité.

Examiné au microscope, le précipité se présente sous forme de longues aiguilles s'éteignant dans le sens de leur longueur, et soudées autour d'un point central de manière à former des groupements sphériques semblables à ceux que l'on observe dans la cristallisation de toutes

les dissolutions sursaturées (*fig. 6*, p. 426). Quand la cristallisation est assez lente, on obtient des sphérolites compacts, donnant la croix noire en lumière parallèle, semblables à ceux qui se produisent dans la précipitation du carbonate de chaux.

Cet aluminate de chaux, lavé à l'eau, se décompose en abandonnant de la chaux et une petite quantité d'alumine; la décomposition s'arrête à la température de 15 degrés pour une teneur en chaux de la dissolution égale à 0<sup>g</sup>,225 par litre. C'est donc un phénomène de tous points semblable à la décomposition par l'eau des silicates de baryte et de chaux.

Les expériences ont été faites comme pour le silicate en enlevant moitié de la dissolution surnageant le précipité et remplaçant par de l'eau pure jusqu'au moment où le titre alcalimétrique de la liqueur devient invariable. Voici les nombres obtenus à la température de 17 degrés :

Poids total de chaux enlevé de la liqueur.	Poids de chaux contenu dans 1 litre.
0 <sup>g</sup> ,00	1 <sup>g</sup> ,00
0 ,50	0 ,50
0 ,75	0 ,26
0 ,88	0 ,230
1 ,01	0 ,220
1 ,42	0 ,225
1 ,23	0 ,225

L'analyse de divers échantillons d'aluminate de chaux égouttés et pressés entre des papiers filtre, m'a donné :

	I	II	III	IV	V
Poids matière employée.	0 <sup>g</sup> ,1	1 <sup>g</sup> ,0	»	0 <sup>g</sup> ,5	0 <sup>g</sup> ,664
Eau. . . . .	47,8 (dif.)	39,2	»	40,8	38,4
Alumine. . . . .	17,2	19,2	16 <sup>g</sup> ,8	17,3	19,6
Chaux. . . . .	35,0	40,5	33 <sup>g</sup> ,2	39,6	40,0
	100 <sup>g</sup> ,0	99 <sup>g</sup> ,2		97 <sup>g</sup> ,7	98 <sup>g</sup> ,0

Ces résultats conduisent aux formules brutes :

I	$\text{Al}^2\text{O}^3$ ,	3,75	$\text{CaO}$ ,	15	$\text{HO}$
II	$\text{Al}^2\text{O}^3$ ,	3,7	$\text{CaO}$ ,	12	$\text{HO}$
III	$\text{Al}^2\text{O}^3$ ,	3,6	$\text{CaO}$ ,	14	$\text{HO}$
IV	$\text{Al}^2\text{O}^3$ ,	4,2	$\text{CaO}$ ,	13,5	$\text{HO}$
V	$\text{Al}^2\text{O}^3$ ,	3,7	$\text{CaO}$ ,	11	$\text{HO}$

J'ai adopté la formule  $\text{Al}^2\text{O}^3, 4\text{CaO}, 12\text{HO}$  comme la plus probable, admettant à priori que les nombres d'équivalents d'alumine et de chaux sont dans un rapport simple.

C'est le seul aluminate hydraté stable en présence d'un excès de chaux; c'est donc le seul que l'on puisse rencontrer dans les ciments après leur prise.

*Aluminates calcaro-magnésiens.* — La substitution d'une certaine quantité de magnésie à la chaux dans les mélanges soumis à la fusion donne des produits cristallins, dont la fusibilité augmente d'abord avec la proportion de magnésie, passe par un maximum et décroît ensuite pour s'annuler complètement pour les aluminates magnésiens purs. L'altérabilité par l'eau des aluminates décroît très rapidement par la substitution de la magnésie à la chaux. Il semble se former des sels doubles dégageant par leur combinaison une quantité notable de chaleur, et devenant par suite bien moins sensibles à l'action des réactifs chimiques. C'est là un fait analogue à celui que l'on observe avec la dolomie qui est peu attaquable aux acides, tandis que les deux carbonates qui la constituent, pris isolément, se laissent très facilement attaquer.

**Ferrites de chaux.** — Le sesquioxyde de fer se combine à la chaux comme l'alumine et doit donner des produits aussi variés; mais je n'ai pas réussi à les obtenir.

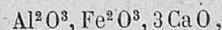
Quand on cherche à fondre un mélange d'oxyde de fer

et de chaux à équivalents égaux, la température très élevée nécessaire pour opérer cette fusion amène la réduction partielle du sesquioxyde de fer à l'état d'oxyde magnétique, même en rendant la flamme aussi oxydante que possible. En ajoutant deux ou trois équivalents de chaux, le mélange fond facilement sans réduction de l'oxyde. Le culot est tellement foncé en couleur que, taillé en lame mince, il ne prend pas assez de transparence pour pouvoir être étudié au microscope.

Tous ces ferrites de chaux traités par l'eau gonflent et s'éteignent plus ou moins rapidement; aucun d'eux ne fait prise.

Il existe un ferrite de chaux hydraté auquel Pelouze a attribué la formule  $\text{Fe}^2\text{O}^3, 4\text{CaO}, \text{Aq}$ . C'est un corps blanc, très rapidement altérable par l'acide carbonique qui le colore en brun en mettant en liberté le sesquioxyde de fer hydraté. Il se décompose par l'eau jusqu'à ce que la teneur en chaux de la liqueur soit d'environ 0<sup>g</sup>,60 par litre. Mais la limite est bien moins nette qu'avec l'aluminate et le silicate de chaux. J'ai pu obtenir ce composé par le contact prolongé (1 mois environ) de l'oxyde de fer hydraté humide  $2\text{Fe}^2\text{O}^3, 3\text{HO}$  et de l'hydrate de chaux; mais je n'ai jamais pu le préparer assez pur pour contrôler sa formule et déterminer son eau d'hydratation.

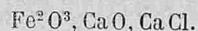
*Alumino-ferrites de chaux.* — Le mélange de l'alumine et du sesquioxyde de fer augmente beaucoup la fusibilité des sels de chaux correspondants. J'ai obtenu ainsi le sel double :



très nettement cristallisé en longues aiguilles d'un beau rouge. C'est bien un sel double et non un mélange isomorphe, car si l'on emploie plus d'un équivalent d'alu-

mine pour un d'oxyde de fer, on voit à côté des cristaux rouges se former des cristaux incolores d'aluminate de chaux.

J'ai essayé, comme pour le silicate de chaux, de faire cristalliser les aluminates et les ferrites dans un bain de chlorure de calcium fondu; ces tentatives sont restées complètement infructueuses. Avec les aluminates, on obtient une matière vitreuse, très fusible, altérable par l'eau qui dissout le chlorure de calcium et laisse un résidu gélatineux insoluble, renfermant l'alumine. Avec les ferrites, on obtient au contraire de très beaux cristaux bruns, inaltérables dans l'eau et l'acide acétique faible, ce qui permet de les séparer facilement du chlorure de calcium et de la chaux en excès. Mais ce composé est un chloroferrite :



*Analyse chimique.*

	Observé.	Calculé.
Fe <sup>2</sup> O <sup>3</sup> . . . . .	51	49,0
CaO . . . . .	18	17,2
CaCl . . . . .	32	33,8
	401	100,0

Ce corps est très bien cristallisé, mais il présente un clivage tellement facile, qu'on ne peut guère recueillir que des lamelles de clivage. J'ai trouvé pour l'angle de ce plan de clivage avec les deux faces adjacentes 129°20' et 109°10'; ce qui donne pour l'angle du prisme 121°30'. Ces lamelles sont terminées par un pointement obtus symétrique dont l'angle plan est de 139 degrés.

*Silicates multiples d'alumine, de fer et de chaux.* — Le nombre des silicates doubles aujourd'hui connus est extrêmement considérable, et il augmentera beaucoup encore. J'ai bientôt renoncé à poursuivre les recher-

ches que j'avais commencées dans cette voie. C'est là le côté le moins complet de mon travail. Mais je montrerai plus loin qu'au point de vue de la théorie des ciments, ces composés ne jouent qu'un rôle secondaire.

Parmi les silicates doubles, les seuls intéressants sont ceux qui renferment le plus de chaux: les silicates acides comme les feldspaths, qui par la fusion donnent des verres, ne peuvent exister dans les ciments. Je me suis assuré que les mélanges de silice, alumine et chaux, renfermant deux fois plus d'oxygène dans la silice et l'alumine que dans la chaux, donnent par fusion des verres qui sont inaltérables à l'eau.

Les mélanges renfermant des équivalents égaux d'oxygène dans la silice et l'alumine d'une part et la chaux de l'autre, donnent des culots cristallisés qui, examinés en plaques minces, paraissent constitués par deux espèces de cristaux différents, dont les proportions relatives varient avec celles d'alumine et de silice. Les uns, cellules à contours arrondis ayant une double réfraction faible, sont essentiellement siliceux, les autres, cristaux allongés s'éteignant dans le sens de leur longueur, sont surtout alumineux. Je n'ai réussi à déterminer la composition ni des uns ni des autres.

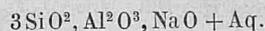
Enfin, je rappellerai que les silicates doubles de chaux les plus basiques que l'on connaisse se forment dans les laitiers de hauts fourneaux.

Ce sont :

la mélilite . . . .	SiO <sup>2</sup> , 1/5Al <sup>2</sup> O <sup>3</sup> , 1,3CaO
l'idocrase . . . .	SiO <sup>2</sup> , 1/4Al <sup>2</sup> O <sup>3</sup> , CaO
la gehlénite . . . .	SiO <sup>2</sup> , 1/2Al <sup>2</sup> O <sup>3</sup> , 1,5CaO

qui renferment tous moins de deux équivalents de chaux pour un de silice.

J'ai tenté d'obtenir des silicates doubles hydratés; on sait que les silicates et aluminates alcalins se combinent pour former un silico-aluminate insoluble avec mise en liberté d'alcali, dont la composition, d'après H. Sainte-Claire Deville, peut être représentée par la formule :



Il était possible que les composés calcaires correspondants se comportent de la même façon. J'ai mêlé des précipités d'aluminate et de silicate de chaux en présence d'eau de chaux étendue de son volume d'eau, c'est-à-dire à une concentration telle que ni l'aluminate, ni le silicate ne puissent se décomposer par l'action seule de l'eau. La réaction mutuelle de ces deux composés devait faire varier le titre de la dissolution de chaux. Je n'ai rien observé de semblable, ce qui montre que, ou bien il n'y a pas réaction ou, s'il y a réaction, la quantité de chaux combinée ne varie pas, contrairement à ce qui arrive pour les silico-aluminates alcalins.

*En résumé, il paraît exister trois silicates de chaux anhydres différents, dont un seul, le silicate tricalcique  $\text{SiO}_2, 3\text{CaO}$  est attaqué par l'eau et susceptible de faire prise; trois aluminates de chaux qui font prise tous très rapidement dans l'eau; des ferrites de chaux qui tous s'éteignent et gonflent comme la chaux vive, enfin des silicates multiples nombreux, dont aucun parmi ceux étudiés jusqu'ici n'est altérable par l'eau.*

*Les seuls sels hydratés correspondants pouvant exister en présence d'un excès de chaux sont :*

le silicate. . . . .	$\text{SiO}_2,$	$\text{CaO},$	$2,5\text{HO}$
l'aluminate. . . . .	$\text{Al}_2\text{O}_3,$	$4\text{CaO},$	$12\text{HO}$
le ferrite. . . . .	$\text{Fe}_2\text{O}_3,$	$4\text{CaO},$	$\text{Aq}$

*Ces sels se décomposent en présence d'un excès d'eau en abandonnant de la chaux.*

## ÉTUDE MICROCHIMIQUE DES CIMENTS.

Les ciments et chaux hydrauliques contiennent des proportions variables de leurs éléments constitutifs : silice, alumine, chaux; ce ne sont donc pas des composés définis, mais seulement des mélanges de composés définis. L'analyse chimique ne peut rien apprendre, sur la nature des composés ainsi mêlés; j'ai songé à employer pour résoudre cette question les procédés microscopiques, qui ont permis de réaliser de si grands progrès dans l'étude des roches de l'écorce terrestre. Mais cette méthode ne peut être utilisée que pour les corps cristallisés; parmi les ciments et chaux, les ciments dits de Portland ou à prise lente remplissent seuls cette condition indispensable; c'est d'eux que je m'occuperai d'abord.

*Ciments anhydres.* — L'examen au microscope d'une lame mince taillée dans une roche de ciment de Portland montre immédiatement deux éléments prédominants qui se retrouvent sans exception dans tous les échantillons (fig. 2, p. 426) :

1° Des *cristaux incolores* à double réfraction faible dont les sections carrées ou hexagonales, à contours très nets, ressemblent beaucoup à celles du cube. C'est de beaucoup l'élément le plus abondant.

2° Dans l'intervalle de ces cristaux, un *remplissage* dont la couleur, toujours foncée, varie du jaune rouge au brun verdâtre, dont la *double réfraction est plus forte que celle de la matière précédente*, mais qui ne possède aucuns contours cristallins propres.

3° Outre ces deux éléments essentiels, on rencontre souvent des éléments accessoires, variant d'un échantillon à l'autre :

a. Des sections cristallines de formes et de dimensions analogues aux premières citées, mais qui s'en distinguent

par une couleur légèrement jaunâtre, une absence complète de transparence, et des stries très fines inclinées l'une sur l'autre d'environ 60 degrés. Cet élément quoique peu abondant se trouve pourtant dans presque tous les échantillons de ciments de bonne qualité.

b. Des cristaux très petits, à double réfraction assez énergique pour donner les couleurs de polarisation. Cet élément toujours peu abondant manque souvent complètement. Il se trouve surtout dans les ciments insuffisamment cuits.

c. Des zones sans actions sur la lumière polarisée, caractère négatif, qui ne donne aucune indication probante.

Cette étude microscopique, insuffisante à elle seule pour faire connaître la nature des composés cristallisés observés, révèle pourtant, quand on la rapproche de l'absence de fusion des ciments pendant leur cuisson, ce fait très important :

*Les cristaux pseudocubiques, éléments de première consolidation, n'ont pas fondu, mais se sont formés par précipitation chimique au milieu de la matière brune fusible, élément de seconde consolidation, qui, après avoir servi de fondant et rendu possible les réactions chimiques, s'est solidifiée par refroidissement, en remplissant tous les intervalles restés vides.*

On peut étudier l'action des réactifs chimiques sur une plaque mince de ciment, placée sous le microscope. — Je passerai successivement en revue l'action des acides, des sels ammoniacaux, etc.

Les acides, même très étendus et faibles, comme l'acide acétique, attaquent très rapidement tous les éléments des ciments, dont on reconnaît la destruction à l'extinction totale de la plaque en lumière polarisée. On peut en conclure que *tous les composés visibles renferment de la*

*chaux*, car la silice, les silicates d'alumine et de fer, dont quelques auteurs admettent la présence à l'état de liberté dans les ciments, sont tout à fait inattaquables par les acides étendus. En laissant sécher la plaque après cette attaque, on voit un squelette blanc de silice, ne présentant aucune solution importante de continuité, *les éléments essentiels des ciments sont donc tous siliceux.*

Les sels ammoniacaux détruisent en un quart d'heure environ les cristaux pseudocubiques qui constituent la majeure partie des ciments, tandis que les autres éléments actifs sur la lumière polarisée ne disparaissent qu'au bout de plusieurs heures. Si l'on tient compte de ce fait que les sels ammoniacaux exercent une action bien plus énergique que l'eau, attaquent, par exemple, le silicate dicalcique  $\text{SiO}_2, 2\text{CaO}$  qui est inaltérable à l'eau, on conclura de cet essai que les cristaux pseudocubiques sont, parmi les corps actifs sur la lumière polarisée, les seuls qui jouent un rôle pendant le durcissement des ciments. Nous verrons plus loin la confirmation de ce fait en étudiant les ciments pris.

L'emploi des ferrocyanures et ferricyanures additionnés d'acide chlorhydrique permet de reconnaître la répartition et le degré d'oxydation du fer. Le sesquioxyde se trouve en abondance dans le fondant coloré qui entoure les cristaux de première consolidation et seulement là. Le protoxyde de fer se trouve dans des grains isolés et très rares, opaques, lentement attaquables, qui sont de l'oxyde magnétique, provenant généralement, sinon exclusivement de l'émeri employé pour user les plaques. Du reste, cette absence de protoxyde de fer est confirmée par l'attaque directe des ciments à l'acide sulfurique et l'addition de permanganate qui, dans la majeure partie des cas, n'est pas décoloré. La présence de protoxyde de fer dans les ciments est seulement accidentelle.

Il n'y a pas de caractères qui permettent de reconnaître

la répartition de l'alumine, mais il n'est pas téméraire d'admettre qu'elle suit le sesquioxyde de fer. Ceci admis on peut conclure de cette étude chimique :

*Les cristaux pseudocubiques, élément essentiel des ciments, sont formés de silice et de chaux ainsi que les cellules opaques striées et peut-être aussi les cristaux à double réfraction énergétique;*

*Le fondant coloré qui remplit les vides laissés par tous ces cristaux est un silicate double d'alumine de fer et de chaux.*

*De ces composés le premier seul paraît assez altérable pour pouvoir jouer un rôle important pendant le durcissement.*

Cette étude n'apprend rien sur la nature, ni même sur l'existence des composés peu abondants qui seraient sans action sur la lumière polarisée.

Il restait à déterminer la formule chimique des corps cristallisés mis en évidence par l'étude microscopique.

De nombreuses tentatives pour faire l'analyse immédiate des roches de ciment, soit en réduisant par l'hydrogène les parties ferrugineuses et les séparant avec l'aimant, soit en se servant de la liqueur iodomercurique sont restées sans succès. J'ai pensé qu'en cherchant parmi les ciments ceux qui renferment le moins d'alumine et de fer, on pourrait se faire une idée approchée de la composition du silicate de chaux, élément essentiel des ciments; j'ai réussi dans cette voie au delà de mes espérances. On fabrique un ciment semblable au Portland en broyant les *grappiers*, ou résidus d'extinction des chaux hydrauliques de première marque, chaux généralement très siliceuses et renfermant à peine d'alumine.

Ces grappiers, examinés avant leur broyage, sont un mélange de produits très variés, dont la moitié au plus est réellement du ciment. Par un examen microscopique et chimique, j'ai reconnu les matières suivantes :

1° *Fragments de calcaires ou incuits.* — Grains blancs, durs, faisant effervescence aux acides, présentant en lame mince la double réfraction énergétique caractéristique du carbonate de chaux.

2° *Chaux non éteinte.* — Grains blancs, poreux, friables, s'éteignant par un séjour prolongé à l'air. C'est de la chaux non éteinte.

3° *Chaux hydratée et durcie.* — Grains blancs, poreux, friables, perdant beaucoup d'eau à la calcination; ce sont des fragments de chaux, qui, au lieu de s'éteindre, ont fait prise pour avoir été trop mouillés.

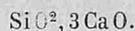
4° *Wollastonite.* — Grains très durs, translucides, presque transparents; coloration vive en lumière polarisée; leur analyse conduit assez exactement à la formule  $\text{SiO}_2$ , CaO après défalcation de 3 à 4 p. 100 d'alumine et de fer, et d'une quantité correspondante de chaux.

Les analyses de divers échantillons semblables, de provenance différente, m'ont en effet donné les résultats suivants :

	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O et CO <sub>2</sub>	MgO, etc.	Éq. CaO pour 1 éq. SiO <sub>2</sub>
Teil . . . . .	43,0	46	3,5	1,0	0,0	1,0	1,15
Senonches . . .	43,0	45	3,3	1,2	0,7	1,2	1,14
Paviers . . . .	45,5	48	4,4	1,4	0,3	0,7	1,14
— . . . . .	47,0	49	2,0	1,5	0,3	1,0	1,13

L'excès de chaux 0<sup>eq</sup>,15 pour un équivalent de silice correspond à la proportion de l'alumine et du fer qui est en moyenne de 0<sup>eq</sup>,1. Il semble singulier à première vue que ces déchets provenant de l'action irrégulière des parois siliceuses du four et des cendres de combustible présentent une composition aussi régulière. On devrait trouver des échantillons renfermant des proportions plus fortes de chaux; s'il n'en est rien, c'est que le silicate suivant le silicate bicalcique se pulvérise spontanément et passe par suite en totalité dans la chaux blutée.

5° *Grappiers de ciments*. — Grains durs, à cassure saccharoïde, verts ou gris, laissant voir, en lame mince, des cristaux identiques à ceux des ciments. Ils sont presque exactement accolés l'un à l'autre, le fondant coloré faisant à peu près défaut (*fig. 1*, p. 426). Leur analyse doit donc donner très exactement celle des cristaux en question, et par suite être identique, quelle que soit la provenance des grappiers. Le tableau d'analyse suivant montre que cette composition s'écarte peu de la formule :

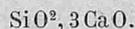


Les grappiers analysés proviennent de la chaux du Teil (Ardèche), de Senonches (Eure) et de Paviers (Indre-et-Loire).

*Analyse.*

	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O et CO <sub>2</sub>	MgO, SO <sub>3</sub> , etc.	Éq. de CaO pour 1 éq. SiO <sub>2</sub>
Grappiers gris, Paviers . .	26,0	66	3,0	1,2	1,1	1,0	2,75
— Teil . . . . .	26,0	66	3,5	0,8	1,0	1,0	2,75
Grappiers verts, — . . . .	24,0	69	2,7	0,3	1,0	1,0	3,08
— Senonches. 25,5	68	3,6	0,7	0,7	1,3	2,85	

Les cristaux pseudocubiques qui forment l'élément le plus abondant, et en même temps un des plus altérables des ciments, sont donc formés par un silicate de chaux, différant peu de la formule



Je n'ai pu établir, même d'une façon approximative, la composition du silicate multiple qui sert de fondant; mais je dois ajouter que la solution de cette question ne présente qu'un intérêt secondaire au point de vue de la théorie des ciments, puisque ce composé, peu altérable, ne paraît jouer aucun rôle dans leur durcissement.

Parmi les éléments non essentiels des ciments, j'ai cité en première ligne des cristaux opaques légèrement

jaunâtres, finement striés. Ils ne se présentent jamais dans les ciments très calcaires; leur abondance croît avec la proportion de silice; on les observe surtout vers la surface des roches de ciment, aux points souillés par les cendres du combustible. Leur présence offre une relation intime avec la pulvérisation spontanée du ciment; ces cristaux opaques ne sont que des cristaux fendillés, désorganisés, se réduisant en poussière, propriété appartenant au silicate :  $\text{SiO}_2, 2\text{CaO}$ . Tous ces caractères sont tellement concordants que l'on serait tenté d'admettre la formation de ce composé à l'état de pureté, mais d'autre part à l'examen microscopique l'aspect général de ces cristaux est tellement semblable à celui des cristaux auxquels j'ai attribué la formule  $\text{SiO}_2, 3\text{CaO}$  qu'il est bien difficile de ne pas admettre le passage continu de l'un à l'autre.

On peut supposer que les deux silicates  $\text{SiO}_2, 2\text{CaO}$  et  $\text{SiO}_2, 3\text{CaO}$  forment des mélanges isomorphes dont la pulvérisation est d'autant plus complète et plus facile que la proportion du premier de ces silicates est plus considérable.

Les cristaux à double réfraction assez énergique pour donner en lumière polarisée des couleurs, font penser à la wollastonite  $\text{SiO}_2, \text{CaO}$ . Ils sont trop peu abondants du reste et trop résistants aux réactifs pour jouer un rôle quelconque dans le durcissement des ciments.

Les cristaux qui n'agissent pas sur la lumière polarisée sont ceux dont l'étude présente le plus de difficultés, puisque rien n'avertit de leur présence et qu'aucun caractère ne permet de reconnaître leur destruction sous l'action des réactifs. Il était naturel de rechercher parmi ces corps la présence de la chaux qui cristallise dans le système cubique. Depuis Rivot, on admet dans les ci-

ments la présence de la chaux libre, et il arrive souvent que l'on cherche à la calculer dans les analyses. En fait, Rivot n'a reconnu la présence de la chaux que dans les ciments hydratés, et il a admis comme évident que si les hydrates renfermaient de la chaux, il devait en être de même pour les ciments cuits, hypothèse complètement inexacte. On peut reconnaître très aisément la chaux vive libre, grâce à sa propriété d'extinction dont on exagère encore l'influence en employant de l'eau chauffée à 100°. La présence de traces de chaux dans un ciment suffit pour amener un gonflement et un fendillement très marqué.

L'addition de 1 p. 100 de chaux de l'azotate fortement calciné, après pulvérisation, à des ciments Portland de première qualité a produit les résultats suivants :

Le ciment fut gâché pur, puis mêlé avec de la chaux en employant la quantité d'eau strictement nécessaire; on façonna des briquettes en forme de cylindre de 2 centimètres de hauteur et 2 centimètres de diamètre qui furent, après 24 heures de prise, chauffées pendant 48 heures au bain-marie à 100° :

	Résistance.	Foisonnement.
Ciment pur. . . . .	320 <sup>kg</sup>	nul.
— + 1 p. 100 CaO.	112	10 p. 100

Ces chiffres permettent de considérer les ciments de bonne qualité comme rigoureusement exempts de chaux libre.

Parmi les composés cubiques, et, par suite, sans action sur la lumière polarisée, il faut ranger certains aluminates; j'ai cherché à les reconnaître en utilisant leur solubilité dans l'eau. Des ciments Portland finement broyés et agités avec un grand excès d'eau laissent toujours dissoudre de petites quantités d'alumine. Ce fait, rapproché de l'inaltérabilité des silicates doubles d'alumine et de

chaux, semble donc établir l'existence dans les ciments cuits de petites quantités d'aluminate de chaux.

Cette dissolution d'aluminate est beaucoup plus importante dans les ciments à prise rapide. Les chiffres suivants donnent la quantité d'alumine dissoute par 10 minutes d'agitation de 10 grammes de ciment de Vassy dans 1 litre d'eau. Les trois échantillons proviennent de trois usines distinctes :

	Al <sup>2</sup> O <sup>3</sup> dans 1 litre.
Ciment A. . . . .	0 <sup>s</sup> ,04
— B. . . . .	0 ,045
— C. . . . .	0 ,035

*En somme, l'absence de chaux libre dans les ciments Portland cuits de bonne qualité est bien certaine; l'existence d'aluminate est seulement probable.*

*Cette étude chimique sur les ciments Portland cuits montre donc qu'ils sont essentiellement formés d'un silicate de chaux différant peu de la formule SiO<sup>2</sup>, 3CaO qui est l'élément actif du durcissement et que le composé s'est produit par précipitation chimique au sein d'un silicate multiple fondu qui a servi de véhicule à la silice et à la chaux pour permettre leur combinaison, mais qui reste sensiblement neutre pendant leur durcissement.*

*Ciments hydratés.* — Une briquette de ciment Portland ayant durci pendant plusieurs mois sous l'eau présente une structure nettement cristalline; on reconnaît à la loupe dans toutes les cavités de petits cristaux en forme de lamelles hexagonales, la surface elle-même est hérissée de ces cristaux lorsque le durcissement s'est opéré à l'abri de l'acide carbonique de l'air. Taillés en lames minces, et examinés en lumière polarisée, ces ciments laissent voir des plages vivement éclairées, présentant des couleurs brillantes qui constituent bien nettement le prolongement des cristaux hexagonaux qui couvrent les briquettes.

En dehors de ces plages isolées on ne voit qu'une masse blanchâtre, à peine translucide, sans action sur la lumière polarisée, qui ne présente aucun indice apparent de cristallisation. Ce caractère négatif n'a aucune valeur; nous avons vu, en effet, que le plâtre hydraté constitué par l'enchevêtrement de longues aiguilles de gypse cristallisées présente la même apparence. C'est que ces cristaux sont très déliés et que dans l'épaisseur d'une plaque mince, il s'en superpose un grand nombre orientés dans toutes les directions. Nous verrons tout à l'heure qu'il en est de même pour le ciment. Enfin, au milieu de cette masse, on aperçoit de place en place les squelettes des plus gros grains de ciment, reconnaissables au fondant ferrugineux qui s'est conservé presque inaltéré et qui donne encore le contour des cristaux de silicate de chaux totalement transformés.

Les lamelles hexagonales dont sont hérissées les briquettes de ciments atteignent parfois plusieurs millimètres; il est donc facile de les détacher pour les étudier. Les angles de ces lamelles, mesurés sur la platine tournante du microscope, sont très exactement de  $60^\circ$ . Deux angles consécutifs d'une semblable lamelle ainsi mesurés ont été trouvés égaux à  $59^\circ 52'$  et  $59^\circ 36'$ , nombres différant de  $60^\circ$  de moins de  $1^\circ$ , erreur possible avec le procédé de mesure employé. La double réfraction suivant l'axe est très faible, irrégulière, il n'existe pas de direction d'extinction. En lumière convergente, on observe très nettement la croix noire. Ce sont des cristaux uniaxes et négatifs. Leur analyse chimique a donné les nombres suivants :

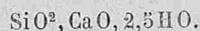
Poids de matière. . .	0 <sup>s</sup> ,062	0 <sup>s</sup> ,088	0 <sup>s</sup> ,243	0 <sup>s</sup> ,183
Ca O. . . . .	71,0	70,3	64,5	73,6
H O . . . . .	27,4	23,0	18,5	22,6
Si O <sup>2</sup> (par différence).	1,6	6,7	17,0	3,8
	<hr/>	<hr/>	<hr/>	<hr/>
	100,0	100,0	100,0	100,0

On voit donc que c'est de l'hydrate de chaux souillé par un peu de silicate dont la présence peut contribuer à donner, suivant l'axe, une double réfraction faible qui est tout à fait nulle dans l'hydrate de chaux pur. La façon même dont les plages cristallines sont répandues dans la masse du ciment, leur absence de contours cristallins, montrent bien que l'hydrate de chaux cristallise en englobant et soudant tous les éléments étrangers qu'il renferme, de même que le carbonate de chaux dans la calcite de Fontainebleau englobe le sable au milieu duquel il a cristallisé.

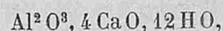
Les dimensions relativement considérables de ces cristaux, rapprochées de la faible solubilité de l'hydrate de chaux, font voir que la production de ce corps est le résultat d'une réaction très lente qui ne peut être la simple hydratation de la chaux vive. En suivant l'accroissement de ces cristaux, on constate facilement qu'il se prolonge pendant plusieurs mois.

La masse amorphe, qui constitue la partie la plus importante des ciments pris, peut être étudiée comme pour le plâtre, en suivant au microscope la marche progressive du durcissement. Quelques précautions spéciales sont nécessaires pour éviter la décomposition des sels calcaires hydratés, tant par l'eau en excès que par l'acide carbonique de l'air. Je prends une plaque mince de ciment collée sur un verre porte-objet et j'attache dessus sans le coller un verre mince, puis j'immerge le tout dans de l'eau de chaux étendue de son volume d'eau, en ayant soin de mettre dessous la plaque de ciment. En retirant de temps en temps cette plaque et l'examinant au microscope, on suit facilement la marche de l'hydratation. Au bout de deux ou trois jours, on aperçoit tout d'abord de larges cristaux à double réfraction énergique; c'est l'*hydrate de chaux*. En outre, le ciment est parfois tout hérissé d'aiguilles extrêmement fines n'ayant guère

plus de 1/100 de millimètre de longueur dont l'enchevêtrement ultérieur arrivera à former le corps du ciment (*fig. 4*, planche de la page 426). Le plus souvent on ne voit se former que des masses fibreuses résultant de l'accolement de tous ces petits cristaux. Les sels ammoniacaux détruisent instantanément ces cristaux en laissant des flocons gélatineux de silice; ils sont constitués par un *silicate de chaux* auquel j'attribuerai la formule du seul silicate de chaux hydraté que j'aie pu reproduire synthétiquement :



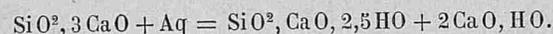
Enfin, il se forme autour de la plaque, à des distances variables, de petits sphérolites donnant la croix noire en lumière parallèle. La distance à laquelle ils vont se former est l'indice d'une certaine solubilité qui fait penser à un *aluminat*, mais ce n'est là qu'une simple hypothèse. La formule serait :



le seul aluminat qui puisse exister en présence d'un excès de chaux. La formation d'aluminates hydratés pendant le durcissement des ciments est confirmée, au moins dans le cas des ciments à prise rapide, par l'étude de leur décomposition progressive en présence de l'eau. En agitant en présence de l'eau du ciment de Vassy jusqu'à hydratation complète et renouvelant tous les jours l'eau par moitié, on reconnaît que le titre de la liqueur en chaux se maintient d'abord constant et voisin de 1<sup>g</sup>,2, ce qui confirme l'existence de chaux libre dans le ciment hydraté. Puis, le titre décroît à peu près proportionnellement à la quantité d'eau ajoutée pour s'arrêter à un nouveau titre stationnaire = 0<sup>g</sup>,22 qui correspond précisément à la décomposition de l'aluminat. Dans une expérience, j'ai observé les résultats suivants :

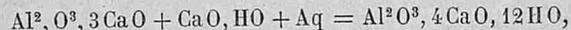
	Chaux par litre.
3 <sup>e</sup> jour. . . . .	0 <sup>g</sup> ,28
4 <sup>e</sup> — . . . . .	0 ,22
5 <sup>e</sup> — . . . . .	0 ,22
6 <sup>e</sup> — . . . . .	0 ,18

Si maintenant nous rapprochons les résultats auxquels nous a conduits l'étude des ciments cuits et des ciments hydratés, nous serons amenés à conclure que *la réaction fondamentale qui amène le durcissement est le dédoublement d'un silicate basique de chaux en silicate de chaux monocalcique et hydrate de chaux :*



Réaction analogue à celle qui accompagne la prise du silicate dibarytique.

Il se formerait accessoirement un aluminat de chaux basique dont la rapidité d'hydratation interviendrait dans la prise plus ou moins rapide des divers ciments :



cette seconde conclusion n'étant énoncée qu'avec réserves.

*Enfin, le fer ne jouerait certainement aucun rôle dans la prise des ciments Portland; il ne se forme pas de ferri-ferite de chaux. On le reconnaîtrait immédiatement à la coloration brune qu'il prendrait sous l'influence de l'acide carbonique par suite de la mise en liberté d'oxyde de fer hydraté. Il intervient, au contraire, d'une façon très nette dans les ciments à prise rapide.*

J'ai parlé plus haut, à diverses reprises, des silicates et aluminates cristallisés qui se forment soit pendant la cuisson, soit pendant la prise des ciments. Les figures ci-contre montrent les structures observées sur des plaques minces, savoir :

- La *fig. 1.* Une plaque mince d'un grappier gris du Teil présentant des cristaux à double réfraction très faible de  $\text{SiO}_2, 3\text{CaO}$ , séparés par une petite quantité d'un remplissage ferrugineux.
- La *fig. 2.* Une plaque mince de ciment Portland de Boulogne présentant les mêmes cristaux que le grappier gris du Teil, et un remplissage ferrugineux beaucoup plus abondant.
- La *fig. 3.* Un ciment semblable au précédent, dans lequel quelques cristaux ont pris un développement exceptionnel.
- La *fig. 4.* Le commencement de l'hydratation d'un ciment Portland laissant voir les cristaux allongés du silicate hydraté  $\text{SiO}_2, \text{CaO}, 2,5\text{HO}$ . Les dimensions de ces derniers ont été considérablement exagérées, environ décuplées, pour donner plus de netteté au dessin.
- La *fig. 5.* Des cristaux reproduits synthétiquement de l'aluminat  $2\text{Al}_2\text{O}_3, 3\text{CaO}$ .
- La *fig. 6.* Un précipité cristallisé d'aluminat hydraté  $\text{Al}_2\text{O}_3, 4\text{CaO}, 12\text{HO}$ .

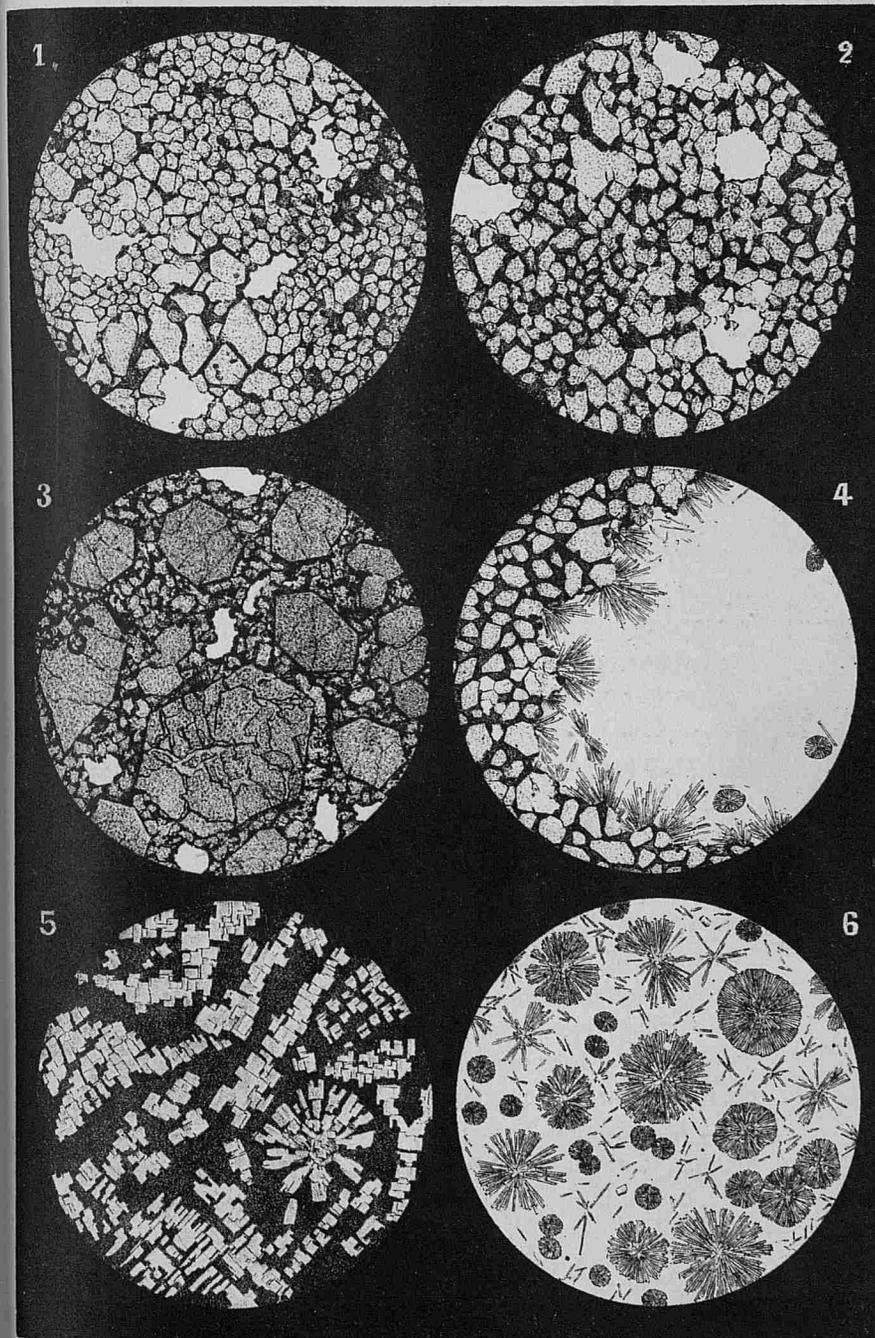
#### FABRICATION ET EMPLOI INDUSTRIELS.

Des recherches précédentes on peut déduire certaines conséquences relatives à la fabrication et à l'emploi industriel des ciments. Je passerai successivement en revue les diverses variétés de produits hydrauliques :

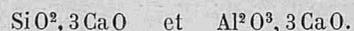
*Ciments Portland, ciments à prise rapide, chaux hydrauliques et pouzzolanes.* J'étudierai leur *composition* et leur *cuisson*, leur *durcissement*, les *causes de leur destruction* et les *procédés d'essais*.

#### Composition et cuisson.

*Ciments Portland.* — Il est possible de préciser avec une grande rigueur les limites extrêmes de composition que peuvent présenter les ciments complètement cuits, comme le sont généralement les ciments Portland. Il suffit pour cela de se rappeler qu'ils ne doivent pas, d'une part, renfermer du tout de chaux libre, ce qui fixe un maximum à la proportion de chaux, et que, d'autre part, la présence d'une proportion trop forte de silicate dicalcique amène la pulvérisation spontanée au sortir du four, ce qui limite l'abaissement de la teneur en chaux.



1° Limite supérieure de la teneur en chaux. — En présence des quantités croissantes de chaux, les composés qui tendent à se former sont :



Les silicoaluminates tendent à disparaître complètement. On devra donc avoir comme limite supérieure de chaux

$$(1) \quad \frac{\text{CaO, MgO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3} \leq 3,$$

les quantités de chaque corps étant exprimées dans cette formule non pas en poids, mais en équivalents. Je n'ai pas fait entrer en ligne de compte le sexquioxyle de fer, attendu que les ferrites de chaux gonflent en s'éteignant. Il ne faut donc pas saturer l'oxyde de fer de chaux.

2° Limite inférieure de la teneur en chaux. — En diminuant la chaux, la proportion de silicoaluminate augmente, puis lorsqu'il est complètement formé, il commence à se produire du silicate dicalcique  $\text{SiO}_2, 2\text{CaO}$ . La formule du silicoaluminate n'est pas connue. On sait seulement qu'il est au moins aussi calcaire que le plus calcaire de ceux qui sont connus jusqu'ici : la gehlénite  $2\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, 3\text{CaO}$ . Je lui attribuerai cette formule pour faire le calcul. On trouve alors comme limite inférieure du rapport des équivalents :

$$(2) \quad \frac{\text{CaO, MgO}}{\text{SiO}_2 - (\text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3)} \geq 3.$$

Ici il ne faut pas séparer le fer et l'alumine qui se comportent de la même façon au point de vue de la production des silicates multiples.

Il est facile de s'assurer que les deux conditions énoncées ci-dessus sont satisfaites pour tous les ciments de bonne qualité fabriqués en France, ainsi que le montre

le tableau suivant :

Provenance des ciments.	Formules	
	(1)	(2)
Boulogne . . . . .	2,22	3,6
Desvres . . . . .	2,28	3,8
Frangey . . . . .	2,55	4,05
Grenoble . . . . .	2,4	3,9

Au contraire, pour des mélanges donnant du ciment pulvérulent, j'ai trouvé :

Boulogne . . . . .	»	2,7
Desvres . . . . .	»	2,6

Et enfin sur un ciment à excès de chaux fabriqué à Boulogne à titre d'expérience et qui gonflait énormément :

Boulogne . . . . .	3,2	»
--------------------	-----	---

On voit par ces chiffres que les prévisions théoriques sont pleinement confirmées. Mais on peut se demander pourquoi la composition du ciment n'arrive jamais à être représentée exactement par la formule (1) correspondant à la production exclusive de silicate et d'aluminate de chaux. Il manque toujours de la chaux; le rapport des bases aux acides qui devrait être égal à 3 ne dépasse que très rarement 2,5. La raison en est que dans la cuisson industrielle des ciments, les réactions n'arrivent jamais à être complètes, par suite du défaut de finesse et d'homogénéité des pâtes, de l'insuffisance de la cuisson comme durée et comme élévation de température. Pour obtenir la réaction intégrale, on serait entraîné à une augmentation de frais de fabrication hors de proportion avec l'amélioration de la qualité des produits. On préfère, pour éviter la présence de chaux libre, forcer un peu la proportion des acides, silice et alumine. L'inconvénient de cet excès d'acide est seulement d'amener la formation d'un peu de silicoaluminate inerte.

Dans chaque usine, les conditions d'homogénéité de la pâte et celle de cuisson restent sensiblement identiques à elles-mêmes. Il en résulte que le mélange donnant le meilleur produit, devra avoir une composition chimique parfaitement déterminée dans une même usine, mais variera d'une usine à l'autre avec les conditions de la fabrication. C'est là la raison d'être de ce fait d'expérience, qui semble paradoxal au premier abord, que dans une usine les variations de la teneur en argile des pâtes ne doivent pas atteindre 1 p. 100, bien que d'une usine à l'autre les écarts puissent être plus considérables.

Ces limites restreintes ne permettent pas d'employer les mélanges naturels de calcaire et d'argile désignés sous le nom de marnes et de calcaires marneux. Il faut pour obtenir une composition de pâte et une homogénéité convenables, faire des mélanges artificiels dont la préparation entre pour une part importante dans les frais de fabrication. On peut d'ailleurs faire des mélanges de calcaires et d'argiles purs entre eux ou de calcaires marneux; on peut effectuer ces mélanges, par voie sèche ou humide, etc. Le résultat cherché est également obtenu par des procédés très variés dont le choix dépend des conditions dans lesquelles se trouve placée chaque usine, des matériaux qu'elle a à sa disposition.

Les mélanges, quoique très intimes, ne sont pas et ne peuvent pas être absolument homogènes; les grains de chaque matière, quoique très petits, ont des dimensions finies. Ceux de carbonate de chaux peuvent atteindre 1 millimètre. Les particules de silice et d'argile, beaucoup plus fines, n'ont que quelques millièmes de millimètre; mais généralement elles sont groupées en paquets plus volumineux.

Il est difficile, malgré toutes les précautions, d'éviter la présence de grains de calcaire un peu trop volumineux, qui donnent à la cuisson de la chaux libre. On est

obligé d'éteindre cette chaux, dans la mesure du possible, avant l'emploi du ciment; on laisse pour cela pendant un certain temps le ciment moulu à l'air, ou parfois on ajoute sous les meules, pendant le broyage, des matières susceptibles de dégager de la vapeur d'eau quand elles sont échauffées; du gypse, par exemple, ou des ciments déjà hydratés.

Pendant la cuisson le premier effet de la chaleur est de décomposer les argiles en les déshydratant à une température voisine de 600 degrés. Cette décomposition parallèle à la déshydratation est mise en évidence par l'action de la lessive de potasse et de l'acide sulfurique qui dissolvent l'une la silice, l'autre l'alumine beaucoup plus facilement qu'avant la calcination. Entre 800 et 900 degrés le calcaire se décompose en abandonnant son acide carbonique et se transforme en chaux vive. A partir de ce moment, les éléments de l'argile commencent à réagir sur la chaux, et cette réaction devient d'autant plus complète que la température est plus élevée et que son action est plus longtemps prolongée. Il se forme au contact des grains de chaux et des particules d'argile, des produits fusibles qui se diffusent des deux côtés, en devenant plus basiques d'une part et plus acides d'autre part. Si nous partons d'un paquet d'argile, nous aurons au centre les éléments de l'argile: silice et alumine infusibles, puis des verres fondus peu calcaires, ensuite un mélange fondu de silicates doubles, analogues aux laitiers, avec des silicates mono- et dicalciques, tous fusibles à la température de cuisson des ciments; enfin les sels les plus basiques, seuls éléments actifs des ciments, silicates de chaux tricalciques infusibles et aluminates de chaux fusibles, et en dernier lieu de la chaux vive. La proportion de ces divers éléments varie d'une façon continue avec le degré d'avancement de la cuisson, pour tendre vers une

limite ne dépendant que des proportions relatives des éléments en présence.

Avec un grand excès de chaux, on aura comme produit final de la chaux vive, du silicate tricalcique et de l'aluminate tricalcique. En diminuant la quantité de chaux, on aura les deux mêmes sels et pas de chaux libre.

Ensuite, l'aluminate de chaux disparaîtra et sera remplacé par un silicate multiple de composition analogue à celle des laitiers basiques de hauts fourneaux.

Ce sera ensuite le tour de disparition du silicate tricalcique qui sera remplacé par du silicate dicalcique à pulvérisation spontanée, puis par du silicate monocalcique.

On arrivera finalement à des verres analogues aux laitiers acides de hauts fourneaux.

Il faudra, pour obtenir la cuisson, une température d'autant plus élevée que le silicate multiple qui sert de fondant et permet la diffusion en sens inverse de la silice et de la chaux sera lui-même moins fusible. Un silicate renfermant seulement soit de l'alumine, soit du sesquioxyde de fer, sera moins fusible que si ces deux bases s'y trouvent à la fois; et l'on peut penser, d'après les analogies, que le maximum de fusibilité sera obtenu avec équivalents égaux de ces deux corps, soit, en nombres ronds, une fois et demie autant de sesquioxyde de fer que d'alumine.

On voit d'après cela comment des pâtes de composition variable pourront donner par des cuissons différentes des produits similaires; une cuisson modérée appliquée à un mélange peu calcaire pourra donner, par suite d'une réaction incomplète, de la chaux libre et de l'aluminate de chaux, comme le ferait une cuisson complète appliquée à un mélange plus riche en chaux.

Pour augmenter, par exemple, la rapidité de la prise, qualité indispensable dans certains travaux, on diminuera

la cuisson pour rendre la réaction moins complète et augmenter la proportion des aluminates, mais on diminuera en même temps la proportion de chaux de quelques centièmes pour éviter qu'il n'en reste en liberté.

Outre le ciment Portland normal ci-dessus étudié, qui se présente au défournement en roche verdâtre, d'aspect scoriacé, et d'une grande dureté, on retire du four 25 p. 100 environ de déchets ou du moins de ciment médiocre que l'on fait habituellement passer avec le reste par raison d'économie.

Ce sont d'abord des matières pulvérulentes désignées sous le nom de *poussières bleues*, provenant de la désagrégation de roches de ciment bien cuites, mais renfermant une proportion trop considérable de silicate dicalcique. La présence de ce silicate est due à un excès de cuisson dans le cas de pâtes trop argileuses et aussi à l'action superficielle des cendres du combustible ou des parois siliceuses des fours sur les surfaces des roches de ciment. Ces poussières durcissent lentement, mais elles peuvent, comme les chaux hydrauliques, prendre à la longue une grande dureté. D'autre part, elles ont le grand mérite d'être certainement exemptes de chaux libre et, par suite, de ne pas être sujettes au gonflement.

On trouve ensuite des pâtes incuites, brunes ou grises, poreuses, qui s'éteignent peu à peu à l'humidité atmosphérique en donnant des poussières brunes. Ces incuits renferment de la chaux libre, du ferrite de chaux et des aluminates de chaux. Après une extinction partielle, ils donnent un ciment faisant prise très rapidement, mais de peu de résistance et très irrégulier.

Enfin, on trouve contre les parois du four des scories siliceuses, des verres et parfois des masses parfaitement cristallisées de wollastonite  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ , matières inertes que l'on considère souvent, mais à tort, comme des roches de ciment surcuites.

*Ciment à prise rapide.* — La nécessité de préparer par des mélanges artificiels les pâtes des ciments Portland élève considérablement le prix de revient de ces derniers. La cuisson des mélanges naturels constituant les calcaires marneux, qui est beaucoup plus économique, peut être employée pour la fabrication des ciments de qualité ordinaire; mais ceux-ci diffèrent complètement par leur composition, leur cuisson et leur emploi des ciments Portland. L'expérience a montré que les meilleurs résultats étaient obtenus en employant des calcaires riches en argile, en cuisant peu la roche, et enfin en laissant éteindre le ciment à l'air avant son emploi.

Ces ciments se présentent après cuisson sous forme de pierre brune, poreuse, légère et friable, ne présentant aucune apparence extérieure de fusion. Ils paraissent renfermer, outre le silicate tricalcique peu abondant, de la chaux libre, des aluminates et des ferrites de chaux, et, en même temps, des silicates acides, tous produits résultant d'une réaction incomplète. Une extinction partielle est utile avant leur emploi pour éliminer la chaux vive; mais un séjour trop prolongé à l'air humide l'évite complètement. Cette extinction est facilitée par la porosité du ciment peu cuit. Le ferrite de chaux se reconnaît aisément à la décoloration des mortiers pendant leur prise, due à la formation de ferrite de chaux hydraté blanc, suivie bientôt d'une coloration superficielle brune au contact de l'acide carbonique de l'air, par suite de la mise en liberté du sesquioxyde de fer hydraté. Ces ciments, de qualité inférieure, n'ont pour eux que leur bas prix de revient dû à l'emploi des calcaires naturels, à la faible dépense de combustible nécessitée par la cuisson et à la faible dépense du travail mécanique nécessitée pour leur pulvérisation.

*Chaux hydrauliques.* — Les chaux hydrauliques s'ob-

tiennent par la cuisson des calcaires argileux, ou mieux siliceux, renfermant moins de silice et d'alumine que les calcaires à ciment. La proportion de chaux libre restant après la cuisson doit être suffisante pour que son extinction amène la désagrégation complète de la masse sans l'intervention d'aucun procédé mécanique. Pour ces motifs, le prix de revient des chaux est bien moindre que celui des ciments; mais, par contre, elles ont l'inconvénient de durcir moins rapidement et moins complètement, une partie des éléments actifs ayant été détruits pendant l'extinction.

Un bon calcaire à chaux hydraulique doit être constitué presque exclusivement de silice et de carbonate de chaux, toutes les autres matières donnent des composés qui restent inertes pendant la prise, soit qu'ils soient inattaquables à l'eau, soit, au contraire, qu'étant trop facilement altérables comme les aluminates ils s'hydratent pendant l'extinction. Le fer et l'alumine, pourtant, facilitent la cuisson, comme ils le font pour les ciments, la rendent plus économique en permettant d'élever moins la température et de la soutenir moins longtemps. A ce point de vue seul la présence de petites quantités de ces matières peut être avantageuse. Dans les chaux de bonne qualité, l'observation montre que la proportion n'en dépasse pas 3 p. 100.

L'infusibilité de la silice et de la chaux est un obstacle à leur réaction mutuelle qui est toujours très lente et reste facilement incomplète. Même en présence d'un excès de chaux il est difficile d'éviter la formation de silicates insuffisamment basiques et inertes. On ne peut espérer obtenir une chaux hydraulique convenable par la cuisson d'un calcaire siliceux, que si la silice y est à un état de division, de ténuité extrême. Dans le calcaire du Teil la silice se présente en petits grains sphériques ayant un peu moins de 1/1000 de millimètre de diamè-

tre. Des calcaires renfermant de la silice à l'état de sable quartzueux, dont les grains ont toujours un diamètre appréciable, ne sauraient être employés avantageusement. Mais c'est seulement la grosseur des grains de silice et non son état cristallin, comme on l'a avancé, qui la rend inapte à donner des produits hydrauliques.

Les proportions relatives de silice et de carbonate de chaux les plus convenables dans un calcaire seraient, en ne tenant compte que de la formule du silicate actif :  $\text{SiO}^2, 3\text{CaO}$ ,

$\text{SiO}^2$ . . . . .	16,6
$\text{CaO}, \text{CO}^2$ . . . . .	83,4
	<hr/>
	100,0

Mais, en réalité, il faut, d'une part, plus de calcaire pour fournir l'excès de chaux libre qui doit par son extinction permettre d'effectuer la pulvérisation spontanée de la matière, et, d'autre part, plus de silice, une partie échappant toujours aux réactions qui restent incomplètes. Ces deux nécessités contraires se compensent partiellement et l'observation montre que les calcaires les plus réputés se rapprochent de la composition indiquée ci-dessus.

Le degré de cuisson a une très grande influence sur la qualité des chaux; une forte cuisson rend plus complète les réactions de la silice et de la chaux, augmente la proportion de silicate tricalcique et, par suite, améliore de ce chef le degré d'hydraulicité du produit. Mais, par contre, elle diminue la proportion de chaux libre, ce qui rend l'extinction plus difficile. Avec des calcaires peu siliceux renfermant plus de 4 équivalents de chaux pour 1 de silice, la cuisson ne sera jamais trop forte; il restera toujours assez de chaux libre pour assurer l'extinction.

Il en sera tout autrement avec les calcaires ne renfer-

mant pas plus de 3 équivalents de chaux pour 1 de silice; une cuisson très avancée donne ce que l'on appelle les *grappiers noirs* de ciment, ou chaux limites de Vicat. Ce produit ne se pulvérise pas par extinction et peut donner un commencement de prise comme lorsqu'il a été finement broyé, sans extinction préalable. Mais alors il se relâche au bout d'un certain temps, gonfle et finit par se désagréger sous l'influence de la petite quantité de chaux libre qu'il renferme. Si l'on fait suivre le broyage d'une extinction à l'air longtemps prolongée, de façon à la rendre complète, on obtiendra un produit hydraulique de très bonne qualité.

Une cuisson de moins en moins complète donnera des chaux dont l'extinction sera de plus en plus facile et ne nécessitera aucun broyage, mais en même temps le degré d'hydraulicité ira en décroissant. Le degré de cuisson le plus convenable dépendra de la perfection des moyens d'extinction dont on dispose. Plus une usine fera une extinction soignée, plus elle pourra pousser la cuisson vers la production de *grappiers noirs*, et plus elle augmentera la qualité de ses chaux. C'est là le point qui établit la plus grande démarcation entre usines cuisant des calcaires similaires.

L'amélioration résultant de l'addition de *grappiers broyés* à la chaux est souvent contestée; cette divergence d'opinions provient de ce que l'on réunit, sous ce même nom de *grappiers*, des matières très dissemblables. Le mot *grappier* désigne tout ce qui échappe à la pulvérisation par extinction; c'est un mélange renfermant, d'une part, des calcaires non cuits, de la chaux mal éteinte, de la chaux noyée et déjà prise, de la wollastonite, toutes matières blanches ou jaunâtres et à peu près inertes, et, d'autre part, des grains gris noirs, très durs, qui sont du véritable ciment. La proportion de ces derniers varie, suivant la nature des chaux et leur cuis-

son, de plus de 50 p. 100 à moins de 1 p. 100. Si, dans le premier cas, l'addition des *grappiers* est avantageuse, elle ne peut être que nuisible dans le second cas.

L'extinction a une influence au moins aussi considérable que la cuisson sur la qualité de la chaux; c'est généralement dans la fabrication des chaux la partie qui laisse le plus à désirer.

L'extinction ou pulvérisation sous l'influence d'une réaction chimique est un phénomène très fréquent, produit surtout par l'action des corps gazeux sur les corps solides (oxydation spontanée des pyrites, rouille du fer, hydratation de la chaux par la vapeur d'eau atmosphérique). Cette extinction est la condition indispensable de toute réaction entre corps gazeux et solide. Si le solide ne se désagrège pas, il ne se produit qu'une réaction superficielle, le nouveau composé forme un enduit qui intercepte les contacts et fait cesser la réaction (oxydation des feuilles de zinc à l'air). L'extinction au contact des liquides est, au contraire, tout à fait exceptionnelle, on n'en connaît que trois exemples: l'hydratation de la chaux, de la baryte et de la strontiane; et même dans ces cas, la division finale obtenue est moins parfaite. L'élévation de température, qui accélère toutes les réactions chimiques, rend l'extinction plus rapide et paraît aussi la rendre plus complète en amenant l'eau à réagir à l'état de vapeur.

Dans l'extinction d'une chaux hydraulique il faut obtenir l'hydratation complète de la chaux en altérant le moins possible le silicate. Ce résultat ne peut être obtenu qu'en opérant à une température très élevée qui maintienne l'eau employée à l'état de vapeur. Sous cet état l'eau n'a pour ainsi dire pas d'action sur les silicates dont elle ne provoque pas l'extinction, tandis qu'elle le fait rapidement pour la chaux, les aluminates et les ferrites. L'élévation voulue de température est fournie par

la chaleur considérable d'hydratation de la chaux ; on doit éviter avec le plus grand soin toutes les déperditions de chaleur en donnant aux tas de chaux un volume aussi considérable que possible, et les préservant contre toute cause de refroidissement extérieur. Même dans ces conditions, l'extinction est très lente ; pour les chaux fortement hydrauliques, elle dure normalement une semaine. Mais cette durée est très variable avec la nature des chaux. Celles qui sont peu hydrauliques soit par suite d'un défaut de cuisson, soit par suite d'un défaut de silice, peuvent s'éteindre en quarante-huit heures ; pour les grappiers, au contraire, la durée d'extinction à l'air, tant avant qu'après broyage, doit se compter par mois.

Une extinction insuffisamment prolongée donne des chaux dont la prise est très rapide, mais qui gonflent et se désagrègent à la longue. Une extinction à trop basse température donne des chaux noyées, qui, ayant partiellement durci pendant l'extinction, ne peuvent plus le faire à l'emploi, et qui, d'autre part, sont souvent par place insuffisamment éteintes par suite de l'abaissement de la température et gonflent à la longue.

L'extinction des chaux hydrauliques est donc la partie la plus délicate de leur fabrication, il est impossible de l'effectuer sur place au moment de l'emploi ; c'est toujours à l'usine qu'elle doit être faite.

#### **Durcissement.**

Le durcissement des matériaux hydrauliques se divise en deux phases : la *prise* et le *durcissement* proprement dit, dont la distinction au point de vue chimique n'est pas très nette ; mais, au point de vue pratique, ces deux phases ont une importance particulière assez grande pour mériter une étude séparée.

La *prise* n'est guère que le commencement du durcis-

sement ; elle se caractérise par une diminution progressive de la fluidité des mortiers ; elle commence à se manifester par la persistance des solutions de continuité, des vides produits artificiellement dans la pâte qui ne se rebouchent plus sous l'influence de la pesanteur ou de la capillarité. A partir de ce moment, le mortier n'est plus bon à être employé. Plus la prise commence vite, plus le travail de l'ouvrier est difficile. On considère la prise comme terminée, lorsque la pâte du mortier ne cède plus sous l'influence d'efforts modérés tels que la pression du pouce ou celle d'une tige d'acier chargée de poids (aiguille Vicat).

Les réactions chimiques qui accompagnent la prise peuvent être différentes de celles qui continuent à se produire pendant le durcissement. Mais il n'en est pas toujours ainsi ; dans les chaux hydrauliques, par exemple, on ne saurait établir une distinction semblable. Dans les ciments, au contraire, qui n'ont éprouvé que peu ou pas d'extinction, il existe, en outre du silicate tricalcique, des composés dont l'hydratation devient complète au bout de peu d'instant, c'est le cas des aluminates, des ferrites de chaux, et de la chaux vive. Les parties les plus ténues du silicate de chaux, la surface des grains, éprouvent aussi une hydratation assez prompte. Ces diverses réactions chimiques peuvent, au début, donner une allure très rapide au durcissement et constituent la période de prise.

Il est facile de prévoir les circonstances qui pourront faire varier la rapidité de la prise ; elles sont tellement nombreuses qu'il n'y a guère d'éléments de la qualité des ciments qui ne soient susceptibles des plus grandes irrégularités. La finesse du ciment dépendant des procédés du broyage et du blutage, la porosité des grains dans les ciments cuits à basse température et rapidement, la proportion notable d'aluminates et de ferrites donnent des

ciments de plus en plus rapides. Le défaut d'extinction dans la chaux hydraulique produira le même effet. Les circonstances de l'emploi, température extérieure, compositions chimiques des eaux, n'ont pas une influence moins considérable.

Lorsqu'on suit la marche de la prise au moyen d'un thermomètre, procédé d'observation plus précis que ceux qui reposent sur l'étude de l'accroissement de compacité, on remarque souvent, au début, une période d'inertie pendant laquelle la température ne s'élève pas; il semble que les réactions chimiques ne commencent pas tout de suite. Puis, au bout de quelques instants, la température se met brusquement à monter et la prise avance rapidement. Cette particularité se rattache très simplement aux phénomènes de sursaturation dont j'ai signalé l'existence. Tant que la dissolution se produit seule, le dégagement de chaleur est nul ou très faible, la prise ne commence pas. Ce n'est qu'au moment où commence la désaturation par cristallisation que la prise se produit en se manifestant par un rapide dégagement de chaleur.

Le *durcissement* proprement dit est amené presque exclusivement par l'hydratation lente et progressive du silicate de chaux qui, après avoir commencé pendant la prise, se continue à peu près seule ensuite. La vitesse avec laquelle s'achève le durcissement ne présente pas grand intérêt; la dureté définitive seule importe. Il faut étudier les circonstances qui peuvent influer sur cette résistance finale. Ceci suppose que les ciments atteignent une dureté limite qu'ils conservent ensuite indéfiniment. Souvent il n'en est pas ainsi: après être passée par un maximum la résistance décroît ensuite. Il y a donc une troisième phase dans le durcissement des ciments pendant laquelle ils éprouvent une rétrogradation plus ou moins complète. Je laisserai, pour le moment, de côté

cette partie de la question et j'y reviendrai plus loin dans l'étude des causes de destruction des ciments.

J'ai montré, au commencement de cette étude, que la dureté d'un mortier hydraulique dépendait de deux facteurs: la *cohésion* des composés cristallisés qui prennent naissance, et leur *adhérence* soit les uns avec les autres, soit avec le sable qui leur est mêlé. Il n'y a rien à dire de la cohésion, mais il peut être intéressant de revenir sur l'adhérence, et d'étudier, avec plus de détail, les modifications souvent considérables qu'elle éprouve du fait des variations des circonstances extérieures les plus insignifiantes en apparence.

L'adhérence dépend principalement:

1° De la *nature* des corps en contact, et de l'*orientation* relative des faces de contact dans le cas de corps cristallisés;

2° De l'*étendue* des surfaces de contact.

*Nature des corps en contact.* — Des cristaux de nature identique se rencontrant par suite de leur développement se soudent plus ou moins complètement. Si leur orientation relative est telle que la surface de contact détermine deux plans réticulaires superposables, ils pourront se réunir de façon à ne former qu'un seul individu. Dans ce cas, leur adhérence deviendra égale à leur cohésion interne, mais, en général, il n'en est pas ainsi et l'on observe que l'adhérence de deux individus orientés d'une façon quelconque est bien inférieure à leur cohésion. On peut mettre ce fait en évidence en laissant cristalliser par refroidissement la dissolution d'un sel choisi parmi ceux qui ne présentent pas de clivages faciles et brisant à la main les groupements de cristaux obtenus. On observe que l'effort nécessaire est moindre que pour rompre un cristal isolé et, de plus, que la surface de rupture présente des facettes planes

indiquant que l'arrachement s'est produit suivant les faces de contact de cristaux et non à travers ceux-ci, dont la rupture eût donné une surface irrégulière.

Lorsqu'à un corps faisant prise par lui-même, on ajoute un corps étranger inerte, du sable, par exemple, pour augmenter le volume du mortier obtenu, on doit faire entrer en ligne de compte l'adhérence du sel cristallisé pour ce corps étranger.

Cette adhérence dépend de la *nature chimique* des corps en présence et de *l'état des surfaces*.

L'expérience journalière des laboratoires montre que des sels cristallisant dans un flacon en verre, adhèrent plus ou moins fortement après les parois.

Les uns se laissent briser plutôt que de s'en détacher; je citerai, par exemple, les cristaux de silicate de baryte qui se forment dans le flacon d'eau de baryte; d'autres, au contraire, se détachent sous l'influence de leur propre poids; c'est le cas du sulfate de chaux.

J'ai vérifié que ce dernier sel n'adhérait pas davantage sur le carbonate de chaux et sur le quartz, c'est-à-dire sur les éléments du sable ordinaire. L'addition de sable ne peut donc que diminuer la résistance à l'arrachement des mortiers de plâtre. Les grains ne se soudant pas au sulfate de chaux produisent simplement des solutions de continuité, diminuant la section pleine à peu de chose près comme le feraient des bulles d'air. Cette conclusion est pleinement d'accord avec les résultats de la pratique; on emploie toujours le plâtre sans y ajouter de sable.

L'état des surfaces joue également un très grand rôle dans l'adhérence; on sait que pour faire le mortier de chaux, les sables les plus rugueux donnent de beaucoup les meilleurs résultats.

L'influence de la rugosité résulte d'abord de l'augmentation des surfaces de contact; il est bien évident que le développement de la [surface réelle d'un] morceau de

verre dépoli est plus grande que celle du même morceau s'il était poli. Mais la cause principale de cette influence de rugosité me paraît devoir être cherchée ailleurs. On observe, lorsqu'on cherche à coller un objet quelconque sur une lame de verre poli avec de la gutta-percha, du baume du Canada, corps adhérent fortement au verre, que le décollement une fois commencé en un point s'étend ensuite sous l'influence d'un effort trop faible, et que le même fait ne se produit pas si le verre est dépoli. Ce phénomène me paraît devoir être rapproché de la facilité avec laquelle se propagent les fissures dans les corps homogènes et très résistants, tels que les verres qui, une fois fêlés, se fendent complètement sous un très léger effort, ce qui n'arrive pas avec les corps dont la cassure est rugueuse.

*Étendue des surfaces de contact.* — J'ai dit que le second facteur dont dépend la résistance d'un mortier est l'étendue des surfaces de contact de ces divers éléments. Cette étendue varie avec la *forme des cristaux*, avec le *volume des espaces vides* restant dans le mortier après la prise complète et avec le *mode de répartition* des espaces vides.

*Forme des cristaux.* — Une adhérence très faible par unité de surface, si elle est multipliée par une étendue de surface considérable, donnera comme résultante une force totale d'adhérence très grande qui pourra même arriver à égaler la cohésion interne des cristaux, c'est-à-dire la résistance maxima que puisse présenter le mortier. La surface des cristaux augmente d'ailleurs à mesure qu'ils sont plus allongés, qu'ils diffèrent davantage de la forme sphérique, dont la surface est un minimum. La forme de prismes allongés que j'ai reconnue dans la cristallisation du plâtre et de tous les

produits similaires est donc éminemment favorable au développement de l'adhérence.

*Volume des vides.* — La quantité d'eau que l'on est obligé d'employer pour gâcher un mortier à consistance convenable est généralement supérieure à celle qui peut être solidifiée par la prise. Pour gâcher le plâtre aussi serré que possible, la quantité d'eau nécessaire est d'environ 30 p. 100 de son poids, tandis que la quantité d'eau qu'il fixe n'est que 15 p. 100. On emploie donc au moins deux fois trop d'eau, et généralement on met plus d'eau encore pour ralentir la prise et faciliter l'usage du mortier. Cette eau en excès reste emprisonnée et forme des solutions de continuité qui diminuent l'étendue des surfaces de contact. Si ces vides n'existaient pas, les cristaux se toucheraient sur toutes leurs surfaces et l'adhérence serait maxima.

A mesure que le volume des vides augmente, l'étendue des surfaces de contact diminue jusqu'au moment où, les cristaux ne se touchant plus, il n'y a plus du tout prise; on se trouve simplement en présence d'une masse boueuse, formée par la suspension plus ou moins complète d'un précipité au milieu de l'eau en excès. Le volume des vides suffisant pour empêcher le contact des cristaux et, par suite, la quantité d'eau qu'un mortier peut supporter sans cesser de faire prise dépendent essentiellement de la forme des cristaux. Des prismes allongés pourront supporter un bien plus grand excès d'eau sans cesser de se toucher les uns les autres que ne le feraient des cubes.

Supposons des cubes qui soient régulièrement disséminés dans l'espace et dont les centres forment, par exemple, un réseau cubique, mais qui soient orientés autour de leur centre d'une façon quelconque. La condition suffisante pour qu'il n'y en ait plus se touchant

deux à deux est que leur plus grande longueur, c'est-à-dire leur diagonale, soit au plus égale au côté du réseau cubique. Le volume des vides qu'il est aisé de calculer sera alors un peu moins du double du volume des cristaux.

Avec des prismes allongés dont la hauteur serait, par exemple, égale à dix fois leur épaisseur, qui auraient, comme les cubes précédents, leurs centres sur un réseau cubique et qui seraient orientés d'une façon quelconque, les contacts deviendront impossibles quand leur plus grande longueur, c'est-à-dire leur axe, sera égal au côté du réseau cubique. Le volume des vides sera alors 99 fois celui des cristaux, c'est-à-dire que des cristaux prismatiques dix fois plus longs que larges pourront supporter, avant de cesser complètement de faire prise, un excès d'eau 50 fois plus grand que des cristaux cubiques.

La conclusion évidente de ces considérations est que la prise du mortier qui renferme toujours un excès d'eau ne pourra résulter que de la formation de cristaux très allongés; c'est bien en effet le résultat auquel conduit, en dehors de toute idée théorique, l'observation directe des faits, comme je l'ai montré plus haut.

*Répartition des vides.* — J'ai supposé, dans ce qui précède, les cristaux uniformément répartis et, par suite, aussi les vides. En réalité, il ne peut en être ainsi; par place les cristaux seront plus serrés, ailleurs ils seront plus espacés. Cette répartition inégale peut avoir une très grande importance sur la résistance définitive. Reprenons l'exemple précédent des cubes régulièrement disséminés dans l'espace et ne se touchant plus, c'est-à-dire pour lesquels le rapport des volumes vides ou pleins est égal à 2 et qui forment, par suite, un système de résistance nulle. Si nous modifions leur répartition de façon à les accoler les uns aux autres le long de certaines di-

rections, par exemple suivant les faces d'un cube limitant un volume donné, nous pourrions former un assemblage solide. Il est facile de s'assurer que la résistance à l'arrachement d'un semblable système sera moitié de celle qu'elle aurait s'il n'y avait pas de vide, c'est-à-dire moitié de sa valeur maxima.

J'ai supposé ici que le rapprochement des cristaux se faisait suivant une loi déterminée, hypothèse qui peut sembler à première vue bien éloignée de la réalité. En fait, de semblables rapprochements se produisent spontanément dans un bien grand nombre de cas et contribuent à accroître notablement la résistance des mortiers. Prenons un mortier formé d'un mélange de ciment finement pulvérisé, comme c'est l'habitude, et de sable ordinaire, c'est-à-dire assez grossier. Les grains de sable, plus ou moins arrondis, se touchent en certains points autour desquels l'intervalle qui sépare ces grains va en s'accroissant progressivement. On conçoit que si tout le ciment pouvait être concentré dans la zone resserrée qui entoure ces points de contact, l'effet utile d'une quantité donnée de ciment atteindrait son maximum. Si, au contraire, le ciment est uniformément réparti dans tout l'intervalle des vides laissés par les grains de sable, il est bien évident que les cristaux formés, noyés dans un grand excès d'eau et éloignés pour la plupart des grains de sable, se trouveront dans des conditions de travail bien moins favorables. Or, cette concentration du ciment aux points voulus peut s'obtenir très simplement par la capillarité de l'eau; il suffit de mettre le mortier à égoutter, les vides les plus volumineux se vident et l'eau se retire dans les espaces les plus étroits, entraînant avec elle le ciment pulvérulent qu'elle réunit ainsi aux points voulus. On sait, en effet, que l'on double la résistance des briquettes d'essai de ciment quand, aussitôt moulées, on les met égoutter sur une surface poreuse de plâtre sec.

C'est à un groupement analogue des cristaux qu'il faut sans doute rattacher l'augmentation de résistance que prend le plâtre par dessiccation. L'accroissement de résistance ainsi produit est notable et il l'est d'autant plus que l'excès d'eau employé au gâchage a été plus considérable. Des cylindres de plâtre secs, puis imbibés d'une solution saturée de sulfate de chaux m'ont donné à l'écrasement les chiffres suivants :

	Résistance pour 1 centim. carré.
Cylindres secs. . . . .	56 kilogr.
— mouillés . . . . .	62 —
	28 —
	30 —

La diminution de résistance a donc été exactement de moitié. On peut supposer que le mécanisme de ce phénomène est analogue à celui du durcissement de l'argile par dessiccation, mais dans le cas du plâtre l'effet est bien moins marqué parce que les cristaux déjà soudés les uns aux autres ne possèdent pas l'entière mobilité des particules d'argile. Ils peuvent seulement, sous l'influence des forces capillaires développées par l'évaporation de l'eau, s'infléchir dans l'intervalle de leurs points de suture de façon à venir se toucher et adhérer deux à deux en de nouveaux points. Ce mouvement se produira toujours dans la direction où les cristaux sont les plus rapprochés et, par suite, diminuera le nombre des solutions de continuité de la masse en augmentant, d'autre part, le volume de celles qui subsistent; ce sont les conditions les plus favorables à l'accroissement de résistance. Le retrait de la masse est très faible, car il est de l'ordre de grandeur du rapprochement des deux extrémités d'une droite qui s'infléchit légèrement; il ne peut être comparable à celui de l'argile où les particules se rapprochent tout d'une pièce.

On voit donc, en résumé, que la grandeur de l'effort de

l'adhérence et, par suite, la résistance du mortier sont intimement liées à la forme allongée des cristaux et à leur mode de répartition, conditions qui dépendent elles-mêmes des phénomènes de sursaturation.

L'allongement des cristaux est d'autant plus grand qu'ils se précipitent d'une dissolution plus fortement sursaturée; la finesse de mouture qui augmente l'étendue des surfaces de dissolution sera donc favorable au durcissement. Cette influence de la rapidité des réactions chimiques se fait particulièrement sentir pour le plâtre. On sait que ce dernier fortement calciné ne donne plus qu'un mortier très médiocre; l'anhydrite naturelle ne durcit plus du tout. Ce n'est pas, comme on le croit habituellement, par suite d'un défaut d'hydratation; l'action de l'eau n'est pas nulle, elle est seulement très lente et l'hydrate formé se trouve en cristaux gros et courts qui adhèrent mal ensemble. Cette explication est confirmée par ce fait que l'hydrate cristallisé  $\text{SO}^3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $0,5\text{HO}$  qui ne diffère pas du plâtre cuit, donne une très mauvaise prise. L'absence de porosité, d'étendue des surfaces de contact avec l'eau, suffit pour modifier les conditions de la cristallisation. Les ciments à prise rapide, cuits à très basses températures doivent sans doute à leur porosité et, par suite, à la rapidité de leur hydratation, de pouvoir prendre une certaine dureté que l'on ne serait pas en droit d'attendre de produits incomplètement cuits, dans lesquels la proportion de matière active doit être relativement faible.

L'élévation de température qui accélère les réactions chimiques devrait être favorable au durcissement des ciments, mais l'expérience semble indiquer qu'entre 0 et 100 degrés la dureté définitive des produits de bonne qualité change peu. La limite seulement est atteinte beaucoup plus rapidement. Il est possible que la température ait une influence spéciale sur l'allongement des

cristaux, de sens contraire à celle que produit une augmentation de la sursaturation. Je laisse, bien entendu, de côté les produits de mauvaise qualité, insuffisamment éteints, dont la destruction est considérablement augmentée ainsi que je le dirai plus loin.

Mais ce ne sont pas là les seules causes qui influent sur le développement des cristaux; la présence de petites quantités de matières étrangères dans l'eau de gâchage peut avoir une action très considérable. Je rappellerai, à ce sujet, les expériences de Leblanc sur la cristallisation de l'alun; mais nos connaissances sur ce sujet sont trop incomplètes pour que l'on puisse chercher à en faire aucune application au cas actuel. L'existence de semblables influences semble bien mise en évidence par la différence des résultats que l'on obtient en gâchant un ciment avec de l'eau de pluie, de l'eau de rivière, ou de l'eau séléniteuse.

Comme dernière circonstance pouvant influencer sur le développement des cristaux, je signalerai le nombre des centres de cristallisation se produisant dans la liqueur sursaturée; moins il y en aura, plus les cristaux s'allongeront, plus les conditions seront favorables. Mais il est assez difficile de prévoir les circonstances qui déterminent le développement des premiers cristaux. C'est sans doute dans cette direction qu'il faut chercher la cause des mauvais résultats obtenus avec les ciments éventés. L'hydratation à l'air de quelques centièmes seulement des éléments actifs enlève au ciment toutes ses qualités. Il ne semble pas y avoir là proportionnalité entre la cause et l'effet; la résistance finale ne devrait diminuer que de quelques centièmes si les parties hydratées se comportaient comme des matières inertes. Elles doivent, en créant à la surface de tous les grains une infinité de centres de cristallisation, s'opposer à une sursaturation convenable de la dissolution.

## CAUSES DE DESTRUCTION DES MORTIERS HYDRAULIQUES.

Après avoir étudié les causes du durcissement des mortiers hydrauliques, il est intéressant de passer en revue les circonstances qui peuvent amener leur destruction. Ces mortiers peuvent être employés dans trois conditions essentiellement différentes :

- A l'air libre,
- Sous l'eau ordinaire,
- Sous l'eau de mer.

Leur destruction dans ces diverses conditions peut être rattachée à quatre causes principales : destruction de certains hydrates par *efflorescence* sous l'influence de la chaleur et de la sécheresse; hydratation accompagnée *d'extinction* de certains produits extrabasiques; décomposition des sels calcaires par *dissolution* de leur chaux; enfin, *décomposition* des mêmes sels par les sels magnésiens.

Ces diverses influences se feront inégalement sentir suivant la compacité des mortiers; par suite, leur action variera avec les proportions de sable et d'eau employées au gâchage. Un mortier sans vides ne pourra s'attaquer que superficiellement à l'eau douce ou à l'eau de mer; il résistera bien plus longtemps qu'un mortier perméable. La différence sera la même que celle que l'on observe dans la dissolution d'un cristal de sucre ou d'un morceau de pain de sucre. La porosité, d'autre part, retardera la destruction par extinction en permettant au gonflement de combler les vides internes avant de faire sentir son action au dehors.

Je ne crois pas qu'il soit utile d'insister plus longtemps sur ces faits, aujourd'hui bien connus.

Ceci posé, passons rapidement en revue les diverses causes de destruction des mortiers énoncées ci-dessus.

*Déshydratation à l'air sec.* — Un certain nombre de sels hydratés, le carbonate de soude par exemple, perdent leur eau à l'air sec et en même temps se désagrègent, et finalement se réduisent en une poussière blanche sans cohésion. Parmi les sels calcaires hydratés, se formant pendant la prise du ciment, les aluminates de chaux sont les seuls qui m'ont paru susceptibles d'éprouver une altération semblable. Cette cause de destruction est très nette, avec les ciments à prise rapide; des briquettes laissées six mois à prendre sous l'eau et placées ensuite dans une atmosphère sèche se sont fendillées par retrait.

Il suffit, après dessiccation, de les chauffer pendant quelques minutes à 100° pour leur faire perdre moitié de leur résistance. Rien de semblable ne s'observe avec les ciments Portland de bonne qualité.

*L'hydratation à l'air humide ou même à l'eau suivie de gonflement* est de beaucoup la cause la plus fréquente de destruction des mortiers. La présence de matières susceptibles d'extinction, aluminate de chaux extrabasique, chaux magnésienne, ou même chaux pure, peut résulter d'un excès de carbonate de chaux dans les mélanges soumis à la cuisson, d'une cuisson insuffisante ou enfin d'un défaut d'extinction dans les chaux hydrauliques. Cet effet est d'autant plus marqué que les grains de ciment sont plus volumineux; l'intérieur échappe à l'action de l'eau pendant le durcissement, comme je l'ai expliqué à propos de l'action de l'eau sur les aluminates et peut ultérieurement s'éteindre au contact de l'humidité atmosphérique. Cette cause de destruction est plus redoutable à l'air que dans l'eau; certains composés susceptibles de faire prise au contact de l'eau liquide s'éteignent, au contraire, sous l'action de l'air humide. Mais si le gon-

flement final est plus considérable à l'air, il est par contre beaucoup plus lent à se produire.

Je citerai comme exemple un ciment assez riche en chaux provenant d'une des usines françaises les plus réputées, qui, après six mois de prise sous l'eau, avait donné des briquettes parfaitement intactes et présentant une bonne résistance. Ces briquettes, retirées de l'eau et abandonnées à l'air, ont commencé à se fendiller au bout de trois ans et, la sixième année, s'étaient complètement désagrégées et réduites à l'état de masse sableuse. La poussière la plus fine, séparée par tamisage, s'est montrée plus riche en chaux que les fragments plus grossiers. C'est donc bien certainement à l'extinction d'une petite quantité de chaux libre qu'était due la désagrégation.

Cette action différente de l'eau à l'état liquide ou à l'état gazeux peut être mise en évidence avec la plus grande facilité en expérimentant sur des sels rapidement hydratés comme le sulfate et le carbonate de soude. Fondus et broyés finement, puis humectés d'eau liquide, ils font rapidement prise sans présenter aucun gonflement; abandonnés, au contraire, à l'air, ils s'hydratent lentement et gonflent énormément. En les enfermant dans des tubes ou simplement dans des sacs en papier, on voit bientôt l'enveloppe crever de toute part et le sel sortir par les déchirures.

Pour que l'extinction de la chaux produise des effets aussi désastreux, il faut que son extinction soit très lente et ne se complète qu'après le durcissement du mortier. La chaux obtenue par la cuisson du calcaire pur constitue une masse extrêmement poreuse qui s'éteint dans l'intervalle de quelques secondes; sous cet état elle est peu nuisible, car son hydratation est terminée avant le commencement du durcissement proprement dit. C'est là ce qui paraît se passer pour les ciments à prise rapide cuits à basse température et très poreux. Mais si la chaux est

compacte et ne présente pas de pores possédant une surface d'attaque par l'eau extrêmement considérable, l'hydratation devient fort lente. Cette compacité est obtenue toutes les fois que la chaux se produit au contact de corps fondus qui lui servent de dissolvant et lui permettent de cristalliser. Cela se passe ainsi dans la décomposition de l'azotate de chaux, dans la calcination de la chaux du carbonate au contact de matières fusibles tels que le chlorure de calcium, les aluminates de chaux, le sulfate de chaux. Le retard est plus considérable encore lorsque la chaux cristallise en présence de magnésie avec laquelle elle se mêle intimement soit par combinaison chimique, soit par mélange isomorphe. C'est par années, dans ces cas, comme je l'ai montré plus haut, qu'il faut compter la durée de l'extinction. Il n'y a pas d'autre cause à chercher aux mauvais résultats obtenus avec les ciments magnésiens; il est inutile d'attribuer à la magnésie une action propre. La substitution dans un ciment de la magnésie à la chaux, équivalents à équivalents, n'a qu'un résultat, celui d'atténuer l'action de l'eau, si bien que, pour une certaine teneur en magnésie, il n'y a plus du tout de prise. On ne peut obtenir un ciment susceptible de faire prise qu'en forçant beaucoup la proportion des bases. Il reste alors de la chaux et de la magnésie en excès qui peuvent faire prise comme la dolomie calcinée, mais de même aussi se désagrègent à la longue.

La proportion de chaux libre nécessaire pour altérer d'une façon notable les qualités d'un ciment est extrêmement faible. J'ai montré plus haut que l'addition de 1 p. 100 de chaux de l'azotate à un ciment de bonne qualité suffit pour réduire de moitié sa résistance.

Cette cause de destruction me paraît mériter une attention beaucoup plus grande qu'on ne lui en accorde habituellement. Je serais porté à croire qu'au moins neuf fois sur dix c'est la seule cause de dégradation des mortiers

hydrauliques employés à l'air où à l'eau douce. Si elle échappe souvent à l'observation, c'est que son action ne commence parfois à se faire sentir qu'au bout de plusieurs mois, c'est-à-dire longtemps après la fin des essais tels qu'on les pratique habituellement aujourd'hui.

*L'action dissolvante* de l'eau amènerait, à la longue, la décomposition totale des mortiers hydrauliques, si la carbonatation qui se produit simultanément, ne les protégeait contre cette influence. Cette carbonatation est plus ou moins efficace suivant la lenteur avec laquelle elle a lieu. Produit rapidement avec les mortiers de chaux hydrauliques qui renferment de la chaux éteinte pulvérulente, le précipité de carbonate de chaux pourra être également pulvérulent, sans adhérence, et entraîné là où il y a passage d'eau à travers les fissures de maçonnerie. Celles-ci, loin de se boucher, iront en augmentant. Avec les ciments, au contraire, où la chaux libre est moins abondante et surtout moins divisée, la réaction plus lente amènera la cristallisation adhérente du carbonate de chaux, et celui-ci finira par boucher les fissures des maçonneries qui seront ainsi produites par l'action dissolvante de l'eau. Une expérience de laboratoire que j'ai déjà rapportée plus haut met bien nettement en évidence ces deux modes différents de carbonatation. Abandonne-t-on sous l'eau du silicate ou de l'aluminate de chaux, on voit peu à peu se former, sous l'influence de l'acide carbonique de l'air, des cristaux de calcite adhérents aux parois de la fiole. Si on remplace l'aluminate ou le silicate par de la chaux éteinte, il se forme seulement à la surface du liquide des croûtes de carbonate de chaux qui tombent peu à peu au fond de la liqueur sans contracter aucune adhérence entre elles ni avec les parois de la fiole.

C'est donc seulement grâce à la carbonatation lente de la chaux que les mortiers hydrauliques peuvent échapper

à l'action destructive de l'eau et résister là où le plâtre, le sulfate de chaux, qui ne se carbonate pas, finit par se dissoudre totalement.

*Les sels magnésiens de l'eau de mer* produisent une action analogue à celle de l'eau pure, mais beaucoup plus énergique. Ils dissolvent la chaux, comme l'a montré Vicat, en laissant précipiter de la magnésie hydratée floconneuse. Un litre d'eau de mer qui renferme 2 grammes de magnésie peut dissoudre 2<sup>gr</sup>,8 de chaux, tandis que l'eau pure n'en enlèverait au silicate que 0<sup>gr</sup>,052 par litre. Il semble que la magnésie, devrait, en se précipitant, cristalliser et jouer par suite le même rôle que le carbonate de chaux. Cela arriverait sans doute si la précipitation était infiniment lente, mais eu égard à la faible solubilité de la magnésie, à la concentration des eaux de la mer en sels magnésiens, et à celle des eaux d'imbibition du mortier en chaux, la réaction est infiniment trop rapide pour donner ce résultat.

Avec un tel pouvoir dissolvant des eaux de la mer sur le ciment, l'attaque serait aussi rapide et aussi complète qu'elle l'est pour un mortier de plâtre placé dans une eau courante, si la carbonatation progressive de la chaux ne venait la protéger contre l'action des sels magnésiens. Il ne faut pas chercher ailleurs la cause de la résistance plus ou moins prolongée des ciments à l'action destructive de la mer. Il est donc intéressant d'étudier toutes les circonstances qui peuvent favoriser la formation et la cristallisation des carbonates.

La cristallisation est d'autant plus parfaite que la carbonatation s'effectue sur des composés calcaires moins solubles. Il semble donc que l'élimination plus ou moins complète de l'hydrate de chaux serait favorable; l'addition d'une certaine quantité de pouzzolane au ciment permettrait d'atteindre ce résultat. L'emploi comme sable de silicates de chaux inertes à l'action de l'eau, mais atta-

quables par l'acide carbonique, comme le sont les laitiers de hauts fourneaux, semble également devoir être recommandé. J'ai montré que ces composés font parfaitement prise dans une eau chargée d'acide carbonique. Ils ne seraient sans doute pas altérés par les sels magnésiens.

Mais le meilleur procédé pour favoriser la carbonatation serait de fournir au ciment l'acide carbonique en proportion plus considérable que ne peuvent le faire les eaux de la mer, dont la teneur en acide carbonique n'est que de 50 litres par mètre cube. L'emploi des carbonates alcalins serait bien coûteux, mais peut-être serait-il possible d'utiliser la décomposition de certaines matières organiques par la chaux du ciment, de la sciure de bois, par exemple, soit naturelle, soit transformée en hydrocellulose pour la rendre plus altérable. On sait, en effet, que toutes les matières organiques chauffées avec de la chaux se dédoublent de telle sorte que tout leur oxygène passe à l'état d'acide carbonique; à froid la même réaction se produit encore, mais avec une beaucoup plus grande lenteur. Un semblable procédé permettrait de réaliser la carbonatation jusqu'au centre des maçonneries et les protégerait contre toute infiltration. Un procédé semblable était employé, intentionnellement ou non, par les Romains, dans la préparation des enduits de chaux grasse pour leurs fresques. J'ai reconnu, sur des échantillons rapportés de Pompéi, qu'ils mêlaient à la couche inférieure de l'enduit une grande quantité de fragments de paille dont il ne reste aujourd'hui que les moules. La matière organique a été complètement détruite en donnant de l'acide carbonique qui a dû contribuer à la carbonatation, aujourd'hui complète, de la chaux.

Je n'émetts ces idées que comme conséquence théorique des recherches chimiques mentionnées plus haut; elles ne sauraient être acceptées qu'après avoir été soumises au contrôle direct de l'expérience.

Je n'ai pas parlé jusqu'ici de la carbonatation de la magnésie précipitée dans les pores du ciment; elle doit se produire en même temps que celle de la chaux et même donner lieu à une cristallisation plus complète à cause de la grande solubilité du bicarbonate. De plus, le carbonate de magnésie cristallise avec une certaine quantité d'eau, condition favorable à l'obstruction des pores de la maçonnerie. Mais les hydrates de ce carbonate, stables à chaque température, ne sont pas les mêmes, et il se pourrait que les cristaux formés d'abord se détruisent ensuite en se désagrégeant par suite des variations de température; c'est là une question qui mériterait d'être étudiée.

Je n'ai pas parlé de l'hydratation du carbonate de chaux parce que ce sel se produit ordinairement anhydre et, une fois formé, il ne peut plus fixer d'eau à aucune température; il est indéfiniment stable. Il existe pourtant un hydrate de ce sel  $\text{CaO}, \text{CO}_2, 5\text{HO}$  qui peut se produire par la carbonatation de la chaux au-dessous de  $5^\circ$ ; mais il est très instable et la moindre élévation de température le transforme en carbonate de chaux anhydre pulvérulent, dénué par suite de toute résistance. Il peut être utile de tenir compte de ce fait dans le durcissement des ciments aux basses températures, surtout pour les briquettes d'expériences exposées à l'air ou placées sous une mince couche d'eau.

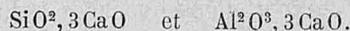
#### ESSAI DES PRODUITS HYDRAULIQUES.

En terminant cette étude, j'aborderai une question qui présente un grand intérêt au point de vue pratique, celle de l'essai des matériaux hydrauliques. On peut se demander tout d'abord si leur qualité dépend de certaines conditions bien définies et, en second lieu, s'il existe des

caractères permettant de reconnaître avant l'emploi dans quelle mesure ces conditions sont remplies.

La réponse à la première question est évidemment affirmative; j'ai montré qu'un ciment de bonne qualité a une composition parfaitement définie, et l'on doit admettre la réciproque : tout ciment présentant cette composition pourra donner un produit de bonne qualité s'il est broyé et ensuite gâché dans des conditions convenables. Mais les moyens de contrôler cette condition de composition nous font absolument défaut. L'analyse chimique brute n'apprend rien sur la nature des composés formés; elle ne distingue pas un mélange de silice et de chaux, d'un silicate de chaux, un ciment simplement décarbonaté qui n'est pas susceptible de faire prise, d'un ciment véritable cuit à point.

Le seul renseignement utile que l'on puisse tirer de l'analyse chimique est de savoir si le ciment ne renferme pas un excès de base, c'est-à-dire plus de 3 équivalents de protoxyde CaO, MgO, pour 1 équivalent d'acide (SiO<sup>2</sup>, Al<sup>2</sup>O<sup>3</sup>); la théorie que j'ai donnée plus haut montre, en effet, qu'avec cette proportion de base, il n'y aurait pas de chaux libre si le mélange était parfaitement homogène, mais seulement des composés susceptibles de faire prise :



Le mélange et la cuisson n'étant jamais parfaits, il est préférable de se tenir un peu au-dessous de cette limite. Dans ce calcul, il ne faut pas faire entrer en ligne de compte l'oxyde de fer, puisque les ferrites s'éteignent comme la chaux; il faut, d'autre part, défalquer des protoxydes la quantité voulue pour saturer l'acide sulfurique et le chlore, c'est-à-dire porter dans les analyses non pas l'acide sulfurique, mais le sulfate de chaux, de même pour le chlore. Ces conclusions sont pleinement d'ac-

cord avec les résultats pratiques de l'industrie des ciments. Je donnerai ci-dessous l'analyse de deux ciments en roche; le premier de bonne qualité, le second faisant à peine prise et se désagrégant bientôt en se gonflant, par suite de la présence d'un excès de chaux. La cuisson dans les deux cas était complète. J'exprimerai, comme je l'ai déjà fait, les résultats de ces analyses en équivalents rapportés à 1 équivalent de silice, ce qui rend les comparaisons beaucoup plus faciles.

Ciment normal.		Ciment à excès de chaux.	
Pertes et divers. . .	0,94 p. 100	1,82 p. 100	
SiO <sup>2</sup> . . . . .	1,00	1,00	} 4,17
Al <sup>2</sup> O <sup>3</sup> . . . . .	0,21	0,17	
Fe <sup>2</sup> O <sup>3</sup> . . . . .	0,04	0,03	
CaO . . . . .	3,29	3,71	} 3,76
MgO . . . . .	0,08	0,05	
CaO, SO <sup>3</sup> . . . . .	0,015	0,01	
Bases = 2,78		= 3,2	

L'analyse *élémentaire* d'un ciment ne peut donc indiquer qu'une limite de composition au delà de laquelle tous les produits obtenus sont certainement mauvais. L'analyse *immédiate*, si elle était possible, pourrait seule jeter quelque jour sur les qualités d'un ciment. Rivot avait proposé, dans cette voie, de doser la chaux libre par l'action dissolvante de l'eau; cet essai se fait encore dans la plupart des laboratoires. En réalité, il n'a aucune valeur, puisque les ciments cuits, comme je l'ai fait voir, ne renferment pas de chaux libre. Celle que l'on obtient ainsi provient de la décomposition du silicate basique, décomposition très incomplète, en 48 heures, puisque l'hydratation complète demande des mois entiers. De sorte que, par ce procédé, on ne mesure guère que la rapidité d'attaque, c'est-à-dire la finesse plus ou moins grande du ciment.

J'ai essayé, sans succès, diverses méthodes d'analyse immédiate plus ou moins détournées: action des sels ammoniacaux, mesure calorimétrique de la chaleur de dissolution dans les acides, examen de lames minces au microscope; mais je n'ai réussi par aucune de ces méthodes à obtenir des résultats concluants.

S'il est impossible de vérifier les conditions de composition, on peut chercher, sans se préoccuper de la composition, si le ciment, après durcissement, remplit les conditions de solidité voulues.

Ces essais mécaniques jouissent aujourd'hui d'une grande faveur, bien qu'en réalité ils ne soient guère plus instructifs que l'analyse chimique.

Les essais analogues faits pour les métaux sont, il est vrai, excellents, car ils mesurent directement les conditions d'allongement et de résistance qui définissent la qualité du métal. Cette qualité, après emploi, restera identique à elle-même aussi longtemps qu'une cause étrangère ne sera pas venue détruire ou altérer le métal.

Pour les ciments, le problème est tout autre; ils éprouvent, en effet, à partir du moment de leur prise, une lente évolution qui peut mettre plusieurs années avant d'atteindre sa limite. Cette limite seule est intéressante à connaître, et les essais qui doivent être faits à courte échéance ne peuvent rien apprendre à son sujet. Ils donnent seulement la tangente à l'origine d'une courbe dont on aurait besoin de connaître l'asymptote à l'infini, et il n'y a aucune relation entre ces deux extrémités de la courbe, séparées généralement par un maximum d'importance variable.

Certains ciments très basiques, magnésiens ou non, qui donnent de très belles résistances pendant les essais, finissent, après plusieurs années, par se désagréger complètement; l'asymptote se confond alors avec l'axe des

coordonnées. Je rapporterai ici quelques exemples empruntés à l'intéressant ouvrage de M. Candlot sur le ciment Portland.

Les nombres du tableau donnent l'effort d'arrachement de briquettes de 16 centimètres carrés de section :

	7 jours.	1 mois.	3 mois.	6 mois.
(1) Ciment à excès de chaux. . . .	350	650	606	506
(2) — incomplètement cuit. . . .	568	742	609	442
(3) Poussières lourdes de ciment. . .	295	440	510	560

On voit que des essais à un mois, les seuls réellement pratiques, donnent une supériorité énorme aux ciments contenant de la chaux libre, qui sont pourtant d'un emploi si dangereux; les poussières lourdes, provenant de la pulvérisation spontanée de ciments peu calcaires, dont la prise est lente, mais qui prennent à la longue une très grande dureté, seraient placées loin derrière.

A mon avis, les essais mécaniques devraient être dirigés dans une voie différente. Il faudrait les conduire de façon à mettre en relief les causes de destruction, en exagérant ces dernières par tous les moyens possibles. L'élévation de la température permet d'obtenir aisément le résultat voulu.

Les résistances obtenues à chaud ne sont certainement pas égales à celles que l'on aurait obtenues à froid par un durcissement plus longtemps prolongé, mais elles paraissent néanmoins classer les divers produits dans un ordre comparable à celui que l'on obtiendrait par des essais prolongés à froid pendant un temps très long. En tous cas, ce mode d'essai des matériaux hydrauliques semble donner des résultats bien plus conformes à la réalité des faits que celui qui est habituellement employé. Je donnerai comme exemple une série d'expériences que j'ai faites comparativement sur des chaux du Teil, les plus réputées de France, sur les chaux de Pa-

vier, réputées comme de bonne qualité, et sur des chaux de seconde marque provenant de diverses usines d'un même département :

	ESSAI A FROID.				ESSAI A 80°	
	1 <sup>re</sup> semaine.	3 <sup>e</sup> semaine.	6 <sup>e</sup> semaine.	Gonfle- ment.	1 <sup>re</sup> semaine. Résis- tance.	1 <sup>re</sup> semaine. Gonfle- ment.
Chaux du Teil . .	kilogr. 12,5	kilogr. 19,5	kilogr. 39	nul	kilogr. 69,0	nul
— de Pavier.	3,6	6,5	17	id.	48,0	id.
1. . .	19,5	33,0	51	faible	30,0	15 p. 100
2. . .	8,0	13,0	33	id.	7,5	30 —
3. . .	16,5	21,0	27	id.	15,0	30 —

Ces nombres expriment l'effort d'écrasement par centimètre carré de petits cylindres de 2 centimètres de hauteur et deux centimètres de diamètre.

On voit par ce tableau que les essais faits à froid donnent une grande supériorité aux chaux de qualité inférieure; cet excès initial de résistance résulte uniquement d'un défaut d'extinction, c'est-à-dire d'une fabrication peu soignée. Les essais à chaud placent, au contraire, immédiatement ces divers produits à leur place respective et manifestent par un gonflement considérable le défaut d'extinction des chaux de seconde qualité.

Pour faire ces essais, on peut laisser les briquettes prendre pendant vingt-quatre heures à la température ordinaire et les immerger dans un bain-marie chauffé à une température voisine de 100 degrés. Il faut éviter de les placer dans une eau en ébullition qui, par son agitation, désagrégerait les briquettes dont la prise n'est pas assez rapide. Le résultat obtenu, dans ce cas, serait plus complexe, étant fonction à la fois de la rapidité de la prise et de la dureté définitive. Des chaux à prise lente, comme celle du Teil, pourraient être désagrégées complète-

ment, tandis que des ciments très médiocres à prise rapide résisteraient à cette agitation. Une durée de cuisson de quarante-huit heures dans l'eau chaude paraît suffire pour obtenir la majeure partie des effets de gonflement et, par conséquent, de désagrégation interne que l'on se propose de mettre en évidence. Au bout de sept jours, la résistance maxima paraît être atteinte.

Ces essais à l'eau chaude pourraient être complétés par une dessiccation à 100 degrés dans l'air sec qui amène la destruction des hydrates peu stables. Par ce mode de comparaison, on remet encore à leur place réelle certains produits dont les essais faits à froid et après une durée de prise trop courte pourraient intervertir le rang. Certains ciments à prise rapide, tels que ceux de Vassy dont l'infériorité vis-à-vis des ciments de Portland ne fait de doute pour personne, peuvent cependant donner parfois des chiffres de rupture supérieurs dans les essais faits à un mois. Si, au contraire, avant de briser les briquettes, on les porte après dessiccation dans de l'air chauffé à 100 degrés, on voit les ciments à prise rapide perdre moitié de leur résistance, tandis que les ciments à prise lente n'éprouvent aucun changement.

*Essai à la résistance après sept jours de prise.*

	Briquettes	
	non chauffées.	chauffées à 100°.
Ciment rapide de Vassy.	630, 650, 750	400, 325, 340
— du Teil . . . . .	480	460, 430
— Portland. . . . .	625	640

Il me semble que de pareils essais combinés avec des mesures de rapidité de la prise, donnée également utile à connaître, permettraient de juger de la valeur d'un ciment avec beaucoup plus d'exactitude que ne le font les procédés d'essai actuels. Mais je dois ajouter immédiatement que mes expériences sur ce sujet ne sont

pas assez nombreuses pour permettre, dès à présent, d'affirmer l'exactitude absolue de ce mode de classification des produits hydrauliques. De nombreuses expériences devraient être encore faites avant qu'on puisse songer à le faire passer dans la pratique.

Il n'existe donc actuellement aucun procédé d'essai méritant une confiance quelconque, le seul moyen de juger de la qualité des matériaux hydrauliques est de s'assurer de l'identité du produit que l'on considère avec un produit similaire ayant la même provenance et employé avec succès depuis de longues années. A ce point de vue particulier, le but des essais doit être seulement d'arriver à cette constatation d'identité; les résultats seront d'autant plus certains que l'on aura établi l'identité d'un plus grand nombre de caractères différents: composition chimique, chaleur de dissolution, densité, résistance, etc., etc. Si l'on veut faire un choix, il faudra s'adresser aux caractères qui permettent d'établir les plus grandes différenciations entre produits similaires, c'est-à-dire à ceux qui sont susceptibles des plus grandes variations et en même temps des mesures les plus précises. Il n'est pas nécessaire, à ce point de vue particulier, de s'adresser à des caractères ayant une relation quelconque avec les qualités nécessaires pour l'emploi du ciment.

## TABLE DES MATIÈRES

	Pages
INTRODUCTION. . . . .	345
PREMIÈRE PARTIE	
PLÂTRE	
<i>Historique</i> . . . . .	346
<i>Cuisson du plâtre</i> . . . . .	347
<i>Prise du plâtre.</i> . . . . .	354
Phénomènes chimiques d'hydratation . . . . .	335
Phénomènes physiques de cristallisation. . . . .	355
Phénomènes mécaniques de durcissement . . . . .	363
DEUXIÈME PARTIE	
CIMENT DE BARYTE	
<i>Étude synthétique des silicates de baryte</i> . . . . .	365
<i>Ciment de baryte.</i> . . . . .	371
TROISIÈME PARTIE	
MORTIERS CALCAIRES	
I. <i>Mortiers aériens</i> . . . . .	373
Cuisson de la chaux . . . . .	374
II. <i>Mortiers hydrauliques.</i> . . . . .	379
Classification. . . . .	379
Historique . . . . .	380
<i>Étude synthétique des sels calcaires.</i> . . . . .	388
Chaux . . . . .	388
Silicates de chaux . . . . .	391
Aluminates de chaux. . . . .	403
Ferrites de chaux. . . . .	408
<i>Étude microchimique des ciments</i> . . . . .	413
Ciments anhydres. . . . .	413
Ciments hydratés. . . . .	421
<i>Fabrication et emploi des ciments</i> . . . . .	426
Composition et cuisson . . . . .	426
Prise et durcissement. . . . .	438
<i>Causes de destruction des mortiers hydrauliques.</i> . . . . .	450
<i>Procédés d'essais.</i> . . . . .	457

## ÉTUDE

SUR LA

## SITUATION ÉCONOMIQUE DE L'INDUSTRIE HOUILLÈRE

DANS LE BASSIN DE LA RUHR

Par M. L. FÈVRE, ingénieur des mines.

Ce mémoire n'a pas la prétention d'exposer en détail toutes les conditions économiques de l'exploitation de la houille dans le bassin de la Ruhr. Son objet est plus limité : j'ai voulu simplement donner une idée de l'état actuel des débouchés ouverts aux producteurs de la région et des efforts tentés par eux pour les maintenir et les accroître. C'est ce dont il est traité dans les deux derniers chapitres. Quant au premier, il sert en quelque sorte d'introduction ; j'y ai résumé les conditions générales de la production et du transport des produits, de leur sortie de la mine jusqu'aux issues du bassin.

Je suis principalement redevable des renseignements contenus dans ce mémoire à M. Jacquot, consul de France à Düsseldorf, dont le rapport (\*) sur l'industrie de la houille dans les provinces du Rhin et de la Westphalie m'a d'ailleurs guidé dans mes recherches, et à M. le docteur Natorp, gérant de la Société « l'Union pour les

(\*) *Bulletin consulaire français* de 1883.

intérêts miniers de l'arrondissement minéralogique de Dortmund », qui a bien voulu mettre à ma disposition les rapports annuels présentés par lui à cette Société.

CHAPITRE I<sup>er</sup>.

## CONDITIONS GÉNÉRALES DE L'EXPLOITATION.

1<sup>o</sup> *Disposition du bassin.* — Le bassin houiller, dit de la Ruhr, situé sur la rive droite du Rhin, à cheval sur la province rhénane et la Westphalie, s'étend sur une longueur d'environ 65 kilomètres de l'est à l'ouest, et une largeur de 35 du nord au sud ; ce qui correspond à une superficie de 2.300 kilomètres carrés. Au point de vue physique, aussi bien qu'au point de vue technique et économique, il se compose de trois zones, occupant toute sa longueur et se succédant du sud au nord. Elles ont respectivement pour axes les deux rivières de la Ruhr et de l'Emscher, qui débouchent dans le Rhin non loin l'une de l'autre, près de Ruhrort, et la région bombée du pays nommée Hellweg, qui forme le faite de séparation des eaux entre leurs bassins.

La zone méridionale comprend la région qui écoule ses eaux dans la Ruhr, et qui s'étend surtout sur sa rive gauche. C'est un pays de collines abruptes et de forêts, alternant avec des prairies et quelques cultures ; les gens de la plaine l'appellent « la Montagne » (*Bergland*), bien que son élévation au-dessus de la vallée ne dépasse pas 300 mètres. Mais les couches de schistes, grès et conglomérats qui constituent son ossature, ont subi des plissements multiples, qui les ont redressées en forme de selles, séparées par les creux correspondants. Ces selles dessinent une série de crêtes parallèles, alignées de l'est à l'ouest, dans une direction perpendiculaire à la pente

naturelle des eaux; car dans son ensemble la surface s'incline du sud au nord, du pays montagneux de Siegen à la plaine basse de l'Allemagne du Nord. Les érosions ont donc pratiqué dans ces crêtes de nombreuses brèches, qui les découpent en mille petits massifs. Grâce à ces effets de dislocation et d'érosion, les couches de houille ont été amenées au jour en une foule de points, s'offrant pour ainsi dire d'elles-mêmes à l'exploitation; celle-ci était d'ailleurs favorisée par la configuration spéciale du terrain, qui permettait l'établissement de nombreuses *Stollen*, cette condition dominante de la vieille *Bergbau* allemande. Le district de la Ruhr fut, en effet, le berceau de l'industrie houillère du pays, et le bassin tout entier en a gardé le nom. Mais aujourd'hui son importance n'est plus que secondaire, les accidents des couches et la qualité inférieure du charbon rendant l'exploitation plus difficile et moins rémunératrice.

Au nord de la vallée de la Ruhr, les coteaux qui bordent sa rive droite conservent ce même caractère d'escarpement abrupt et d'accidentation détaillée, que leur donnent les gorges taillées dans leur épaisseur. Mais celles-ci se terminent rapidement, et l'on arrive bientôt au faite. De l'autre côté, le contraste est complet. Le terrain s'abaisse en une longue déclivité, qui va, par une pente presque insensible, rejoindre le fond de la vallée de l'Emscher. Ce bombement, que l'on appelle *Hellweg* constitue la zone intermédiaire ou de transition de « la Montagne » à la « Plaine » (*Flachland*). Il est formé par le plissement, en forme de selle à versants inégaux, des grès houillers inférieurs. C'est des trois régions la plus fertile et la mieux cultivée; elle réunit d'ailleurs, sur un même alignement, les principales villes de la contrée (Mülheim, Oberhausen, Essen, Wattenscheidt, Steele, Bochum, Langendreer, Dortmund, Unna). La population s'y est condensée dans des villes, des villages, des

cités ouvrières et de nombreuses fermes. Au point de vue technique, l'exploitation a lieu tantôt au moyen de *Stollen*, tantôt au moyen de puits (*Schacht*), selon la position de la mine et son éloignement plus ou moins grand du bord méridional de la zone. Sous ce rapport, elle manifeste donc encore ce caractère de transition, que lui assigne sa configuration physique.

Enfin vient « la Plaine », le pays plat où serpente la paresseuse Emscher, sorte de golfe détaché de la grande plaine de l'Allemagne du Nord, dont il n'est séparé que par une faible élévation de terrain, limite du bassin de la Lippe. Le sous-sol, argileux, est imperméable aux eaux superficielles, qui s'étalent en étangs et en marais, reliés par des ruisseaux trainants; le drainage en a fait, il est vrai, disparaître une bonne partie, et a atténué le mauvais effet hygiénique de ces conditions naturelles. Le terrain houiller disparaît ici sous un recouvrement de marnes crétacées dont l'épaisseur moyenne est de 200 mètres, et s'augmente à mesure qu'on s'avance davantage vers le nord. Aussi fut-on longtemps sans soupçonner par-dessous l'existence de couches productives. On finit cependant par reconnaître qu'à la selle formée par les grès de l'*Hellweg* succédait, caché par ce manteau de crétacé, un vaste fond de bateau, dont la partie supérieure offrait de nombreuses couches de houille d'une extrême régularité d'allure. De nombreuses exploitations se fondèrent de 1850 à 1860; elles se sont développées surtout depuis quinze ans, et tiennent aujourd'hui hautement la tête de l'industrie minière de la contrée. Celle-ci étant une plaine uniforme, il n'y avait pas à songer aux *Stollen*; on a dû recourir à la méthode moderne, au fonçage de grands puits verticaux, allant par le plus court chemin rejoindre le gîte. C'est ainsi que l'antique *Stollenbau*, après s'être alliée, dans la zone de l'*Hellweg*, avec sa rivale (sous le nom de *Gemischter*

*Schacht und Stollenbau*), s'est vue définitivement détrônée par celle-ci, régnant désormais sous le nom de *Tiefbau*. Par suite de ce développement intense de l'industrie dans la zone septentrionale de la région, celle-ci a vu se déplacer son centre de gravité, qui est passé du bassin de la Ruhr dans celui de l'Emscher, où a immigré une nombreuse population. Quant à la zone médiane, celle de l'Hellweg, elle forme en quelque sorte une ligne neutre, un axe autour duquel s'est accomplie cette oscillation; ses villes participent à la nouvelle prospérité comme elles profitaient de l'ancienne; la seule différence est dans le degré; et, à ce point de vue, elles n'ont lieu que de se féliciter du changement accompli, qui de l'ancien petit bassin houiller de la Ruhr a fait un des plus puissants bassins du monde, produisant plus que toute la France, et marchant de pair avec les plus grands bassins anglais.

2° *Production*. — Voici, en effet, les chiffres de la production dans les huit dernières années. Ils se rapportent, il est vrai, à tout l'arrondissement minéralogique (*Oberbergamtsbezirk*) de Dortmund, qui, outre le bassin de la Ruhr, comprend deux petits bassins secondaires, près d'Ibbenbüren et de Minden, plus quelques mines dans le voisinage d'Osnabrück; mais la différence n'est guère que de 200.000 tonnes par an.

*Production de l'arrondissement minéralogique de Dortmund.*

Années.	Quantités extraites.	Quantités vendues.
1879	20.394.396 tonnes.	19.063.400 tonnes.
1880	22.493.204	21.180.000
1881	23.644.755	22.186.000
1882	25.873.332	24.359.000
1883	27.862.956	26.211.000
1884	28.403.258	26.812.000
1885	28.970.568	27.408.000
1886	28.497.293	28.473.000

L'accroissement de la production a donc été continu;

mais il est à remarquer que le taux de cet accroissement a fortement diminué. De 6,5 p. 100 en moyenne pour les quatre premières années, il tombe à 2 p. 100 en 1885, et devient même négatif en 1886, où l'extraction accuse une diminution de 1,8 p. 100 sur celle de l'année précédente, bien que du côté de la vente il subsiste encore un léger progrès. Ceci s'explique par une convention intervenue entre les exploitants, syndiqués dans le but d'éviter la surproduction.

L'importance de ces chiffres ressortira mieux, si on les rapproche de ceux qui concernent l'ensemble de l'Allemagne, la France et l'Angleterre.

Soit pour l'année 1884 :

Bassin de la Ruhr. . . . .	28.403.258 tonnes.
Allemagne. . . . .	57.233.875
France. . . . .	20.024.000
Angleterre. . . . .	163.329.903

A lui seul le bassin de la Ruhr produit donc autant de houille que le reste de l'Allemagne et 42 p. 100 de plus que toute la France.

Si l'on veut se faire une idée de la valeur de cette production, il faut considérer les prix moyens de vente de la tonne sur le carreau de la mine. Tandis qu'en 1873, dans la période de fièvre industrielle, ce prix moyen était de 13<sup>f</sup>,625, il était tombé, en 1879, à 5<sup>f</sup>,20, et il a très peu varié dans le cours des sept années suivantes, où il s'est presque constamment tenu à 5<sup>f</sup>,725. Ces chiffres comparés à celui de 1873 accusent donc une baisse de 58 p. 100, tandis que, dans le même espace de temps, la baisse générale pour toute l'Allemagne a été seulement de 52,93 p. 100. Pour l'industrie des fontes, si étroitement liée à celle des charbons, elle n'a pas été moindre de 56,95 p. 100.

On conçoit facilement que dans ces conditions, les résultats financiers des exploitations se soient montrés,

dans ces dernières années, de plus en plus défavorables. En 1881 déjà, la chambre de commerce de Dortmund déclarait que sur les 36 houillères de son ressort, 9 seulement avaient distribué des parts de bénéfices ou des dividendes, et encore ne s'élevaient-ils pas à 5 p. 100; 9 avaient dû faire des appels de fonds aux sociétaires, et 9 autres contracter des emprunts. Il en était de même dans le ressort de la chambre de Bochum. La situation s'était un peu améliorée l'année suivante; mais cela ne dura pas. Le nombre des mines en état de distribuer des bénéfices est allé depuis en se restreignant, tandis que les emprunts et les appels de fonds n'ont fait qu'augmenter; et leur importance constitue aujourd'hui, pour beaucoup d'entre elles, une charge accablante. Ces difficultés ont d'ailleurs en partie leur source dans la nature des concessions, qui sont, en général, d'étendue fort réduite; le champ productif est morcelé entre 200 sociétés environ. Ce sont surtout des *Gewerkschaften*, c'est-à-dire des sociétés anonymes à capital non limité. 58 d'entre elles, pour l'exercice 1885-1886, ne réunissaient une extraction totale que de 974.000 tonnes, soit moins de 17.000 tonnes pour chacune. Non seulement le bénéfice était nul, mais elles durent verser de nouveaux fonds, montant à 6.288.750 francs, ou 0<sup>f</sup>,65 par tonne. Les sociétés par action, au nombre de 21, sont dans un état plus florissant. Leur capital réuni est d'environ 196.250.000 francs; elles ont obtenu, en 1885, un produit net de 5.551.212<sup>f</sup>,50; ce qui correspond à un dividende moyen de 2,81 p. 100, ou de 0<sup>f</sup>,6625 par tonne. Quoi qu'il en soit, la multiplicité des compagnies a pour effet d'augmenter dans de fortes proportions les frais généraux et certains frais spéciaux. L'attention des exploitants s'est récemment portée sur cette situation. Nous verrons plus loin les efforts qu'ils font pour y remédier.

3° *Main-d'œuvre*. — Un autre élément, dont l'influence sur le prix de revient est capitale, est la main-d'œuvre. Il est intéressant de comparer les résultats constatés à cet égard dans le bassin de la Ruhr et en France. La comparaison est rendue plus facile par ce fait que le nombre des ouvriers mineurs de la Ruhr est sensiblement égal à celui des mineurs de tous les charbonnages français réunis (109.000 en France, en 1884, contre 102.000 dans le bassin allemand). Ceci admis, le tableau comparatif suivant résume les éléments principaux de la situation :

	France.	Ruhr.	
	1884	1884	1885
N° 1. Nombre de journées de travail . . .	30.656.000	30.756.506	30.797.810
2. Totalité des salaires. . . . .	117.358.000 <sup>f</sup>	103.014.424 <sup>f</sup>	102.543.036 <sup>f</sup>
3. Nombre de journées de travail par ouvrier. . .	283	300	302
intérieur. . . . .	273		
4. Salaire moyen annuel. . . . .	1.072 <sup>f</sup>	1.005 <sup>f</sup> (*)	1.004 <sup>f</sup> ,15
5. Salaire moyen par journée de travail . . . . .	3 <sup>f</sup> ,83	3 <sup>f</sup> ,35	3 <sup>f</sup> ,325
6. Production annuelle par ouvrier. . . . .	183 <sup>t</sup>	280 <sup>t</sup>	284 <sup>t</sup>
7. Salaire total par tonne de combustible produit . . . . .	5 <sup>f</sup> ,86	3 <sup>f</sup> ,63	3 <sup>f</sup> ,54
8. Prix de vente sur le carreau de la mine. . . . .	12 <sup>f</sup> ,33	5 <sup>f</sup> ,725	5 <sup>f</sup> ,84

(\*) En 1879, le salaire moyen annuel se montait seulement à 828<sup>f</sup>,75, dans le bassin de la Ruhr. Il a subi une élévation constante jusqu'en 1883, où il a atteint le maximum de 1.008<sup>f</sup>,75. Il a légèrement baissé dans ces dernières années.

Le salaire indiqué représente le salaire net, celui qui est payé à l'ouvrier, toutes retenues effectuées, soit pour les caisses de secours, soit pour outils, poudre et huile.

Si l'on distingue différentes catégories d'ouvriers, on obtient pour la Ruhr, en 1885, les résultats suivants :

	Salaire net annuel.	Salaire par poste.
Piqueurs (à la veine et à la roche). . . . .	918 <sup>mark</sup> = 1.147 <sup>f</sup> ,50	3 <sup>mark</sup> ,04 = 3 <sup>f</sup> ,80
Autres ouvriers du fond. . . . .	670 <sup>mark</sup> = 837 <sup>f</sup> ,50	2.22 <sup>mark</sup> = 2 <sup>f</sup> ,775
Ouvriers du jour au-dessus de seize ans. . . . .	722 <sup>mark</sup> = 902 <sup>f</sup> ,50	2 <sup>mark</sup> ,39 = 3 <sup>f</sup> ,00
— au-dessous de seize ans. . . . .	320 <sup>mark</sup> = 400 <sup>f</sup> ,00	1 <sup>mark</sup> ,06 = 1 <sup>f</sup> ,352

Ces moyennes sont d'ailleurs susceptibles de varier

suivant les districts. C'est ainsi qu'au centre de la zone de l'Emscher, dans la partie la plus florissante du bassin, j'ai constaté pour les piqueurs un salaire de 5 francs par poste. Dans le bassin proprement dit de la Ruhr, où l'industrie est allée sans cesse en déclinant, il s'abaisse, au contraire, à 3<sup>f</sup>,125.

En somme, dans le tableau qui précède, les éléments correspondants n'offrent entre les deux pays que des différences relativement faibles, sauf pour les n<sup>os</sup> 6, 7 et 8, qui mettent en évidence les grands avantages du bassin de la Ruhr, au point de vue du rendement et du prix de revient.

Tandis qu'en France, en 1884, la production annuelle par ouvrier était de 183 tonnes, et atteignait un maximum de 200 tonnes à Commentry et dans le bassin du Nord et du Pas-de-Calais, dans le district de la Ruhr on obtenait par ouvrier 280 tonnes, soit 80 tonnes ou 40 p. 100 en plus que dans nos bassins les plus privilégiés. Or, ceci suffit presque à combler l'intervalle de 2<sup>f</sup>,23, que présentent les chiffres du n<sup>o</sup> 7, relatif au salaire total par tonne de combustible produit. Si, en effet, F représente le salaire moyen annuel d'un ouvrier français, A celui d'un ouvrier allemand, les prix de revient d'une tonne seront, de par la main-d'œuvre, respectivement grevés des quantités suivantes :

$$\frac{F}{183} \text{ en France,}$$

$$\frac{A}{280} \text{ dans la Ruhr.}$$

$$\text{Le rapport sera donc } \frac{F}{A} \times \frac{280}{183}.$$

Pour dégager l'influence du rendement seul, supposons  $F = A$ , c'est-à-dire l'égalité des salaires. Le rapport se réduit à  $\frac{280}{183}$ . Si nous augmentons dans cette pro-

portion le chiffre de 3<sup>f</sup>,63 relatif à la Ruhr, nous obtenons 5<sup>f</sup>,55, c'est-à-dire à peu près le chiffre français de 5<sup>f</sup>,86 ; la différence n'est que de 0<sup>f</sup>,31, soit moins de 14 p. 100 de l'intervalle total. C'est cette différence seule qui est due à l'inégalité des salaires. Le reste, soit 86 p. 100, provient uniquement du rendement supérieur de l'ouvrier westphalien, dont on ne peut guère chercher la cause que dans les conditions naturelles du gisement ; à ce point de vue, en effet, les couches de la Ruhr, situées à une faible profondeur au-dessous de la surface, peu inclinées, peu accidentées, rarement dérangées par des failles ou des plissements, offrent des avantages exceptionnels. L'influence de ces circonstances naturelles se fait d'ailleurs sentir sur tous les autres frais spéciaux, comme sur la main-d'œuvre, et même encore plus, semble-t-il : il est remarquable, en effet, que le prix de vente d'une tonne de houille s'élève, en France, à plus de deux fois son coût en main-d'œuvre, et que, dans la Ruhr, il ne le surpasse guère que de 50 p. 100. Tandis que la main-d'œuvre fait, en Westphalie, presque les  $\frac{2}{3}$  de la dépense, elle n'en est pas la moitié en France, soit plus exactement 63,4 p. 100 contre 47,5 p. 100. Le fait n'en est toutefois que plus probant, et montre combien l'on s'égarerait en attribuant à la cherté de la main-d'œuvre, en France, la différence que l'on constate dans les prix de vente, différence qu'on doit, dans l'espèce du moins, attribuer à de tout autres causes.

4<sup>o</sup> *Transport des produits.* — C'est simplement du transport de la houille à l'intérieur du bassin, vers les issues qu'offre celui-ci, qu'il est question dans ce paragraphe. Quant aux grandes lignes par lesquelles des masses notables de combustible atteignent soit des places de commerce importantes à l'intérieur du pays, soit des débouchés sur le marché extérieur, on en parlera dans le

chapitre suivant. Il s'agit seulement ici, selon l'expression de M. Jacquot, de « l'organisme de circulation locale. »

Autrefois, quand l'exploitation était restreinte au bassin géographique de la Ruhr, cette rivière formait la voie naturelle d'écoulement des produits vers le Rhin. Mais aujourd'hui, sauf les cas de production et de consommation à proximité immédiate de son cours, les charbons, au sortir de la mine, prennent uniquement le chemin de fer pour gagner les ports d'embarquement sur le Rhin; et encore la plus grande masse rayonne-t-elle directement, par voie ferrée, vers les centres de consommation. C'est que d'abord le fleuve ne mène pas partout; puis les transbordements nécessaires de wagon à bateau et inversement détériorent le combustible, et prennent du temps; or on est souvent pressé d'arriver, pour remplir les stipulations des contrats; d'autre part, une production si active sur un territoire aussi restreint exige une grande rapidité dans les expéditions, afin d'éviter les encombrements.

En effet, dit M. Jacquot, « 25 millions de tonnes amenées à la surface des mines exigent, pour s'en éloigner, 2 millions et demi de wagons de 10 tonnes; et, comme il faut que les wagons reviennent vides ou avec d'autres marchandises, cela donne un mouvement double, c'est-à-dire 5 millions de wagons dans l'année. Cela fait, en moyenne, 13.700 wagons à déplacer chaque jour, soit à raison de 40 wagons par train, 340 trains en moyenne répartis dans chaque durée de 24 heures, et cela sans compter le mouvement des voyageurs, ni les wagons nécessaires pour emporter les produits des usines et manufactures, très nombreuses dans la région. Et c'est sur un territoire de 60 kilomètres de long, de l'est à l'ouest, sur 30 de large, du nord au sud, que s'accomplit cet effort de circulation. »

En 1886, la masse totale (houille et coke) transportée

par chemin de fer a été de 23.867.560 tonnes, en diminution de 1,7 p. 100 sur celle de l'année précédente. Mais celle du premier semestre de 1887 a présenté, au contraire, une augmentation de 4,8 p. 100 sur celui de 1886. Le transport journalier, dans ce semestre de 1887, a été, en moyenne, de 81.895 tonnes, et s'est élevé, dans la période du 1<sup>er</sup> au 15 janvier, à 84.430 tonnes.

Ce n'est d'ailleurs que depuis quelques années que les chemins de fer ont pu suffire à leur tâche d'une façon satisfaisante. Avant 1883, les exploitants se plaignaient de l'insuffisance du matériel roulant, et des encombrements dans les gares trop étroites. Le réseau des voies de la contrée était alors en possession de trois compagnies distinctes (*Cöln-Mindener*, *Rheinische* et *Bergisch-Märkische Eisenbahn*), dont les lignes étaient enchevêtrées l'une dans l'autre, et qui se faisaient réciproquement concurrence; mais cette division des efforts n'entraînait que de mauvais résultats, par suite du défaut d'ordre et d'unité de vues. L'État a effectué le rachat de ces trois réseaux, a considérablement augmenté le matériel roulant, et a entrepris des travaux d'élargissement des gares, avec l'avis des cercles industriels intéressés, le tout à la satisfaction générale de ceux-ci, unanimes à reconnaître la régularité actuelle de la circulation. Tous les ans a lieu une conférence entre les représentants de l'administration des chemins de fer, de l'administration des mines, et des exploitants des districts de la Ruhr, d'Aix-la-Chapelle et de la Sarre, où l'on s'entend sur le transport à prévoir pour l'année suivante, et le nombre des wagons et locomotives à mettre en conséquence à la disposition du public.

Quant aux houilles qui viennent chercher la voie du Rhin, soit pour descendre en Hollande, soit pour remonter vers le cours moyen du fleuve, elles affluent vers les trois

ports voisins de Ruhrort, de Duisburg et de Hochfeld. On a embarqué en 1886 :

	Houille et coke.
A Duisburg. . . . .	947.434 tonnes
A Ruhrort . . . . .	2.004.302
A Hochfeld. . . . .	657.860
Total. . . . .	3.609.596 tonnes.

Ces masses se partagent comme il suit :

	De Duisburg. tonnes	De Ruhrort. tonnes
Allant vers la Hollande. . . . .	366.338	1.130.599
— la Belgique. . . . .	14.968	240.219
— le cours moyen du Rhin. . . . .	566.170	633.483

Quant à la Ruhr, c'est tout au plus si elle transporte 30.000 tonnes, dont une partie est déchargée en route pour les besoins des usines riveraines.

## CHAPITRE II.

### MARCHÉS ET DÉBOUCHÉS.

1° *Marché de Berlin.* — Le marché de Berlin est de médiocre importance pour les producteurs de la Ruhr. Les houilles de Silésie sont maîtresses de la place, et ne laissent qu'un champ fort limité à leurs concurrentes westphaliennes et anglaises, comme le montrent les chiffres relatifs à 1886 :

	Consommation de Berlin. tonnes	Transit. tonnes
Charbon anglais. . . . .	116.277	17.684
— de la Ruhr. . . . .	71.601	10.631
— de la Saxe. . . . .	7.193	2.250
— de la Silésie. . . . .	995.494	93.065
Lignite de Bohême. . . . .	156.076	49.238
— d'Allemagne. . . . .	378.129	21.462
Total. . . . .	1.724.775	194.630

La situation était sensiblement la même les années précédentes. L'équilibre est cependant quelque peu instable, et ne dépend guère que d'un tarif de chemin de fer. Des houilles de la Ruhr qui vont à Berlin, une partie y arrive, en effet, par la voie de Hambourg, où elles sont amenées par chemin de fer depuis la mine, pour de là remonter l'Elbe et ses affluents jusqu'à la capitale. Or, le transport d'une tonne de la Ruhr à Hambourg par voie ferrée coûte 7<sup>f</sup>,50, prix élevé qui permet au charbon anglais de dominer sur cette place. Les exploitants ont maintes fois réclamé l'abaissement du tarif, pour leur permettre de lutter contre les Anglais. L'État prussien s'y est jusqu'ici refusé, dans la crainte que les houilles westphaliennes, arrivant à Hambourg à bon marché, n'en profitent pour venir disputer à celles de Silésie le marché de la capitale et troubler l'équilibre économique actuellement établi.

2° *Ports de la mer du Nord.* — Chaque année les Anglais importent en Allemagne, par les côtes de la mer du Nord, environ 1.350.000 tonnes de houille, dont les trois quarts vont à Hambourg. C'est que le fret de la tonne, des ports du bassin de Newcastle à Hambourg, est inférieur au prix de transport (7<sup>f</sup>,50) de la tonne venant de la Ruhr par chemin de fer. La différence est plus ou moins grande, suivant les variations du fret maritime ; il se tient, en général, entre 5<sup>f</sup>,625 et 6<sup>f</sup>,25 ; ce qui assure un écart minimum de 1<sup>f</sup>,25, au désavantage des charbons westphaliens. Malgré ces conditions défavorables, les exploitants de la Ruhr ont réussi à prendre pied sur la place de Hambourg, grâce à la clientèle de la marine de l'État et des compagnies de paquebots, grâce aussi au prix de grands efforts et de sacrifices opérés à propos. En 1875, ils n'y expédiaient que 60.000 tonnes ; aujourd'hui, c'est plus de 500.000 tonnes. Le tableau

suisant donne la mesure des progrès qu'ils ont su faire :

*Entrées à Hambourg.*

	Houille d'Angleterre.	Houille de la Ruhr.
1880	1.025.550 tonnes.	338.910 tonnes.
1881	1.001.118	452.650
1882	1.013.334	475.890
1883	1.050.000	513.420
1884	1.025.500	548.730
1885	1.138.700	536.510
1886	1.238.000	518.930

Pour la première fois, en 1885, l'importation anglaise a subi un accroissement notable, et l'arrivage de la Ruhr une diminution qui s'est d'ailleurs continuée en 1886. La cause en est à chercher dans l'abaissement du prix de vente du charbon anglais, et surtout dans la diminution du fret maritime. Celui-ci était, en effet, compté, à la fin de 1885, entre la côte orientale de l'Angleterre et les ports de l'Elbe, à raison de 5 francs pour l'aller (houille) et de 2<sup>f</sup>,50 pour le retour (articles agricoles).

Dans ces conditions, les exploitants de la Ruhr, qui avaient déjà fait aux consommateurs toutes les concessions possibles, n'avaient plus qu'à se retirer et à abandonner la place aux Anglais, ou à tenter d'obtenir une réduction du tarif des chemins de fer. La Société « l'Union pour les intérêts miniers de l'arrondissement de Dortmund » (*Verein für die bergbaulichen Interessen im Oberbergamtsbezirk Dortmund*) adressa une pétition au ministre des travaux publics et au prince de Bismarck, pour appeler leur attention sur la gravité de la situation et solliciter une diminution de tarif entre le bassin minier de Westphalie et les ports allemands de la mer du Nord.

La position devenait de plus en plus difficile. Le bruit se répandait que la compagnie de bateaux à vapeur du

*Norddeutscher Lloyd* à Brème, qui, depuis vingt-cinq ans, ne consommait que du charbon de la Ruhr, songeait à le remplacer par de la houille anglaise. Même danger menaçait du côté des compagnies de Hambourg.

Heureusement pour les industriels, l'autorité supérieure avait prêté l'oreille à leurs doléances. Et le 9 avril 1886 se réunit à Hambourg une conférence, où étaient représentés les directions des chemins de fer, les chambres de commerce de Hambourg et Brème, les compagnies de navigation, le gros commerce de charbon anglais, les exploitants de Westphalie, l'administration des mines et « l'Union » en question. Il résulta de la discussion que les navires à vapeur étaient les principaux clients des producteurs de la Ruhr; mais que, pour l'usage domestique et les usines, les Anglais fournissaient à peu près tout le stock. Or, depuis 1882, le tarif de 7<sup>f</sup>,50 par tonne, pour le transport du bassin minier à Hambourg, avait été réduit à 6<sup>f</sup>,875 pour les charbons destinés à l'exportation maritime; mais n'étaient pas considérés comme rentrant dans cette catégorie ceux embarqués pour la consommation des navires. L'extension du bénéfice de cette clause à ces derniers fut la concession que l'administration des chemins de fer déclara pouvoir faire; elle renonça aussi à un droit de déchargement de 0<sup>f</sup>,25; ce qui portait, en somme, la réduction de tarif à 0<sup>f</sup>,875 et ramenait à 0<sup>f</sup>,02 le prix de la tonne kilométrique. Les compagnies de navigation, moyennant un égal abaissement du prix de vente, conservèrent leur clientèle à leurs compatriotes, et ceux-ci purent maintenir leur situation sur la place de Hambourg; quant à gagner du terrain, ils n'y songent pas, aussi longtemps du moins que le fret maritime restera aussi bas.

Immédiatement après cette conférence, en eut lieu une toute semblable, à Brème. Le résultat en fut encore une diminution du tarif, de 0<sup>f</sup>,375 par tonne (5<sup>f</sup>,875 au lieu de

6<sup>f</sup>,25). En même temps intervenait un contrat entre le Norddeutscher Lloyd et certaines sociétés houillères. Celles-ci s'engageaient à réduire de 0<sup>f</sup>,125 le prix de vente de la tonne pour la compagnie du Lloyd, sans compter naturellement les 0<sup>f</sup>,375 précités; la première de son côté doit s'approvisionner du charbon nécessaire à ses chaudières uniquement auprès desdites sociétés.

L'industrie westphalienne, après avoir vu un instant ses positions dans les ports de la mer du Nord tout à fait compromises, a donc réussi à les garder. Elle attend des temps meilleurs pour poursuivre des avantages si chèrement achetés.

3<sup>o</sup> *Hollande*. — La concurrence entre les producteurs anglais et westphaliens s'exerce de même, mais cette fois avec des avantages plus marqués pour les seconds, sur le marché hollandais. En cinq ans, de 1881 à 1886, l'importation des houilles allemandes (bassins de la Ruhr et d'Aix-la-Chapelle) est montée de moins de 2.500.000 tonnes à plus de 3.000.000. Ce progrès s'explique tout d'abord par le voisinage géographique du bassin de la Ruhr et des places hollandaises; Hambourg est d'un bon tiers plus éloigné du centre du bassin que ne le sont Rotterdam et Amsterdam. Aussi, le prix de transport d'une tonne par voie ferrée se réduit-il, en passant de la première de ces villes aux deux autres, de 7<sup>f</sup>,50 à 6<sup>f</sup>,125. Il y a aussi une autre raison, c'est la concurrence que fait au chemin de fer la navigation sur le Rhin. Celle-ci fait payer, pour envoyer 1 tonne de houille à Rotterdam, seulement 4<sup>f</sup>,375 en moyenne, tous frais compris, et à Amsterdam 5<sup>f</sup>,56. Aussi la plus grande partie du trafic prend-elle la voie du fleuve; en 1886, sur 2.962.328 tonnes de charbon entrées d'Allemagne en Hollande, le Rhin en a transporté 1.496.937, et encore est-ce seulement pour la Ruhr; il

est bien probable que, dans la part qui revient au bassin d'Aix-la-Chapelle dans ce chiffre de 2.962.328 tonnes, une certaine masse a aussi gagné la Hollande soit par le Rhin, soit par la Meuse.

Cette concurrence du fleuve a engagé les chemins de fer à faire de plus grandes concessions. Ils ont établi un tarif spécial, plus bas que le tarif général, sous la condition que les envois soient de 250 tonnes au minimum jusqu'à 400, dont 75 p. 100 à destination d'Utrecht et des stations au delà; le transport a lieu par trains extraordinaires, dont il part aujourd'hui 80 environ par semaine. Le tarif est le suivant, pour 10.000 kilogrammes de houille :

1 train extra par semaine. . . . .	61 <sup>f</sup> ,25
2 trains — . . . . .	60,00
3 — — . . . . .	58,75
4 — — . . . . .	57,50
5 — — . . . . .	56,25
6 — et plus — . . . . .	55,00

Le prix de transport d'une tonne peut donc s'abaisser à 5<sup>f</sup>,50.

Pour les envois adressés aux villes frontières de Hollande, et spécialement celles des provinces septentrionales, les chemins de fer allemands ont encore récemment consenti à des réductions de tarif, dans le but de permettre aux producteurs de la Ruhr de lutter plus avantageusement contre les Anglais. Ils doivent également accorder le bénéfice de la clause relative à l'exportation maritime (diminution de 0<sup>f</sup>,625 par tonne) aux charbons dirigés sur les ports de l'Ems (Emden, Leer, Papenburg), pour de là être importés en Hollande par navigation sur les canaux.

Il est à remarquer qu'une partie des houilles importées en Hollande est destinée à la réimportation en Belgique.

La proportion en est indiquée ci-après :

*Importation allemande en Hollande.*

	En houille.		En coke.	
	1886	1885	1886	1885
Consommation en Hollande. } 2.962.328 t.	2.947.256 t.	88.247 t.	60.596 t.	
Transit pour la Belgique. . . } 262.187	391.409	2.626	902	
Total. . .	3.224.515 t.	3.338.665 t.	90.773 t.	61.498 t.

4° *Belgique.* — On pourrait croire, vu la situation troublée de la Belgique dans ces dernières années et les difficultés nouvelles qui de ce côté ont entravé l'industrie minière, que les exploitants de la Ruhr en ont profité, pour y élargir leurs débouchés et gagner quelques positions de plus sur les producteurs du pays. C'est le contraire qui est arrivé, comme en témoigne le tableau suivant, relatif à l'importation et à l'exportation des charbons pour la Belgique en 1885 et 1886 :

*Importation.*

	En houille.		En coke.	
	1886	1885	1886	1885
D'Allemagne . . .	230.755 t.	356.754 t.	11.371 t.	11.926 t.
Des Pays-Bas. . .	262.187	391.409	2.526	902
D'Angleterre. . .	262.131	272.372	1.149	3.615
De France . . . .	150.265	110.502	4.572	4.837
D'autres pays. . .	230	21	»	»
Total. . . . .	905.568	1.431.058	19.618	21.280

*Exportation.*

	En houille.		En coke.	
	1886	1885	1886	1885
En France. . . . .	3.524.891 t.	3.660.852 t.	672.942 t.	691.723 t.
En Hollande. . . .	133.102	117.572	»	»
En Luxembourg. . .	»	»	134.510	81.163
Autres pays. . . .	218.407	179.278	21.959	6.529
Total. . . . .	3.876.400	3.957.702	829.411	779.704

L'importation des Pays-Bas provient uniquement du transit de charbons allemands. Il faut donc l'ajouter à l'importation directe d'Allemagne en Belgique, c'est-à-dire additionner les deux premières lignes du tableau précédent, pour se rendre compte de l'importance décroissante du débouché ouvert dans ce pays aux houilles allemandes. On obtient en effet, pour cette importation totale, les nombres suivants :

1884. . . . .	846.702 tonnes.
1885. . . . .	748.163
1886. . . . .	492.942

Il y a donc eu, d'une année à l'autre, une diminution de 255.221 tonnes, soit plus de 34 p. 100.

Ce mouvement si accentué de recul est dû à l'application de nouveaux tarifs intérieurs, entrés en vigueur en Belgique, à partir du 19 avril 1886. Ces tarifs consacrent des réductions très notables, qui non seulement favorisent l'industrie nationale, mais atteignent aussi directement l'importation du dehors ; elles sont, en effet, d'autant plus fortes dans une direction donnée que l'action étrangère s'y était fait sentir davantage. C'est ainsi qu'elles se montent à 1 franc par tonne, quand la place destinataire recevait jusque-là de l'étranger 20 à 50 p. 100 de sa consommation, et à 1',25, quand cette proportion dépassait 50 p. 100. Le prix de la tonne kilométrique descend, pour des envois importants, à 1<sup>cent</sup>,9 et parfois même à 1 centime. Un autre tarif spécial, appliqué depuis le 21 septembre de la même année, favorise également le transport, vers les ports nationaux, des charbons belges destinés à l'exportation maritime. Pour des envois d'au moins 200 tonnes, le coût de la tonne kilométrique est de 1<sup>cent</sup>,5 jusqu'à 100 kilomètres, et de 1 centime au delà de 100 kilomètres, avec un droit fixe de 0',50 par tonne. Aussi ces nouveaux tarifs sont-ils regardés par les Allemands comme équivalents à une taxe prohibitive.

Ils ont essayé d'obtenir de leurs chemins de fer des mesures analogues ; et ceux-ci ont en effet consenti à une réduction de 5 francs par 10 tonnes pour les envois dirigés vers quelques points de la frontière belge. Mais ce que réclament surtout les industriels, c'est le creusement du canal du Rhin à la Meuse. La voie navigable actuellement suivie pour aller d'Allemagne à Anvers et au delà dans le réseau des canaux belges est plus longue de 150 kilomètres que le chemin direct qu'offrirait ce canal.

5° *Luxembourg et Lorraine.* — Le débouché des cokes de la Ruhr dans le district métallurgique du Luxembourg et de la Lorraine (allemande et française) s'est également restreint en 1886. Voici en effet le montant des quantités livrées par les producteurs westphaliens dans les deux dernières années :

*Importation des cokes de la Ruhr.*

	1886	1885	Diminution	
			totale.	en p. 100.
En Luxembourg . . . .	235.000 t.	373.000 t.	118.000 t.	31,7
En Lorraine allemande.	280.000	362.000	82.000	22,7
En — française..	112.000	147.000	35,000	23,8
Total. . . . .	647.000 t.	882.000 t.	235.000 t.	26,6

Pour la région de Longwy, la diminution a été de plus de 50 p. 100. D'une façon générale d'ailleurs, l'importation des charbons allemands en France a notablement décreu dans ces deux mêmes années, soit de 250.000 tonnes, ou 20,33 p. 100, pour la houille, et de 140.000 tonnes, ou 33,33 p. 100, pour le coke.

La cause de cette diminution doit d'abord être cherchée dans la stagnation de l'industrie métallurgique. Dans le district de Nancy, sur 19 hauts fourneaux, 9 ont été éteints depuis 1883 ; même sort est arrivé à 12 sur 28 dans celui de Longwy. Puis les compagnies de chemins de fer,

soit en Belgique (comme on l'a vu plus haut), soit en France, ont abaissé leurs tarifs ; ce qui a permis aux industriels de ces deux pays de regagner du terrain. C'est ainsi que les envois de houille et coke du Nord vers l'Est de la France paient, outre un droit fixe d'expédition :

*Direction de Nancy.*

Envois d'au moins 100 tonnes	pour toute distance . .	2 <sup>e</sup> ,0 la tonne kilométrique
— — 10 —	{ jusqu'à 50 kilom. . . . .	2,0 —
	{ de 50 à 400 — . . . . .	2,5 —
	{ au delà de 400 — . . . . .	4,0 —

*Direction de Longwy.*

Envois d'au moins 100 tonnes	{ Coke . . . . .	2 <sup>e</sup> ,0 la tonne kilométrique
	{ Houille . . . . .	3,0 —

Les nouveaux tarifs sont, en un mot, plus bas que les anciens de 25 à 50 p. 100. Leur effet a été immédiat ; les expéditions des bassins du Nord et du Pas-de-Calais vers l'Est de la France ont rapidement progressé, comme le montrent les chiffres suivants :

	1886			1885			Augmentation	
	Houille.	Coke.	Ensemble.	Houille.	Coke.	Ensemble.	totale.	p. 100.
1 <sup>er</sup> semestre . .	17.093 t.	19.060 t.	36.153 t.	5.244 t.	» t.	5.244 t.	30.909 t.	0,580
2 <sup>e</sup> — . .	51.076	35.845	86.861	7.826	30	7.856	79.005	1,005
Total. .	68.169 t.	54.845 t.	123.014 t.	13.070 t.	30 t.	13.100 t.	109.914 t.	0,839

Les recettes des chemins de fer français sont montées de ce chef de 120.000 francs, en 1885, à 900.000, en 1886, soit 780.000 francs, ou 650 p. 100 en plus.

Les industriels de la Ruhr ont réclamé, de leur côté, des réductions de tarif aux chemins de fer allemands. Deux conférences, tenues à cet effet aux mois de mai et décembre 1886, n'ont pas eu de résultat. C'est qu'ils ont à lutter contre des réclamations adverses, opposées soit par le bassin concurrent de la Sarre, soit par l'industrie métallurgique de la région rhénane. Celle-ci demande, d'un côté, qu'on la fasse bénéficier de cet abaissement

du tarif, autrement dit, qu'on généralise la mesure; ce à quoi l'administration ne peut consentir; d'autre part, elle ne tient pas à voir l'industrie française acheter son combustible à trop bon marché. Le prix de la tonne de coke, livrable à Cologne, était en effet tombé, à la fin de l'année dernière, à 6<sup>f</sup>,25; et les fabricants déclaraient pouvoir continuer à le fournir à ce prix aux usines lorraines, si on leur accordait pour le transport une réduction de tarif de 3<sup>f</sup>,125.

6° *Italie.* — L'ouverture du tunnel du Saint-Gothard n'a pas été le signal, comme on pourrait le croire, d'une invasion de charbon allemand dans la Haute-Italie. De ce côté encore, il ne peut lutter avec efficacité contre les houilles anglaises, qui arrivent par la voie de Gênes, d'où elles se répandent dans tout le bassin du Pô. La valeur si basse du fret maritime produit ce résultat, en même temps que les distances peu considérables, qui séparent Gênes des principaux marchés de la Haute-Italie. C'est ainsi qu'à Milan, il y a dans le prix de vente de la tonne, entre les charbons anglais et allemands, une différence de 3 à 4 francs, au désavantage de ces derniers.

Voici, du reste, les chiffres comparés de l'importation totale (houille et coke) en Italie, et de l'importation allemande :

	Importation totale.	Importation allemande.		
1883	2.351.969 t.	57.215 t.	ou 2,4 p.	100 de la première.
1884	2.605.684	70.004	2,6	—
1885	2.957.657	67.903	2,3	—
1886	»	57,450	»	—

La seconde, comme on le voit, a même subi un recul notable à partir de 1885, recul qui peut être attribué à la diminution du fret, en même temps qu'à de nouveaux tarifs (tarifs par zones), appliqués depuis le milieu de 1885

par les chemins de fer italiens, et qui se trouvent défavorables aux Allemands.

Ce recul a également affecté, en 1886, les envois du bassin de la Ruhr, qui jusqu'alors s'étaient maintenus en progrès. Voici cette progression :

1882	4.310 tonnes.
1883	10.610
1884	22.060
1885	36.140
1886	29.000

Pour que les charbons allemands pussent disputer le marché de Milan aux Anglais, il faudrait donc des tarifs moins élevés qu'aujourd'hui. L'administration allemande a déjà accordé des réductions très notables, et consentirait encore à de nouvelles, mais à la condition que les chemins de fer suisses en fassent autant de leur côté. Plusieurs fois déjà des négociations ont été entreprises à ce sujet, mais toujours sans résultat, les représentants des chemins de fer suisses s'étant jusqu'ici refusés aux abaissements de tarifs demandés.

7° *Résumé.* — Le tableau ci-dessous résume l'ensemble des exportations du bassin minier de la Ruhr en 1885. Pour la Hollande et la Belgique, on a dû considérer en bloc les résultats relatifs aux trois bassins de la région du Rhin (Aix-la-Chapelle, Ruhr et Sarre).

#### I. *Marchés intérieurs.*

Westphalie (en dehors du bassin de la Ruhr)	} 2.032.646 tonnes
Thuringe et Saxe	
Brandebourg	1.106.164
Berlin	75.039
Silésie	1.280
Posnanie	110
<i>A reporter.</i>	3.267.034

<i>Report.</i> . . . . .	3.267.034 tonnes
Prusse (province de) . . . . .	150
Poméranie. . . . .	950
Ports de la Baltique . . . . .	66.425
Schleswig-Holstein . . . . .	139.722
Mecklembourg . . . . .	20.970
Hambourg. . . . .	536.510
Ports du Weser . . . . .	371.377
Ports de l'Ems . . . . .	52.597
Hanovre, Brunswick et Oldenbourg. . . . .	1.817.650
Hesse . . . . .	1.293.650
Province rhénane. . . . .	3.435.830
Palatinat. . . . .	21.316
District de la Sarre. . . . .	6.550
Lorraine allemande . . . . .	862.000
Alsace. . . . .	24.340
Ludwigshafen et Mannheim. . . . .	18.590
Bade. . . . .	76.735
Württemberg . . . . .	77.061
Bavière . . . . .	204.029
Divers (*). . . . .	1.850.000
Total. . . . .	13.642.557 tonnes

## II. Débouchés extérieurs.

Danemark. . . . .	2.500 tonnes
Hollande. . . . .	3.007.852
Belgique. . . . .	760.991
Luxembourg . . . . .	425.860
France. . . . .	258.680
Suisse. . . . .	41.116
Italie. . . . .	36.140
Autriche-Hongrie. . . . .	3.950
Total. . . . .	4.537.089 tonnes
Total des exportations. . . . .	18.179.646 tonnes

(\*) Ces 1.850.000 tonnes représentent les charbons, embarqués à Ruhrort, Duisburg et Hochfeld, qui remontent le Rhin pour des destinations variées.

Dans le courant de 1886, la situation s'est d'ailleurs sensiblement modifiée sur plusieurs points. Les réductions de tarifs, dont on a parlé plus haut, ont permis aux exploitants westphaliens de lutter avec un avantage plus marqué contre les Anglais dans les ports de la mer du Nord, notamment à Hambourg. Ils ont maintenu leurs positions à l'intérieur, et de la Bavière ont même gagné la Bohême, où ils ont pu faire pénétrer leurs cokes. Par contre, les débouchés se sont singulièrement restreints du côté de la Belgique, du Luxembourg et de la Lorraine; il y a eu, de ce chef, une diminution de débit de 500.000 tonnes environ; les industriels belges et français ont poursuivi avec succès leur mouvement d'offensive, et refoulé encore davantage l'invasion du charbon allemand.

## CHAPITRE III.

## MAINTIEN ET ACCROISSEMENT DES DÉBOUCHÉS.

1° Associations formées par les intéressés. — Les exploitants de la Ruhr ont fondé, pour le maintien et le développement de leur industrie, deux associations, dont le nom indique le but. L'une est l'« Union pour les intérêts miniers de l'arrondissement de Dortmund » (*Verein für die bergbaulichen Interessen in Oberbergamtsbezirk Dortmund*); l'autre, l'« Union westphalienne pour l'exportation de la houille » (*Westfälischer Kohlen Ausfuhrverein*). « Ces Unions, dit M. Jacquot, comptent parmi leurs membres, comme actionnaires de mines, directeurs, ingénieurs, fonctionnaires, économistes, toutes les personnes qu'un intérêt financier, intellectuel, national, peut rattacher à l'industrie du charbon. Leur rôle est double; il consiste d'abord à entretenir la lumière sur les

questions, tant théoriques que techniques, qui intéressent les progrès de cette industrie, et puis à faire entendre aux représentants de l'État, ministres des finances et des travaux publics, directions de chemins de fer, etc., ses réclamations et ses plaintes : plainte contre l'élévation des tarifs, contre l'élévation de l'impôt minier, qui frappe de 2 p. 100 la valeur brute des produits de l'extraction ; demande du remboursement de cet impôt à la sortie des charbons exportés, demande de porter de un mois à trois ou six mois, comme en Silésie, la durée du crédit accordé par les chemins de fer pour le paiement des expéditions, etc... L'action des deux Vereine a eu cet avantage de tenir en éveil l'esprit des industriels, et de les habituer à envisager froidement les sacrifices que la passivité du gouvernement les obligerait à faire pour le soin de leurs intérêts. »

Ils ont d'ailleurs entre les mains un moyen d'action direct, sous la forme d'une « Caisse minière » (*Westfälische Berggewerkschaftskasse*), qu'ils alimentent de leurs deniers. La loi du 5 juin 1863, qui a réglé le mode d'administration de toutes ces Caisses (*Bergbauhilfskassen*), lui reconnaît la personnalité morale, et oblige tous les exploitants du bassin à y participer. Elle n'avait d'abord d'autre but que de subvenir à l'entretien de certaines Écoles techniques, comme l'École des maîtres mineurs de Bochum, et de quelques autres institutions, laboratoires d'analyses, bureau chargé de dresser une carte minière de la région, etc. Mais, en 1885, ses statuts ont été remaniés ; on a étendu son objet et son pouvoir. Elle ne se borne plus à pourvoir aux besoins spéciaux qu'on vient d'indiquer ; elle peut aussi appliquer ses ressources à l'exécution de toute entreprise d'intérêt commun pour les mines du bassin, comme nous le verrons plus loin à propos du canal de l'Ems. Une décision toute récente (du 31 janvier 1887) vient encore d'élargir le cercle de son

action, en l'autorisant à faire coopérer ses membres aux dépenses entraînées par l'assurance contre les accidents, comme celles qu'exigent la construction et l'entretien d'hôpitaux pour les blessés, de laboratoires d'essai pour le grisou et les expériences faites en vue des mesures à prendre pour éviter les accidents, etc. Pour faire face à toutes ces dépenses, on prélève plusieurs sortes de contributions. La taxe ordinaire, relative aux Écoles et autres institutions techniques, est fixée à 0<sup>centime</sup>,255 par tonne de charbon extraite annuellement ; elle est doublée de droit pour toutes les années où la Caisse subventionne la construction de canaux navigables. Pour les autres entreprises, d'intérêt économique et social, on a recours à une taxe extraordinaire, qui doit être votée par l'assemblée générale à la majorité des 3/4 des voix : elle est prélevée sur les mines dont la production surpasse celle de l'une des années précédentes, et le quantum en est proportionnel à cet excès. Les exploitants espèrent ainsi mettre en même temps un frein à la surproduction, dans le cas où ils ne pourraient s'entendre directement entre eux pour atteindre ce but. Il suffira désormais qu'un nombre d'exploitants représentant les trois quarts de la production du bassin se prononce dans le sens de sa réduction, pour que les opposants soient obligés par ce vote, et se rallient bon gré mal gré. Au lieu des résultats incertains que donnent les syndicats ordinaires, à cause des abstentions toujours assez nombreuses pour détruire à peu près les avantages de la mesure, celle-ci, universellement appliquée, aura son plein effet et rendra tout ce qu'on peut en attendre. C'est dans ce but, d'ailleurs, que ce changement aux statuts a été voté, à la majorité il est vrai des 96 p. 100 des voix de l'assemblée des exploitants.

Après ces quelques renseignements généraux sur la nature et l'objet de ces Unions ou Vereine, nous allons

suivre les différentes directions dans lesquelles s'exerce leur action. La « Société pour l'exportation » poursuit un but particulier, bien défini, et nous reviendrons plus tard sur les moyens qu'elle emploie pour y parvenir. Quant à la « Société pour les intérêts miniers », son activité est plus universelle, et s'étend à toutes les entreprises qui touchent de près ou de loin à la prospérité de l'industrie du bassin. C'est donc d'elle et des résultats qu'elle a obtenus que nous nous occuperons d'abord. Nous l'avons déjà vue intervenir auprès des directions de chemins de fer, et leur réclamer sans relâche des réductions de tarifs. A ce point de vue, en quelque sorte extérieur, son activité se manifestera également dans la question des canaux ; c'est de son immixtion dans l'économie intérieure de l'industrie de la région qu'il s'agit dans le paragraphe suivant.

2° *Société pour les intérêts miniers.* — La Société a toujours pris en main les négociations relatives à la formation de syndicats temporaires, qui ont pour objet d'empêcher le gaspillage et la baisse des prix, conséquences de la surproduction. C'est ainsi que, en 1885, est intervenue par ses soins, entre la grande majorité des exploitants, une convention, valable du 1<sup>er</sup> juillet 1885 au 31 décembre 1886, en vertu de laquelle chaque mine s'obligeait à baisser sa production, par rapport à celle de 1884, dans la proportion de 5 p. 100. On permit toutefois à un certain nombre d'exploitations, qui se trouvaient dans une situation exceptionnelle, d'aller au delà ; mais, en aucun cas, la production ne pouvait dépasser celle de 1884.

Dès la fin de 1885, la Société posait des jalons pour l'établissement d'un nouveau syndicat contre la surproduction, syndicat qui devait durer du 1<sup>er</sup> janvier 1887 au 31 décembre 1891. Mais des difficultés furent soulevées

par plusieurs exploitants qui ne voulaient pas admettre qu'on autorisât, même pour motifs exceptionnels, une mine à une production proportionnelle plus grande que les autres. Les résultats des syndicats antérieurs avaient, d'ailleurs, été fort douteux, par suite de l'abstention d'un certain nombre. La réduction de la production était, en outre, regrettable au point de vue des ouvriers ; car un abaissement de 1 p. 100 correspond au renvoi de mille d'entre eux environ. La convention proposée, analogue aux précédentes, ne fut donc pas adoptée, mais on s'est retourné d'un autre côté. Le changement apporté aux statuts de la Caisse minière à la date du 31 janvier 1887 à peine voté, on en fit de suite application. On décida de tenir en principe la production de chaque mine pour l'exercice 1887-88 (du 1<sup>er</sup> avril au 31 mars) inférieure de 10 p. 100 à la plus forte de celles des trois années précédentes, ce qui correspond à une réduction générale d'environ 2 p. 100 sur celle de 1886. Les quantités extraites dépassant la limite paieront une taxe égale aux 15 p. 100 de leur valeur imposable. Les sommes perçues doivent servir à l'édification et à l'entretien d'hôpitaux pour les ouvriers blessés.

Il s'est formé de même une « Union entre les fabricants de coke et les exploitants de charbon gras de l'arrondissement de Dortmund » (*Vereinigung der Koksanstalten und Fettkohlenzechen des Oberbergamtsbezirks Dortmund*), ordinairement désignée sous le nom de « Syndicat des cokes » (*Kokssyndikat*), pour la défense de cette industrie, dont la situation devenait chaque jour plus précaire. En 1886, la décroissance de la métallurgie força à mettre hors feu 37 p. 100 des fours allumés en 1885, soit 2.400 sur 6.464. La diminution rapide des débouchés vers le Luxembourg et la Lorraine vint sur ces entrefaites ; il devenait urgent d'aviser. Le Syndicat s'efforça d'obtenir des fabricants une réduction de 30 p. 100 dans

la production ; mais la convention rallia un nombre d'entre eux qui ne représentait que 70 p. 100 de la production totale. Finalement, les difficultés furent telles qu'au mois d'août 1886, le Syndicat rendit à ses membres toute liberté pour la production et les prix. La concurrence acharnée amena de suite une baisse formidable ; le coke se vendit à 6<sup>f</sup>,25 la tonne, rendu à Cologne. Heureusement pour les industriels, la situation s'est bien améliorée depuis la fin de l'année dernière. Une reprise très notable a eu lieu dans la métallurgie et a amené une augmentation (de 21,2 p. 100 pour le premier trimestre de 1887) dans les expéditions de coke ; les prix se sont également relevés.

A côté de ces mesures à portée restreinte et d'application immédiate, la « Société pour les intérêts miniers » a entrepris une campagne, dont le but ne serait rien moins qu'une transformation profonde du régime technique et économique du bassin. Le champ productif est divisé, comme je l'ai fait remarquer plus haut, en un très grand nombre de propriétaires et d'exploitations. Ce morcellement entraîne une augmentation très notable des frais de toute espèce ; et les industriels de la Ruhr voient dans ce fait la cause principale des difficultés du présent.

En 1885, un membre de la Société proposa de chercher les moyens de remédier à cette situation et de ramener à une plus grande unité l'exploitation des richesses naturelles du pays. Il parut que l'on devait tout d'abord se borner à étudier la question au point de vue purement technique, et l'on nomma une « Commission technique » (*Technische Kommission*), pour procéder aux études préparatoires nécessaires. Elle a maintenant terminé son œuvre et a réuni une foule de documents qui permettent de juger, en connaissance de cause, des avantages pécuniaires importants que l'industrie de la région retirerait

d'une plus grande concentration des travaux techniques, particulièrement de l'épuisement des eaux.

Un peu plus tard, on mit sur le tapis la question financière. Les travaux de la « Commission technique », quelque valeur qu'ils possèdent par eux-mêmes, resteraient probablement sans résultat pratique, si l'on ne s'occupait en même temps des moyens d'arriver à la « consolidation » financière, suivant le terme employé en Allemagne, c'est-à-dire à la réunion de plusieurs exploitations en une seule. C'était donc une seconde étude à faire. qu'on confia à la même Commission, en l'autorisant à s'adjoindre de nouveaux membres. La conclusion fut que la première chose à faire était de demander au gouvernement des modifications dans le texte de la loi des mines, en vue d'alléger les conditions exigées pour rendre valables les décisions prises par les assemblées de sociétaires et d'actionnaires.

On proposa même (et la question est à l'étude) la formation d'une vaste société commerciale qui concentrerait la vente de tous les produits du bassin. Elle s'engagerait à acheter à chaque mine sa production, périodiquement fixée à l'avance, et à un prix minimum, variable suivant l'état du marché. Les exploitations s'assureraient ainsi le débouché de leur extraction, et les ressources nécessaires à la continuation des travaux. Elles toucheraient en plus un tant pour cent dans les bénéfices réalisés par la Société, bénéfices en rapport avec l'écart qui existerait entre le prix de vente réel et le prix d'achat aux mines.

3° *Société pour l'exportation.* — La « Société pour les intérêts miniers » soutient aussi, par des allocations pécuniaires et par son appui moral, les efforts persévérants de la « Société westphalienne pour l'exportation du charbon ». L'exportation maritime lointaine, qui en est à ses

débuts, est une des grandes ambitions des exploitants de la Ruhr, qui essaient de tous les moyens pour s'assurer des débouchés réguliers au delà des mers. En 1885, cette Société envoya quelques tonnes de houille aux Indes hollandaises, comme échantillon; la tentative fut couronnée du succès; depuis lors, à Java, les chemins de fer et quelques bateaux à vapeur consomment du charbon westphalien.

Pour mieux lutter contre la concurrence anglaise, en ce qui concerne l'approvisionnement des ports de la mer Baltique, la Société a humblement représenté au ministre que les houilles embarquées dans les ports de la mer du Nord, à destination de ceux de la Baltique, pourraient bien bénéficier de la même réduction de tarif (0<sup>f</sup>,625 par tonne, pour le transport par voie ferrée de la mine au lieu d'embarquement) que les charbons destinés à l'exportation; qu'en réalité la lutte était ici encore plus directe avec les concurrents anglais, que dans les ports d'outre-mer. La pétition fut écoutée, et la réduction de tarif accordée.

La Société a établi un dépôt de charbon à Saint-Vincent, l'une des îles du Cap-Vert, où font escale les navires qui vont d'Europe au Brésil. On espérait que les bateaux de Hambourg passeraient avec le dépôt des contrats de livraison. Cet espoir ne s'est pas réalisé, et on a dû récemment liquider l'affaire.

Ce qui rend plus difficile l'extension de cette exportation maritime, c'est que les ports allemands manquent d'aménagements convenables pour le transbordement des charbons, comme ceux d'Anvers, on encore comme ceux, tout récents, de Rotterdam. Mais il est à croire que si ces efforts parviennent à créer un courant commercial régulier, on se résoudra à en établir, peut-être d'abord à Emden, où aboutira, dans quelque temps, un canal amenant directement le charbon de la Ruhr, puis

dans les autres ports, si le besoin s'en fait décidément sentir.

4° *Transports par eau.* — D'ici à quelques années, en effet, la région westphalienne sera dotée d'un facile débouché sur la côte de la mer du Nord par le canal de la Ruhr à l'Ems inférieur. Ce sera comme une prolongation artificielle de la voie du Rhin, qui fournira aux richesses du pays un moyen économique d'arriver à un port, sans quitter le domaine national, et sans dépendre d'aucune puissance étrangère, comme c'est le cas pour Rotterdam ou pour Anvers. Le projet de loi vient d'être définitivement adopté par le Reichstag et la Chambre des seigneurs, après avoir subi d'assez grandes vicissitudes. Pour la première fois, en 1877, le gouvernement avait présenté aux chambres un projet de canal, qui de Dortmund devait aller rejoindre l'Ems dans les environs de Münster, et suivait le fleuve jusqu'à Bevergern; là, au lieu de continuer tout droit jusqu'à la mer, il tournait brusquement à l'est, et allait par Hanovre rejoindre le cours de l'Elbe dans le voisinage de Magdebourg. Mais à cette époque l'industrie de la Ruhr n'avait pas encore de visées extérieures. Depuis, elle a mieux pris conscience de ses forces, et porte plus loin ses vues; elle prétend disputer aux Anglais le marché d'outre-mer. Aussi, le gouvernement a-t-il abandonné son projet primitif, qui aurait d'ailleurs eu l'inconvénient de laisser le charbon westphalien venir faire, à Berlin, une trop forte concurrence aux houilles de Silésie. Il en a présenté un autre en 1882. Le tracé par Hanovre était délaissé; le canal, depuis Bevergern, poursuivait vers le nord, latéralement à l'Ems, et aboutissait à la mer, auprès du port d'Emden. Cette première voie navigable devait d'ailleurs être continuée de Dortmund au Rhin, le long de l'Emscher, puis parallèlement à la côte de la mer du Nord, de Papenburg aux bouches du

Weser, et jusqu'à celle de l'Elbe. Ce nouveau projet fut adopté par le Reichstag, en 1883, mais repoussé par la Chambre des seigneurs. Représenté, en 1886, sous une forme un peu différente, il a enfin été adopté; mais les fonds n'ont été tout d'abord votés que pour la construction du canal de Dortmund à Emden; les autres viendront plus tard. En outre, la loi porte que les districts intéressés à l'exécution de ce travail devront livrer à l'État, sans frais et déliés de toute charge, le fond et sol nécessaires à la construction, y compris les installations complémentaires; ou bien lui remettre le montant des dépenses à faire pour cette acquisition, y compris les dédommagements à accorder aux intérêts lésés, montant estimé à 7.500.000 francs.

Des négociations sont entamées à ce sujet depuis quelque temps par les intéressés; un comité s'est chargé de faire les évaluations nécessaires. Il a été déclaré que le district industriel de la Ruhr devait payer pour sa part 2 millions de marks (2.500.000 francs). La « Société pour les intérêts miniers » a accepté ce chiffre, en émettant l'avis que l'ensemble des mines eût à y contribuer pour 1 million de marks, et que le million restant fût couvert par les autres établissements industriels du bassin. Le million à payer par toutes les mines réunis sera d'ailleurs fourni par la caisse minière. Et c'est en ceci que trouve son application un des changements de statuts dont j'ai parlé plus haut. On se propose même d'aller plus loin. L'assemblée générale a résolu de verser au gouvernement, pour l'acquisition des terrains, 1 million de marks en plus, à condition que cette somme soit répartie sur toute l'étendue du canal, c'est-à-dire jusqu'au Rhin. Vu la situation malaisée de la plupart des exploitations, on a décidé d'emprunter cette somme, et ne leur demander que le paiement annuel de l'intérêt et de l'amortissement. Deux compagnies pourtant, celles des mines de Gelsenkirchen

et du Mont-Cenis, ont offert de payer immédiatement le total de leurs contributions, qui s'élèvent respectivement à 100.000 marks (125.000 francs) et à 25.000 marks (31.250 francs). Mais on n'a pas donné suite à cette idée; le premier mode de paiement a paru plus facile à supporter pour la grande généralité des exploitants.

Il est possible que la construction de ce canal fasse baisser suffisamment le prix de transport des charbons de la Ruhr pour leur permettre de disputer aux Anglais les marchés de la côte de la mer du Nord, et même les marchés plus lointains. Les bouches de l'Ems se prêtent à des travaux d'amélioration, qui pourraient bien relever la prospérité de l'ancien port d'Emden, et en faire un grand port de commerce.

La « Société pour les intérêts miniers » a mis aussi à l'étude un projet de canalisation de l'Emscher; mais ceci se relie plutôt à la question de l'évacuation des eaux de mines qu'à celle du transport proprement dit.

D'une plus grande importance pour la navigation sont les travaux d'amélioration du chenal que l'on exécute en différents points du Rhin, et qui auront prochainement rendu praticables, en toute saison, des passes où il n'y avait pas toujours une profondeur d'eau suffisante; la navigation sera ainsi assurée, en tout temps, entre Cologne et la frontière de Hollande. Une compagnie badoise s'est même formée à l'effet d'entretenir un commerce direct entre les pays rhénans et l'Angleterre, au moyen de bateaux à vapeur, disposés pour la navigation tant sur mer que sur le fleuve. Elle a d'abord fait construire un navire à hélice, l'*Industrie*, qui a marché dans l'automne de 1885. Malgré le bas prix du fret, les résultats ont été favorables, et la compagnie a entrepris la construction d'autres navires. Mais comme ce vapeur s'est vu arrêté deux fois en Hollande par suite du manque de profondeur, la « Commission de la navigation sur le Rhin »

(*Rheinschiffahrts Kommission*) a attiré sur ce point l'attention du ministre du commerce, et l'a prié d'agir auprès du gouvernement hollandais, afin que celui-ci entretienne le chenal en meilleur état.

Les exploitants de la Ruhr appellent aussi de tous leurs vœux l'exécution de deux autres entreprises, qui leur procureraient le transport économique de leurs houilles et de leurs cokes vers la Belgique, la France, le Luxembourg et la Lorraine. C'est d'abord un canal du Rhin à la Meuse, puis la canalisation de la Moselle, depuis Coblenz jusqu'à Metz.

Le premier canal relierait le Rhin à la Meuse à la hauteur de la Ruhr, et ferait suite à la voie navigable que l'on va construire, du Rhin à Dortmund et à Emden. Il se rattacherait au réseau des canaux hollandais, belges et français, et permettrait aux charbons de Westphalie de lutter avec plus d'avantage, surtout aujourd'hui, alors que les chemins de fer belges font de grands efforts pour les refouler au moyen de tarifs réduits qu'ils accordent à leurs nationaux, comme on l'a vu plus haut.

Le second projet, la canalisation de la Moselle depuis son embouchure jusqu'à Metz, aurait pour les industriels de la Ruhr un double intérêt. Il leur rendrait possible un abaissement du prix de transport de leurs cokes vers les hauts fourneaux du Luxembourg et de la Lorraine, et assurerait leur situation sur ce marché, où ils sont actuellement fort pressés entre leurs concurrents de la Belgique et de la Sarre; il leur permettrait également d'obtenir à bon compte le minerai de fer des gisements de la Moselle. La « Société pour les intérêts miniers » s'est déjà remuée pour obtenir à ce sujet quelques résultats. Jusqu'ici ses efforts ont échoué devant la résistance prononcée des industriels de la région de la Sarre.

En somme, le bassin de la Ruhr, malgré toutes les conditions favorables qui se réunissent pour assurer un

bas prix de revient, n'a pas été sans se ressentir de la crise générale. Elle a particulièrement affecté les producteurs de charbons gras et les fabricants de coke; mais tout le monde, de près ou de loin, a été touché, sauf de rares exceptions. Les dernières statistiques accusaient des diminutions dans les exportations du bassin; les débouchés menaçaient de se restreindre.

En présence de ces difficultés, il est instructif de voir quels efforts font les industriels pour les surmonter, à quel point ils se serrent les coudes et unissent leurs forces, dans la recherche de ce qui pourrait amener une diminution des frais de production et un élargissement des débouchés. Ils n'attendent pas tout du gouvernement, nomment eux-mêmes leurs commissions pour étudier les questions et les solutions proposées, et, dans leur ardeur d'amélioration, vont jusqu'à vouloir changer tout le régime économique et financier de leurs exploitations. Ils paient, en un mot, largement de leur personne et de leur bourse, et ne reculent devant aucun travail, aucun sacrifice pour trouver à la situation tous les remèdes qu'elle comporte.

## TABLE DES MATIÈRES.

## CHAPITRE I.

## CONDITIONS GÉNÉRALES DE L'EXPLOITATION.

	Pages
1° Disposition du bassin . . . . .	467
2° Production . . . . .	470
3° Main-d'œuvre . . . . .	473
4° Transport des produits . . . . .	475

## CHAPITRE II.

## MARCHÉS ET DÉBOUCHÉS.

1° Marché de Berlin . . . . .	478
2° Ports de la mer du Nord . . . . .	479
3° Hollande . . . . .	482
4° Belgique . . . . .	484
5° Luxembourg et Lorraine . . . . .	486
6° Italie . . . . .	488
7° Résumé . . . . .	489

## CHAPITRE III.

## MAINTIEN ET ACCROISSEMENT DES DÉBOUCHÉS.

1° Associations formées par les intéressés . . . . .	491
2° Société pour les intérêts miniers . . . . .	494
3° Société pour l'exportation . . . . .	497
4° Transports par eau . . . . .	499

## NOTICE NÉCROLOGIQUE

SUR

M. A.-E. BÉGUYER DE CHANCOURTOIS,

INSPECTEUR GÉNÉRAL DES MINES.

Par M. EDMOND FUCHS, ingénieur en chef des mines.

Des pertes aussi douloureuses qu'inattendues sont venues éclaircir, depuis quelques années, les rangs élevés du Corps des mines. Après MM. Guillebot de Nerville et Tournaire, tous deux vice-présidents du Conseil général des mines, brusquement enlevés dans la plénitude de leur force et de leur activité, la mort vient de frapper celui qui avait été l'héritier scientifique et le continuateur de l'œuvre d'Élie de Beaumont, A.-E. Béguyer de Chancourtois, inspecteur général des mines, professeur de géologie à l'École supérieure des mines, ancien sous-directeur et récemment président de la Commission de la Carte géologique détaillée de la France, commandeur de la Légion d'honneur.

Esprit d'élite, cœur noble, caractère généreux et bienveillant, nature chevaleresque, travailleur infatigable, M. de Chancourtois laisse après lui une œuvre considérable qui, grâce à la portée générale et aux tendances élevées qui la caractérisent, aura une durée sérieuse et exercera une influence profonde.

Né à Paris, le 20 janvier 1820, M. de Chancourtois entra,

dès l'âge de dix-huit ans, à l'École polytechnique, où de brillantes études lui permirent de choisir la carrière des mines et de devenir l'élève de cette pléiade d'ingénieurs illustres : Dufrénoy, Élie de Beaumont et Le Play, qui se partageaient alors l'enseignement de l'École des mines et dont les deux derniers surtout devaient exercer une si profonde influence sur la carrière extérieure comme sur la vie intellectuelle de leur jeune auditeur.

Ses études achevées, il choisit, comme but de la mission qui clôt pour les élèves l'enseignement de l'École des mines, la Hongrie, Banat et la Turquie. Deux notes, insérées dans les *Annales des mines*, sur la *Fabrication du cuivre à Szaska* et sur l'*Extraction de l'argent par voie d'amalgamation à Cziklowa*, montrent tout le sérieux avec lequel fut accomplie la première partie de cette mission. Quant à la seconde, elle prit une envergure inattendue, M. de Chancourtois s'étant résolument lancé dans des voies nouvelles et lui ayant donné pour objectif l'exploration de l'extrémité orientale de l'Asie Mineure.

L'étude des richesses naturelles et des faits géologiques si intéressants de ces contrées, à peu près vierges à cette époque de toute investigation scientifique, le retint près d'une année dans les montagnes de l'Arménie et du Turkestan et eut une influence décisive sur son avenir, en faisant des études géologiques l'objectif principal de ses méditations et de ses travaux.

La sûreté de son coup d'œil, la finesse de ses facultés d'observation et l'ampleur de ses vues d'ensemble se révélèrent dans les deux mémoires qu'il présenta, à son retour, à l'Académie des sciences, et dont le premier avait pour objet : *La nature des eaux du lac de Van et du natron qu'on en retire*, et le second : *L'exploration géologique d'une partie très peu connue de la Turquie d'Asie*.

Cette série de publications, d'une valeur scientifique

réelle, devait naturellement attirer, sur le jeune ingénieur, l'attention de ses chefs et celle de l'Administration supérieure. Aussi, après un court séjour de trois ans (1845-1848) en province, où il se vit successivement chargé des sous-arrondissements minéralogiques de Mézières, d'Orléans et de Nantes, fût-il rappelé à Paris, dès 1848, pour faire partie, comme professeur de topographie souterraine, du corps enseignant de l'École des mines et y organiser, avec M. Le Play, la collection des Gîtes minéraux, et celle de la Statistique minérale de la France.

Peu de temps après, en 1852, il fit ses débuts dans la carrière de l'enseignement de la géologie, sous les auspices d'Élie de Beaumont dont il était l'admirateur passionné et le disciple dévoué. Il eut le rare bonheur de les faire, à l'âge de trente-deux ans à peine, dans ce cours de géologie qu'il devait professer pendant plus de trente années, avec une autorité toujours croissante, d'abord comme suppléant, puis comme professeur adjoint (1856), enfin comme successeur du maître de la géologie française (1875).

Sa première publication, faite à l'occasion de l'introduction des études scientifiques dans les lycées, en 1854, révèle déjà les qualités de clarté et de méthode qui caractérisent toute son œuvre. Elle est intitulée modestement : *Notions préliminaires de géologie extraites du cours de Monsieur Beudant*, et se fait remarquer surtout par l'aperçu de lithologie qu'elle renferme, aperçu qui contient en germe toute une classification systématique des roches et dont la précision est telle qu'elle pourrait fournir, aujourd'hui encore, un excellent avant-propos aux études géologiques.

Choisi, la même année, comme collaborateur par M. Le Play pour l'organisation de l'Exposition universelle de 1855, M. de Chancourtois trouva, dans les importantes fonctions qui lui étaient confiées, une heureuse occasion de faire valoir l'étendue et la variété de ses

connaissances, sa puissance de travail exceptionnelle et les rares facultés de son esprit généralisateur et systématique.

Le prince Napoléon, qui présidait cette première grande manifestation de notre puissance industrielle, frappé de l'ensemble des qualités déployées par le jeune *Commissaire général adjoint* eut la pensée de les utiliser dans une sphère d'activité plus vaste encore, en nommant M. de Chancourtois au poste élevé de *Secrétaire des Commandements* et de *Chef du Cabinet du ministère de l'Algérie et des Colonies*, dont l'empereur Napoléon III venait de lui confier l'organisation et la direction.

On sait combien cette création fut éphémère, malgré la pensée généreuse et féconde qui l'avait fait naître ; mais elle eut, pour M. de Chancourtois, un corollaire aussi heureux qu'imprévu : nous voulons parler de ce voyage d'exploration de la *Reine Hortense* dans les régions polaires de la Norvège, de l'Islande et du Groenland, auquel il prit part comme ami du prince et comme géologue de l'expédition.

De précieuses collections géologiques, conservées au musée de l'École des mines, et un remarquable travail sur la constitution du sol de l'Islande et sur les grandes lignes de fracture qui sillonnent cette contrée si éminemment volcanique furent les résultats de cette rapide exploration (juin-octobre 1856), qui valut à M. de Chancourtois la promotion au grade d'officier de la Légion d'honneur.

Dès son retour, il reprit avec une nouvelle ardeur les études géologiques qu'il avait entreprises sur le sol de la France.

La *Carte géologique de la Haute-Marne*, exécutée en commun avec Élie de Beaumont et publiée en 1860, est l'œuvre capitale de cette première partie, si brillamment remplie, de la carrière de M. de Chancourtois. Elle marque

un progrès sensible sur les cartes départementales publiées jusqu'alors, par l'introduction d'une coordination systématique des faits d'alignement accusés par les fractures du sol et des phénomènes éruptifs qui en sont la conséquence.

Cette coordination avait pour point de départ le *Réseau pentagonal*, conception aussi originale que féconde, qui est basée sur l'étude géométrique des conditions de symétrie de tout mode de division de la sphère et par laquelle Élie de Beaumont venait de systématiser les lignes caractéristiques du relief et de la géologie du globe.

Cette brillante synthèse avait, dès l'abord, séduit l'esprit généralisateur de M. de Chancourtois, qui en est devenu le champion ardent et convaincu. C'est sa propagande persévérante et enthousiaste qui a maintenu le Réseau pentagonal dans l'arène des discussions géologiques ; ce sont les nombreuses applications qu'il en a données qui l'ont, en quelque sorte, popularisé parmi les géologues de tous les pays. M. de Chancourtois a su, en effet, dans une série de publications successives, assouplir l'adaptation du réseau aux phénomènes les plus importants de la géologie qui, à leur tour, recevaient, de cette application même, une interprétation plus large et plus rationnelle.

C'est ainsi qu'il a mis en évidence la possibilité de grouper, dans une série restreinte d'alignements, eux-mêmes rattachés au Réseau pentagonal, les fractures qui avaient donné naissance aux gîtes de fer de l'Est de la France (1863).

Peu de temps après, il montrait, de même, que les *gîtes des substances hydrocarbonées*, auxquels se relient plus ou moins intimement ceux de *soufre et de sel*, étaient, eux aussi, échelonnés sur un nombre très restreint de grands cercles. Le plus important de ces cercles forme l'axe de la zone pétrolifère pennsylvanienne, épouse la

grande fracture cosmique du Saint-Laurent, relève les puissants gîtes de sel de Magdebourg et va rejoindre à Bakou, dans la patrie des adorateurs du feu, la fameuse presque île d'Apchéron qui forme la terminaison orientale du Caucase, centre européen des grandes émissions pétrolifères.

Les facultés de généralisation, unies à une analyse minutieuse et savante, dont ces ouvrages font preuve, trouvèrent bientôt leur application dans un champ plus étendu par l'institution du *Service de la carte géologique détaillée de la France* au 80.000<sup>e</sup>, dont M. de Chancourtois fut nommé le Sous-Directeur. Plein de confiance dans la hauteur des vues de son disciple et ami, comme dans la sûreté de son jugement, Élie de Beaumont, qui était placé à la tête de cette importante création, lui en laissa complètement l'organisation et s'en remit à lui pour l'élaboration du programme des études sur le terrain et du mode de représentation des résultats obtenus.

Le système auquel s'arrêta M. de Chancourtois est inspiré principalement par l'idée de passer, à l'aide d'une série de transitions graduées, comportant une abstraction croissante, des faits matériels de la géologie aux spéculations de la science; il restera comme le modèle des programmes de cette nature.

Les faits matériels, c'est-à-dire la succession des terrains et des roches étaient représentés par une série rationnelle de perspectives photographiques, qu'une construction géométrique transformait en coupes verticales; et celles-ci, à leur tour, servaient de base à l'échelle géologique des terrains. D'autre part, les cartes, les coupes et les sections longitudinales, auxquelles cette échelle était appliquée, évitaient le caractère d'abstraction, qu'on a trop souvent reproché aux documents de cette nature, par l'application de tout un système de notations donnant, pour chaque terrain comme pour

chaque roche, les variations de composition chimique, de texture physique et d'allure topographique que ces groupes présentent dans les diverses localités où ils affleurent à la surface du sol.

Enfin l'emplacement des lieux d'extraction des matières utiles, elles-mêmes définies par un Système complet de signes conventionnels, était reporté sur les cartes avec un soin minutieux, tandis qu'une Notice explicative et des Légendes détaillées, annexées à chaque carte comme à chaque section, faisaient de chacun de ces documents un tout autonome indépendant et complet.

L'apparente complication de ce système fait place à une simplicité parfaite pour tout lecteur sérieux, car les notations choisies se groupent en un petit nombre de séries ayant chacune un signe général commun et ne différant entre elles que par des additions de détail, elles-mêmes systématisées suivant un plan fort simple dont la clé est toujours facile à manier.

Ce système, dont quelques-uns des traits principaux se retrouvent aujourd'hui encore dans le fonctionnement du service de la carte géologique, fut appliqué, dans son intégrité, à toutes les cartes, sections, coupes et perspectives photographiques qui furent exécutées sous l'inspiration directe de M. de Chancourtois, c'est-à-dire jusqu'au moment où la mort d'Élie de Beaumont, donnant la première place à des préoccupations d'un autre ordre, fit passer, en 1875, la gestion du service de la carte géologique en d'autres mains et imprimer à sa direction un esprit différent de celui qui l'avait animé jusqu'alors.

Séparé brusquement d'une œuvre qui avait été le but principal de sa vie, M. de Chancourtois se consacra d'une façon plus spéciale aux études abstraites vers lesquelles le portaient son esprit avide de généralisation et de systématisation ainsi que son amour des théories spéculatives.

Depuis longtemps déjà, il avait donné la mesure de ses

tendances et de ses aptitudes dans cette voie par une série de travaux de premier ordre parmi lesquels nous devons citer, tout d'abord, la *Vis tellurique*.

La *Vis tellurique* est un mode de classement et d'étude de la constitution des corps au moyen d'une représentation graphique très originale, basée sur leur composition chimique. C'est en cherchant à édifier un système complet de lithologie synthétique que M. de Chancourtois fut conduit à préciser les notions relatives à la composition des roches et de leurs émanations et qu'il eut l'idée de résumer dans un tableau les rapports multiples des éléments au point de vue de leur rôle lithologique, en suivant, pour leur classification, l'ordre pur et simple de leur distribution dans l'écorce du globe.

Guidé par le sentiment de la continuité, M. de Chancourtois a été conduit « à rouler la feuille sur laquelle les résultats étaient consignés pour rapprocher les extrêmes qui offraient beaucoup d'analogie, puis à préciser les places des corps par des nombres proportionnels. »

Le tracé hélicoïdal lui apparut alors immédiatement, « comme un moyen de réunir, dans une série fondamentale, tous les éléments épars sur le tableau et de manifester ensuite les rapports de propriétés de tous genres ».

Ce tracé offre, en effet, tous les avantages de la *continuité* et, de plus, il multiplie à l'infini le nombre des entrées (alors que celles-ci sont réduites à deux sur un plan), ce qui permet d'observer les coïncidences les plus variées et les plus inattendues.

Les symboles des corps simples sont, à cet effet, groupés sur une hélice, inclinée à 45°, et tracée sur un cylindre droit. Ils sont représentés par des points placés à des distances proportionnelles à leurs poids atomiques et comptées à partir d'une origine fixe. La circonférence de base du cylindre sur lequel l'hélice est tracée n'est

pas déterminée *a priori*. M. de Chancourtois lui donna une longueur égale à 16, c'est-à-dire au poids atomique de l'oxygène; il la partagea en 16 parties, et aux points de division éleva des génératrices dont la longueur fut graduée en parties de même valeur.

Le tableau étant achevé et les corps simples disposés le long de l'hélice principale, on aperçoit immédiatement plusieurs familles naturelles s'alignant, les unes sur la même génératrice, les autres sur des hélices diversement inclinées. On sait, en effet, que l'on peut tracer sur un cylindre une infinité d'hélices passant par deux points quelconques de la surface, à la condition toutefois que le *pas* de ces hélices, et par conséquent le nombre de spires de la portion de la courbe comprise entre ces deux points, soit indéterminé. Mais le problème se resserre beaucoup si, au lieu de laisser le nombre des spires arbitraire, on prend l'hélice à pas maximum, celle qui joint les deux points par un arc inférieur ou au plus égal à une spire et qui constitue, par suite, pour le cylindre, la *géodésique* équivalente de la droite sur le plan.

Or les familles qui se groupent ainsi, soit sur des génératrices, soit sur des hélices à pas maximum, comprennent des corps simples possédant sensiblement les mêmes propriétés physiques ou chimiques, les mêmes affinités, les mêmes caractéristiques industrielles. Ces hélices ramassent aussi des corps composés, pouvant jouer le rôle de radicaux, ou encore des isomères de certains corps simples ou composés, et cette correspondance est due, dans la pensée de l'auteur, à une condensation proportionnelle de la même matière.

M. de Chancourtois a signalé ainsi plusieurs familles importantes, groupées chacune sur une des génératrices du cylindre, comme celles de l'oxygène, du chlore, du magnésium, des métaux alcalins, et quelques autres, disposées sur des hélices spéciales, telles que les groupes

qui embrassent les corps aciérants, ceux qui rendent les métaux cassants ou aigres; enfin les associations naturelles que l'on retrouve dans les produits d'émanation des volcans et dans les matières filoniennes (\*). Il a même fait une intéressante application de ces notions aux composés du carbone et en a tiré, d'autre part, une théorie très originale *Sur la Production naturelle et artificielle du diamant*, dont la formation, dans cet ordre d'idées, s'effectuerait à basse température et par voie humide.

Depuis la publication de cette puissante et originale conception, c'est-à-dire depuis 1863, les idées émises par M. de Chancourtois ont été reprises par différents chimistes qui ont, en général, passé sous silence les travaux de leur devancier. C'est ainsi que Lothar Meyer, Mendeleef, etc., ont établi une classification générale des corps simples d'après leurs poids atomiques; mais ils l'ont fait d'une façon beaucoup moins heureuse et sous la forme rudimentaire d'un tableau à double entrée.

La Vis tellurique de M. de Chancourtois, qui demanderait une revision pour être en harmonie avec les nouvelles déterminations des poids atomiques et les nouvelles découvertes, n'en reste pas moins l'instrument le plus fécond de ces sortes de recherches (\*\*). Elle fait clairement ressortir les relations numériques qui unissent les corps simples entre eux et met ainsi en lumière ce principe de philosophie naturelle déjà proclamé par Pythagore : *Les*

(\*) Rappelons que M. A. Cornu a trouvé, dans l'un des remplissages métallifères des filons de Freyberg, une de ces séries naturelles, formée de quartz, de pyrite de fer et de galène dont les équivalents sont respectivement comme 1 : 2 : 4.

(\*\*) Dans les dernières années de sa vie, M. de Chancourtois avait entrepris ce travail et il s'était préoccupé de placer sur la vis tellurique les corps les plus répandus dans les remplissages filoniens, représentés comparativement par leurs poids atomiques et leurs équivalents.

*propriétés des corps sont les formes sensibles des propriétés des nombres.*

M. de Chancourtois, préoccupé de cette idée si profonde, a eu soin de marquer, sur son hélice, dans quelles limites peuvent osciller les valeurs réelles des poids atomiques, si difficiles, comme on sait, à fixer d'une manière absolue. Il a même émis l'opinion qu'un classement bien étudié pourrait servir à préciser les positions de ceux de ces poids dont la détermination est particulièrement délicate, ce qui revient à fixer les poids atomiques des corps d'après les analogies de propriétés qui les feraient placer sur des hélices définitivement connues. L'intersection de deux au moins de ces hélices fournirait un point dont l'ordonnée serait représentative du poids atomique cherché. Il a, en outre, fait observer une sorte de dualité dans l'ordonnance générale des éléments, qui se suivent par paires, et une loi de récurrence très nettement visible sur les spires successives.

Une autre conséquence féconde de la formule de Pythagore énoncée plus haut est celle de la relation entre les nombres premiers et les poids atomiques. Les corps simples, c'est-à-dire les seuls éléments fondamentaux non dissociables pratiquement, seraient ceux dont les caractères numériques correspondent aux nombres premiers, lesquels formeraient ainsi le symbole de la base encore si obscure de l'édifice des corps, comme ils constituent l'ossature de la série des nombres. Ce qui semble appuyer cette hypothèse de la concordance parfaite entre les corps, éléments de la variété matérielle, et les nombres, éléments de la variété abstraite, c'est le rôle prépondérant que jouent, dans la vis tellurique, le nombre 4 et ses multiples, si importants, comme l'on sait, dans la théorie des nombres premiers.

On voit, par ces considérations, à quelle hauteur d'abstraction M. de Chancourtois s'est élevé, et combien est

importante la portée philosophique de ses travaux sur la classification des corps simples. Il nous a paru d'autant plus nécessaire de faire ressortir cette partie de son œuvre que, née tout entière de l'observation des faits géologiques, elle en tire une valeur toute spéciale pour les géologues qui peuvent être fiers de revendiquer une découverte dont le monopole est généralement attribué aux seuls chimistes.

Les mêmes principes qui conduisirent, en chimie, M. de Chancourtois à la découverte de sa Vis tellurique, l'amènèrent, en physique, à des vues originales et tout à fait nouvelles sur *le Rôle et l'emploi des Imaginaires*. Il écarte, au préalable, la représentation habituelle des Imaginaires sur un même plan que les quantités réelles. Il dispose, au contraire, ces deux ordres de quantités dans l'espace, suivant deux directions à angle droit, c'est-à-dire suivant un plan et sa normale, et il entreprend de justifier ce mode nouveau de représentation par des exemples tirés de la géométrie et de la mécanique. En physique, la distinction tranchée entre les phénomènes dus à la Pesanteur ou à la Force gravifique et ceux de la Chaleur, de la Lumière et de l'Électricité lui fait supposer et même essayer de démontrer que les mouvements dont ces deux ordres des phénomènes dépendent — et qui peuvent se transformer, comme l'on sait, les uns dans les autres — doivent être représentés, dans les calculs, les premiers par des quantités réelles et les seconds par des quantités imaginaires. On ne peut que regretter que M. de Chancourtois n'ait pas donné une suite à ces idées, en les appuyant sur quelques démonstrations particulières tirées des faits, sa démonstration générale paraissant trop inductive pour entraîner pleinement la conviction dans l'esprit du lecteur.

La dernière partie de la carrière scientifique de M. de

Chancourtois, à côté de son cours à l'École des mines, fut presque entièrement consacrée à ses grands *Travaux d'unification des sciences géographiques et géologiques*.

Lors de la création et pendant les premières années d'existence du service de la carte géologique détaillée de la France, M. de Chancourtois s'était déjà vu aux prises avec les difficultés qui résultent, pour la Géologie, de l'insuffisance des cartes topographiques. Même notre belle carte de l'État-Major au 80.000<sup>e</sup>, malgré les vues d'ensemble qui ont présidé à sa confection, est loin de réaliser encore toutes les conditions désirables, tant au point de vue de l'échelle qu'à celui de la représentation orographique. Plus tard, lorsque M. de Chancourtois, ayant été relevé de ses fonctions de Sous-Directeur du service de la carte géologique, put reprendre ses travaux sur les alignements géologiques et les accidents du relief, il fut encore plus frappé de la nécessité d'arriver, pour la Cartographie terrestre, à un système complet et bien ordonné, et il dirigea tous ses efforts vers ce but.

Les réponses aux différentes questions soulevées en vue de la réalisation d'un tel programme se trouvent dans de nombreuses notes, dans divers mémoires insérés aux *Comptes rendus de l'Académie des sciences* et finalement dans un ouvrage qui résume tout le système et qui fut publié, en 1884, à l'occasion du congrès de Washington, chargé de résoudre la question du Méridien international et de l'heure universelle. En outre, M. de Chancourtois, dans plusieurs conférences faites, soit à la Société de géographie, soit au Congrès des sciences géographiques en 1875, soit au Congrès de géologie, soit enfin dans des Conférences internationales instituées à l'Exposition de 1878, ne négligea aucun effort pour répandre ses idées et créer un mouvement d'opinion en leur faveur.

Le problème, dans toute sa généralité, comporte les deux parties suivantes :

1° Rechercher et établir le meilleur mode de représentation graphique de la surface terrestre ;

2° Fixer un système rationnel, uniforme et international de graduation pour l'espace comme pour le temps.

Les modes de représentation de la surface terrestre sont très nombreux. Comme il est impossible de reporter les figures de la sphère sur un plan sans les déformer, on essaie de conserver, dans les transformations qu'on est obligé de leur faire subir, au moins une des propriétés géométriques de ces figures, en sacrifiant plus ou moins complètement les autres.

En général, on cherche à sauvegarder la proportionnalité des surfaces, ce qui permet *grosso modo* l'application d'une même échelle linéaire pour les cartes de faible étendue. Mais pour les grands pays, quel que soit le mode de compensation adopté, les déformations deviennent telles que les lignes acquièrent des sinuosités rendant impossible toute étude d'alignement un peu précise.

M. de Chancourtois estime préférable d'écarter toutes ces méthodes de compensation approchée et de revenir aux seules méthodes sincères de projection, la *projection stéréographique* et surtout la *projection gnomonique*. Cette dernière, déjà employée par Thalès, le père de la Géographie, jouit, en effet, d'une propriété capitale. Tout grand cercle de la sphère, qui est en même temps le plus court chemin entre deux points de cette surface, y est représenté par une droite. C'est là un avantage tout à fait primordial pour la Géologie, car il permet de suivre exactement, avec la seule aide d'une règle, les alignements terrestres — fractures, failles, chaînes de montagnes, etc..., — dont les éléments sont disposés suivant des arcs de grands cercles.

Pour la Nautique, les cartes gnomoniques sont aussi préférables, puisqu'elles permettent de remplacer la loxodromie par l'arc de grand cercle, c'est-à-dire de suivre

l'itinéraire du plus court chemin, tout en conservant sur la carte la simplicité du tracé rectiligne de la route. Enfin, en Météorologie, on peut distinguer à première vue, sur une telle carte, un mouvement giratoire d'un mouvement de translation.

Mais les cartes gnomoniques ont une portée limitée puisque, pour représenter gnomoniquement un hémisphère complet, il faudrait la surface indéfinie dans tous les sens, du plan tangent sur lequel la projection est faite. Aussi, M. de Chancourtois a-t-il été conduit à se servir de *Polyèdres circonscrits au Globe*, sur chaque face desquels on dessine la projection gnomonique correspondante. En prenant ainsi successivement : un octaèdre régulier circonscrit, un cube et un dodécaèdre rhomboïdal, dont les faces sont choisies de telle sorte que les projections correspondantes se complètent les unes les autres (ce que l'on obtient en donnant à ces trois corps la disposition relative qu'ils présentent en cristallographie), on peut former trois séries de cartes constituant un appareil géographique aussi exact que facile à manier pour les études d'ensemble.

Pour le détail, M. de Chancourtois eut l'idée de circonscrire au globe des polyèdres à faces beaucoup plus nombreuses. Chaque face est le plan tangent à un trapèze sphérique qui est limité par deux méridiens et deux parallèles et sur lequel on construit la projection gnomonique de son centre. On obtient ainsi des cartes gnomoniques dont les déformations extrêmes n'atteignent pas celles des cartes ordinaires.

En même temps qu'il se livrait à ses études sur la Cartographie, M. de Chancourtois poursuivait l'extension d'un système uniforme de graduation. Ce système, dont les bases ont été magistralement posées, est précisément notre *système métrique décimal*, appliqué dans toute sa

généralité et tel qu'il avait été conçu par ses fondateurs. Comme ces derniers, M. de Chancourtois a voulu l'appliquer dans ses conséquences extrêmes et il a préconisé la division décimale de la circonférence, adoptée dès l'origine par l'état-major et proposée depuis lors à tous les congrès de Géodésie et de Topographie, qui se sont toujours prononcés en sa faveur, parce qu'elle évite les erreurs que peut entraîner le maniement des parties aliquotes sexagésimales.

En géologie, la division décimale du cercle de la boussole de 0 à 400 grades a l'avantage d'identifier, aux centaines près, la graduation sur les quatre quadrants, de telle sorte que les deux derniers chiffres de la lecture représentent toujours la même direction angulaire, le chiffre des centaines qui le précède donnant l'indication du quadrant dans lequel cette direction doit être reportée.

M. de Chancourtois était si persuadé des avantages nombreux qu'offre le système décimal complet aussi bien pour l'astronomie, la géodésie, la nautique et l'hydrographie que pour la géologie, qu'il a été amené à traiter, dans toute son ampleur, la question du *Méridien international de 0<sup>e</sup>* ou *Maître Méridien*. Une discussion de la plus haute valeur l'a conduit à reprendre le *méridien*, dit de *Saint-Michel*, qui se rapproche sensiblement de l'ancien méridien de Ptolémée et qui jouit de l'avantage d'être exclusivement marin, c'est-à-dire vraiment international.

Comme complément de l'adoption de ce Maître-Méridien, M. de Chancourtois a formulé les conventions suivantes qui la complètent dans la pratique :

- Les longitudes seront comptées de 0<sup>e</sup> à 400<sup>e</sup> ;
- La correction du quantième se fera sur le méridien 0<sup>e</sup> ;
- L'heure universelle sera celle du méridien 0<sup>e</sup> ;
- La division décimale du temps sera instituée pour les usages astronomiques.

On sait que ces importantes réformes ont été adoptées, au moins en principe, par la Conférence de Rome et par le Congrès international de Washington. M. de Chancourtois a eu ainsi la satisfaction de voir triompher des idées qui lui étaient chères et d'entrevoir au moins dans l'avenir l'heureuse issue finale de la longue campagne qu'il avait poursuivie, pendant plus de douze années, avec une persévérance et un dévouement inaltérables.

La plupart des idées de M. de Chancourtois sur l'*Unification des travaux géologiques* sont devenues familières aux ingénieurs et aux géologues. Aussi ne nous y arrêtons-nous pas longtemps. On se rappelle encore les vues nettes et précises qu'il exposait au Congrès international de géologie, en 1878, sur le *Coloriage méthodique des cartes*, les *Signes et les figurés conventionnels*, la *Chronologie géognostique*, les *Inconvénients que présente l'exagération des hauteurs dans l'établissement des coupes* et la *Nomenclature géologique*.

Patient observateur de la nature, M. de Chancourtois ne considérait pas la géologie comme une science d'expérimentation, quoiqu'il fût loin de méconnaître l'intérêt qui s'attache à ces sortes de recherches. Nous tenons cependant à rappeler une expérience très ingénieuse qui a montré ce dont il aurait été capable dans cet ordre d'idées. A l'aide de petits ballons en caoutchouc, gonflés d'air et recouverts d'une couche de cire fondue, il a réussi à reproduire fidèlement les principaux phénomènes de la théorie des soulèvements. Pour réaliser la faible contraction du noyau central à laquelle la théorie du refroidissement du globe attribue les soulèvements, M. de Chancourtois a simplement dégonflé très légèrement le ballon, à l'instant précis où la cire se solidifie. Celle-ci se couvre alors de rides et forme de petits bourrelets accompagnés de rebroussements et même de chevauche-

ments tout à fait comparables aux accidents naturels des montagnes, si bien que l'on a finalement sous les yeux, lorsque le ballon a repris son équilibre, une frappante image du mécanisme qui a produit le relief actuel du globe.

Mais ce n'était pas seulement au point de vue purement théorique que M. de Chancourtois poursuivait la solution de l'un des plus grands problèmes de la géologie ; il était persuadé, plus que personne, de l'importance pratique de cette solution, et c'est ce qui lui a fait entreprendre l'étude des mouvements de l'écorce terrestre au point de vue de leurs rapports avec les dégagements gazeux. A la suite de sa nomination au grade d'Inspecteur général des mines, survenue en 1879, il avait été chargé, en 1880, de l'inspection de la Division minéralogique du Nord-Ouest, et il n'avait pas tardé à être frappé de la nécessité de trouver un moyen de prévoir, sinon de prévenir, les accidents de grisou si fréquents depuis quelques années dans nos houillères du Nord et du Pas-de-Calais.

Il entreprit cette tâche avec une ardeur toute juvénile, ardeur qu'il puisait, non seulement dans son amour pour la science, mais encore dans cette bienveillance extrême qui était le fond de son caractère et dont ses élèves ont reçu des marques si nombreuses. C'est, en effet, surtout en vue d'améliorer le sort de l'ouvrier mineur, avec lequel ses nouvelles fonctions le mettaient directement en contact — puisqu'il était fidèle à l'ancienne tradition de la visite personnelle de l'Inspecteur général au fond des travaux de mine — qu'il se mit à l'étude des conditions d'exploitation et d'aérage des mines grisouteuses, pour lesquelles il a fait rendre obligatoire l'installation de deux puits, réforme devenue indispensable.

Sans nier l'importance de l'influence barométrique sur

les dégagements de grisou, il ne croyait pas cette influence prépondérante, conclusion qui a été pleinement confirmée par les dernières expériences de la Commission prussienne du grisou. Il estimait, au contraire, que ces phénomènes étaient surtout une conséquence des mouvements de tout genre qui ébranlent l'écorce terrestre et qui déterminent des tensions et des compressions locales, en déformant les parties qui comprennent les couches de houille et les amas de gaz. L'étude suivie des mouvements sismiques, comparée aux observations faites dans nos grandes mines sur les dégagements de grisou, doit donc révéler une relation de cause à effet qui permettra peut-être d'arriver à l'établissement d'une théorie générale.

Ces considérations conduisirent M. de Chancourtois à proclamer toute l'importance qu'aurait, pour notre pays, la création d'observatoires sismologiques dans les grands centres de population et surtout dans les bassins houillers. Pour réaliser cette création dans les conditions les plus fructueuses, il demanda et obtint, en 1883, une mission officielle en Italie, dans le but d'étudier les méthodes d'observation mises en pratique chez nos voisins qui ont poussé très loin ce genre d'études et qui possèdent déjà une cinquantaine de stations d'observation.

Au retour de ce voyage, qu'il fit avec MM. Lallemand et Chesneau, Ingénieurs au Corps des Mines, il publia dans les *Annales des mines* (1886), avec le concours de ses collaborateurs, un important mémoire sur l'*Étude des Mouvements de l'Écorce terrestre, poursuivie particulièrement au point de vue de leurs rapports avec les dégagements des produits gazeux*.

Ce travail magistral constitue une véritable petite encyclopédie des méthodes employées et des travaux sismologiques qui, jusqu'à présent, ont surtout été poursuivis à l'étranger. Après un bref résumé des principales

publications faites en Europe et même au Japon, M. de Chancourtois passe rapidement en revue les théories les plus célèbres sur l'origine des mouvements du sol et se prononce en faveur de celle d'un noyau interne fluide. Il donne une classification complète et détaillée des divers mouvements telluriques : secousses, trépidations, ondulations microsismiques et oscillations lentes. Ensuite il étudie avec le plus grand détail les appareils, au nombre d'une vingtaine, qui servent à enregistrer ces mouvements. Il résume enfin les lois empiriques découvertes jusqu'ici et qui établissent clairement certaines relations entre les mouvements du sol, les saisons, les marées océaniques, la position géographique, enfin les marées atmosphériques.

Comme consécration de ces études et de ces conclusions, il organisa deux observatoires sismologiques, l'un à l'École supérieure des mines de Paris, l'autre à l'École des maîtres mineurs de Douai. Mais, par suite de retards imprévus dans l'installation des appareils, la période pendant laquelle les observations ont été faites est encore trop courte pour qu'il soit possible de tirer de ces observations toutes les conclusions pratiques qu'elles sont susceptibles de fournir.

La mort de M. de Chancourtois, survenue le 14 novembre 1886, ne lui a pas permis de poursuivre la tâche qu'il avait entreprise. Il est à espérer cependant que cette dernière partie de son œuvre ne sera pas abandonnée, les deux terribles catastrophes qui ont suivi de si près les tremblements de terre de la Ligurie et de la Provence semblant devoir donner raison à sa théorie.

Les travaux dont nous venons de donner une analyse succincte constituent la partie principale de l'œuvre de M. de Chancourtois; il serait injuste de ne pas accorder au moins une mention rapide à des publications moins

techniques, mais où éclate, avec une vivacité toute spéciale, ce besoin d'abstraction, de généralisation et de classification qui caractérisent ses travaux didactiques.

A ce titre, nous devons citer, en premier lieu, cette communication originale faite à la Société géologique, aux jours les plus sombres du siège de Paris, pour affirmer les *Relations intimes qui existent entre le caractère des peuples et leur habitat géologique*, idée féconde, dont Élie de Beaumont avait magistralement formulé le principe dans l'Introduction à la carte géologique, à propos des races qui se développent aux deux pôles du sol de la France, et qui recevait de M. de Chancourtois une intéressante mais douloureuse application. Les hordes immenses, qui envahissaient alors notre sol, ne pouvaient-elles pas, en effet, être comparées, dans leur monotonie puissante, à ces torrents diluviens, implacables et gigantesques dont les dépôts recouvrent les plaines qui bordent la Baltique, c'est-à-dire précisément le berceau de la race prussienne et de cette noblesse au caractère rigide qui l'a conduite à de si hautes destinées?

Dans cette même période douloureuse, et tout en remplissant modestement son devoir dans les rangs de la garde nationale, M. de Chancourtois utilisait ses loisirs en essayant de donner aux armées de province les cartes topographiques qui leur faisaient absolument défaut.

On sait qu'à cette époque le Dépôt de la guerre n'admettait, pour ses publications, ni les reports sur pierre, ni les reproductions typographiques. D'autre part, les planches en cuivre, qui, seules, eussent permis de fournir des exemplaires de la carte au 80.000<sup>e</sup>, avaient été, dès nos premiers désastres, déposées en lieu sûr, de telle sorte qu'elles ne purent jamais être mises à la disposition du gouvernement de la Défense nationale. M. de Chancourtois imagina, pour essayer de combler cette lacune, d'utiliser les reports sur pierre, exécutés par l'Imprimerie

Impériale pour la publication des cartes géologiques départementales et, dès le mois de décembre, le service des ballons put emporter, par-dessus les batteries de l'assiégeant, de nombreux exemplaires des cartes d'une partie au moins des départements qui étaient alors le théâtre de la lutte suprême (\*).

Enfin, comment ne pas dire, en terminant, un mot de cette curieuse étude sur la *Constitution systématique d'un alphabet universel*, qui n'est autre chose qu'une classification complète et rationnelle des sons et dans laquelle M. de Chancourtois a devancé les travaux du savant linguiste américain Bell sur la Phonétique, travaux si populaires aujourd'hui aux États-Unis et en Angleterre?

Ce problème de la classification et de la prononciation universelle des lettres présente, pour les Sciences géographiques et subsidiairement les études géologiques, un intérêt toujours croissant, puisqu'il est le prolégomène obligé de l'écriture et de la prononciation des noms propres en géographie.

En le réduisant à ses véritables termes, et en montrant qu'il n'y avait, dans tous les idiomes dont l'homme fait usage pour exprimer sa pensée, que cinq groupes de trois consonnes chacun et un nombre égal de voyelles simples, tous les autres sons spéciaux à certaines langues pouvant être dérivés des premiers par une série de modifications rationnelles et constantes, M. de Chancourtois a posé les bases de la solution définitive de cet intéressant problème et rendu aux Sciences géographiques un service dont tous ceux qui s'occupent de cartographie comprendront la haute importance.

---

(\*) Nous sera-t-il permis de dire que nous avons eu la douloureuse satisfaction de distribuer, après les avoir complétées de notre mieux, en notre qualité de chef du Génie civil et du Service topographique du 16<sup>e</sup> corps d'armée, un certain nombre de ces cartes aux officiers de la 2<sup>e</sup> armée de la Loire?

Tous les ouvrages dont nous venons de parler reflètent, à des titres divers, mais avec une égale netteté, les traits caractéristiques de la tournure d'esprit de M. de Chancourtois. Peu d'auteurs se sont peints aussi fidèlement que lui dans leurs écrits, qui tous portent l'empreinte d'un esprit élevé et d'une sorte d'aristocratie de la pensée. Les questions y sont toujours abordées par leur côté le plus général et traitées avec une hauteur de vues, une netteté et une systématisation exceptionnelles, car M. de Chancourtois n'abandonnait les problèmes que lorsqu'il les avait présentés sous toutes leurs faces, lorsqu'il en avait montré toutes les conséquences et toutes les applications, lorsqu'il était arrivé à en donner, dans une forme concise, une solution aussi complète que systématique.

Un pareil résultat ne s'obtient que par un travail patient et acharné; et tous ceux qui ont eu le bonheur d'être, à un degré quelconque, les collaborateurs de M. de Chancourtois savent avec quelle sévérité pour son œuvre il se livrait à ce *labor improbus* dont parle Virgile et avec quelle inépuisable patience il mettait en pratique le précepte de Boileau :

Vingt fois sur le métier remettez votre ouvrage.

Aussi tous ses écrits ont-ils ce caractère de *fini* qui en rend la lecture de plus en plus instructive à mesure que l'on s'en pénètre davantage. Il est impossible de les parcourir à la légère et surtout d'une manière incomplète; mais un lecteur superficiel seul peut être tenté de se montrer sévère à l'égard d'un style où chaque mot porte, parce que chaque expression est pesée, et où chaque pensée est un chaînon nécessaire conduisant de celle qui la précède à celle qui la suit.

Toutes les qualités d'ordre, de généralisation et de méthode que M. de Chancourtois a déployées dans ses

écrits se retrouvent dans les diverses entreprises à la direction desquelles il a pris une part prépondérante.

Telles sont notamment, au début de sa carrière d'ingénieur, la création déjà mentionnée de la *Collection des gîtes de substances utiles*, et celle de la *Collection dite départementale* à l'École des mines, collections encore uniques en Europe, dans lesquelles ont été appliqués, pour la première fois, les principes de classification si féconds établis par M. Le Play et qui unissent l'une et l'autre, dans une heureuse mesure, les données scientifiques et techniques les plus précises aux renseignements statistiques et économiques les plus utiles et les plus pratiques.

Tel fut aussi son enseignement à l'École des mines, qu'il s'efforça de maintenir à une hauteur scientifique sans cesse croissante. Pas plus que ses écrits, son cours n'était utile ni même accessible à des auditeurs distraits ou intermittents; mais ses élèves sérieux savent quel profit durable et sans cesse croissant, à mesure qu'ils avaient à en faire l'application dans leur carrière d'ingénieur, ils ont tiré de cet enseignement puissamment synthétisé qui abordait et résolvait, dans la mesure du possible, tous les grands problèmes des sciences géologiques.

Pourtant cet enseignement, en général si austère, prenait des allures plus familières et s'illuminait, en quelque sorte, de clartés soudaines, sans rien perdre de son élévation, quand M. de Chancourtois le transportait de l'amphithéâtre sur le terrain, dans ces courses géologiques dont l'institution, à l'École des mines, est due à son initiative et dans lesquelles il savait devenir, pour ses élèves, un compagnon plein d'entrain et un guide aussi bienveillant qu'infatigable, tout en restant pour eux le maître admiré, aimé et respecté.

Telle fut enfin cette Exposition de 1867, où sa qualité

de *Secrétaire de la Commission impériale* lui permit de contribuer puissamment à la réalisation pratique des idées de classification systématique de M. Le Play, alors Commissaire général, classification qui a imprimé à cette immense manifestation industrielle le cachet d'ordre et d'unité qui l'ont distinguée de toutes les autres Expositions universelles. Elle permit, en outre, à M. de Chancourtois de donner une consécration éclatante à ses idées favorites d'unification par la création du *Pavillon des mesures et des monnaies*, qui, placé au centre même de l'exposition, était en quelque sorte la glorification du système métrique; et M. de Chancourtois avait insisté pour que la pensée philosophique, qui avait présidée à l'installation de ce pavillon, fût symbolisée par cette inscription tracée en lettres d'or sur la coupole du petit édifice : *Omnia, o Deus, fecisti ex numero, mensurâ et pondere.*

Enfin, dans le même ordre d'idées, la création du « Jury spécial », qui avait été proposé par M. Le Play pour répondre aux idées humanitaires de l'Empereur Napoléon III et à la réalisation duquel M. de Chancourtois a été associé dans une large mesure, lui fournit l'occasion d'affirmer son désir de voir la glorification du travail, de la puissance et des intérêts matériels de l'Humanité, couronnée et en quelque sorte rehaussée par la récompense des vertus sociales et des qualités d'ordre purement moral.

Cette période de l'Exposition de 1867 fut le point culminant de la carrière de M. de Chancourtois.

Nommé ingénieur en chef de 1<sup>re</sup> classe le 5 janvier, Commandeur de la Légion d'honneur à la grande cérémonie du 1<sup>er</sup> juillet, puis, l'année suivante, Sous-Directeur du service définitivement constitué de la Carte géologique, il semblait destiné à achever, dans des conditions exceptionnelles, une carrière aussi brillamment inaugurée. Il lui eût été facile de recueillir, lors de la

mise à la retraite administrative d'Élie de Beaumont, survenue presque au moment de la constitution du service de la carte, une succession qui lui fut même un instant offerte et que nul, à ce moment, n'aurait pu lui disputer. Il préféra user de toute son influence pour faire conserver à son maître l'intégrité de sa situation scientifique et rester modestement au second rang.

Et lorsque, plus tard, ce désintéressement tourna contre lui-même, lorsque sa fidélité à toutes les affections scientifiques et politiques de sa jeunesse et de son âge mûr devint un obstacle à la réalisation de ses aspirations en apparence les plus légitimes, il sut, avec une dignité suprême, reprendre un rang plus modeste et se remettre avec une intensité nouvelle à ses travaux scientifiques.

C'est qu'il avait non seulement une grande intelligence, mais encore une âme haute et noble que les déceptions de la vie pouvaient frapper douloureusement, mais dont elles étaient impuissantes à ébranler l'indomptable énergie.

Il resta jusqu'au bout le travailleur infatigable, l'homme de devoir et de dévouement, aimant ses élèves, et donnant sans réserve son temps et ses forces à ceux qui, de près ou de loin, étaient placés sous ses ordres ou sous sa juridiction. Il était guidé et soutenu dans cette voie par un sentiment religieux très élevé et il aimait à répéter avec M. Le Play : « Tous les efforts de l'homme vers un équilibre social stable sont contenus dans le Décalogue », paroles auxquelles il ajoutait cette pensée plus personnelle : « Toutes les aspirations de l'homme vers le bonheur et l'éternelle vérité sont renfermées dans le *Pater* et dans le *Credo*. »

Aussi, quand la maladie vint le frapper et lui donner un redoutable avertissement, ne put-elle altérer ni son courage ni sa sérénité. Il eut, d'ailleurs, la joie suprême d'être nommé, en 1885, peu après sa promotion au grade

d'Inspecteur général de 1<sup>re</sup> classe, Président de la Commission de la Carte géologique, et il rêvait de concilier les idées qui lui étaient chères avec les faits acquis dans ce service à la création duquel il avait tant contribué.

La mort est venue le surprendre avant même qu'il ait pu essayer de réaliser son rêve. Il mourut à son poste, laissant à ses disciples et à ses amis l'enseignement d'un grand exemple et le modèle d'une vie noblement consacrée à la poursuite du vrai et du bien.

Qu'il nous soit permis de citer en terminant, une profession de foi qui a servi d'introduction dédicatoire au premier exemplaire de la *Vis tellurique*, offert au prince Napoléon, et qui, demeurée inédite, nous a paru mériter d'être connue et publiée comme un résumé fidèle de ses aspirations et de ses espérances :

« Si l'idée de l'absolu procède de notre force, toute prétention à le posséder est un signe éclatant de notre faiblesse.

« L'absolu, dans le repos, c'est le *néant*, dans le mouvement c'est l'*être*, deux mots qui commandent l'adoration du Créateur, unique Maître de la Vérité. Entre ces deux termes, également insaisissables, de notre vie, il nous est donné de façonner des simulacres de la Nature, profitables ou concrets, abstraits ou amusants; mais de l'imitation matérielle jusqu'à la formule mathématique, tout n'est qu'approximation, approximation grossière dans ses plus-exquises finesses, mesquine dans ses plus vastes portées.

« Ingénions-nous bien à construire, à étager ces petites cases où nous voudrions distribuer, enfermer toutes les choses de notre monde, dans le but — disons-nous — de les utiliser ensuite pour le bien public, d'après nos lois, nos règles les plus savamment élucubrées, mais

avec le désir plus ou moins dissimulé d'en disposer à notre gré, à notre fantaisie, à notre bon plaisir, sans peine surtout; et, après ces superbes combinaisons, la moindre sensation, la moindre connaissance, la moindre pensée nouvelle, viendra bouleverser l'édifice d'une ambition dont l'activité, soyons francs, confine à la paresse.

« L'homme le plus passionné, le plus infatué de ses œuvres, devra reconnaître qu'il a tracé un échiquier, inventé la marche d'un jeu aussi éloigné des phénomènes naturels supposés régentés, que son libre arbitre, son pouvoir éphémère et subordonné différent de la Toute-Puissance éternelle.

« Établir à travers l'arbre de la Science des rampes ou des échelles, telle est la destinée de l'homme d'étude dédaigneux des gains vulgaires. Être persuadé de l'infirmité de ses efforts, telle est sa condition de sagesse, car, à quelque niveau qu'il atteigne, en s'élevant par la théorie ou en approfondissant la pratique, le génie même qui l'y aura porté lui fera percevoir au delà un plexus de branches ou de racines défiant l'énergie de sa persévérance, l'audace de son imagination. Qu'il travaille néanmoins sans découragement. Par cela même que les ramifications sont illimitées et enchevêtrées à l'infini, la fécondité est inépuisable. Partout des fleurs, des fruits le paieront de ses labeurs et, pourvu qu'il ne détruise pas sa récolte dans le fol espoir d'y surprendre le secret de la naissance et de la mort, chacune de ses explorations ne sera-t-elle pas un bonheur pour lui, un bienfait pour l'humanité? »

## OUVRAGES DE M. DE CHANCOURTOIS.

### Comptes rendus de l'Académie des sciences.

1844. Exploration géologique d'une partie très peu connue de la Turquie d'Asie.
1845. 17 novembre. — Sur la nature des eaux du lac de Van et du natron qu'on en retire.
1860. 10 septembre. — Sur la distribution des minerais de fer.
1861. 1<sup>er</sup> juillet. — Tableaux d'altitudes préparés à l'usage de l'École des mines.
1862. 18 août. — Essai sur la distribution des gîtes minéraux par alignements parallèles aux directions des systèmes de montagnes dans le tiers nord-est de la France.
1862. 7 avril. — Mémoire sur un classement naturel des corps simples ou radicaux dit *Vis tellurique*.  
21 avril. — Addition au mémoire présenté à la séance du 7 avril.  
5 mai. — Addition à la note du 21 avril.  
13 octobre. — Tableau de classement naturel des corps simples.
1863. 9 février. — Application de la vis tellurique dans la théorie de l'acier.  
16 mars. — Suite et application de la vis tellurique au thallium.  
17 août. — Troisième partie du mémoire sur le Réseau pentagonal.  
24 août. — Application du Réseau pentagonal à la coordination des sources de pétrole et des dépôts bitumineux.  
2 novembre. — Continuation du mémoire du 17 août.
1866. 25 juin. — Note sur la production naturelle et artificielle du diamant.
1869. 41 janvier. — De l'interprétation des imaginaires en physique mathématique.
1871. 16 janvier. — Lettre à M. Élie de Beaumont à l'occasion des premiers obus qui ont frappé l'École des mines.
1873. 3 novembre. — Présentation d'une carte du globe en projection gnomonique sur le Réseau pentagonal superposé, accompagnée d'une notice explicative.
1874. 23 mars. — Programme d'un système de géographie fondé sur l'usage exclusif des mesures décimales, d'un méridien 0<sup>es</sup> international et des projections stéréographiques et gnomoniques.  
8 novembre. — Mémoire sur la classification chronologique des formations.  
16 novembre. — Discours prononcé aux funérailles d'Élie de Beaumont.
1876. 4 décembre. — Note sur l'intervention du cyanogène dans la minéralisation du fer.
1878. 14 janvier. — Imitation automatique des chaînes de montagnes sur un globe, d'après le principe de la théorie des soulèvements.

1883. 15 janvier. — Observations au sujet de la circulaire des États-Unis concernant l'adoption d'un méridien initial commun et d'une heure universelle.  
 30 avril. — Sur un moyen de prévoir les dégagements de grisou.  
 25 juin. — Sur un moyen de constater par enregistrement continu les petits mouvements de l'écorce terrestre.  
 13 août. — Sur les moyens employés pour constater, par enregistrement continu, les petits mouvements de l'écorce du globe.

#### Annales des mines.

1846. Notice sur la fabrication du cuivre à Szaska dans le Banat.  
 Notice sur le traitement des minerais de cuivre et d'argent et sur la séparation par amalgamation de l'argent contenu dans le cuivre noir à Tsklova, dans le Banat.  
 1871-1882. *Septième série.*  
 Tome V. — Système et mode d'application de la légende géologique générale de la carte géologique détaillée de la France.  
 Tome VI. — Discours prononcé aux funérailles d'Élie de Beaumont.  
 Tome VIII. — Instruction pour la pratique du dessin géométrique sur la sphère et sur son application en géographie et en géologie.  
 Tome XII. — Exploration géologique du Canada. (Extrait du rapport du directeur du *Geological Survey*.)  
 Tome XIX. — Discours prononcé aux funérailles de M. Bonnefoy.  
 — *Huitième série.*  
 Tome VII. — Discours prononcé aux funérailles de M. Lan.  
 — De l'étude des mouvements de l'écorce terrestre.

#### Bulletin de la Société géologique.

- 1862-1863. Tome XX. — Observations au sujet de la carte géologique de la Haute-Marne de M. Duhamel.  
 — Présentation de la vis tellurique avec explications.  
 1870-1871. Tome XXVIII. — Observations sur une communication de M. Parran, tendant à faire ressortir le rôle des phénomènes d'émanation et, par suite, l'importance de la prise en considération des alignements géologiques dans l'étude des gîtes de combustible.  
 — Rapports de l'ethnologie avec la géologie et l'ethnographie.  
 — Sur la corrélation des formations éruptives et des formations sédimentaires et sur les conséquences de cette corrélation, notamment sur les rapports de l'aragonite et des travertins.  
 1874-1872. Tome XXIX. — Sur les masses de fer métallique d'Ovifak.  
 — Sur l'origine du fer de Pallas et de celui du Groenland.  
 — Sur la théorie des soulèvements.  
 1872-1873. Tome I. — Présentation d'une boussole d'alignement.  
 1873-1874. Tome II. — Carte du globe en projection gnomonique avec le Réseau pentagonal superposé.

- 1873-1874. Observations sur une note de M. Michel Lévy, sur une classe de roches éruptives intermédiaires entre les granites porphyroïdes et le groupe des granulites.  
 — Observations sur une note de M. Parran sur les gîtes de fer oxydulé des environs de Cogné (Piémont).  
 1874-1875. Tome III. — Présentation des documents parus de la carte géologique de France.  
 — Observations sur une note de M. Tombeck, sur les puits naturels du terrain portlandien de la Haute-Marne.  
 — Observations sur une note de M. Gaudry, sur la découverte des batraciens dans le terrain primaire.  
 — Observations sur une note de M. Daubrée, sur l'association dans l'Oural du platine natif à des roches à base de péridot et sur les relations d'origine de ce métal et du fer chromé.  
 — Sur le Réseau pentagonal d'Élie de Beaumont.  
 — De la régularisation des travaux géologiques.  
 1875-1876. Tome IV. — Observations sur l'exploration géologique du Pas-de-Calais et sur la question du tunnel sous-marin.  
 1876-1877. Tome V. — Sur les roches dites plutoniques de l'Ardenne française.  
 — Note sur l'intervention du cyanogène dans la minéralisation du fer.  
 — Note sur la question du fer natif.  
 1877-1878. Tome VI. — Compte rendu d'une excursion à Vernon.  
 — Note sur les alignements géologiques dans les environs de Vernon.  
 1878-1879. Tome VII. — Note sur les reliefs du globe terrestre.  
 — Observations sur les alignements géologiques.

#### Bulletin de la Société de géographie.

1874. Tome VII. — Carte du globe en projection gnomonique avec le Réseau pentagonal superposé.  
 — Carte en projection gnomonique sur les 8 faces d'un octaèdre régulier circonscrit.  
 Tome VII. — Programme raisonné d'un système de géographie, fondé sur l'usage des mesures décimales d'un méridien 0° international et des projections stéréographiques et gnomoniques.  
 1875. Tome IX. — Lettre de M. de Chancourtois sur la carte géologique détaillée de la France.  
 1880. Tome XIX. — De l'unification des travaux géographiques et géologiques.  
 — A propos de la proposition d'un méridien unique.  
 — De l'unification et de la graduation des longitudes et de la mesure du temps au point de vue de l'adoption du système métrique complet.  
 1884. Présentation de l'ouvrage intitulé : « Programme raisonné d'un système de géographie, etc... ».

**Congrès international de géologie en 1878 à Paris.**

1878. Septembre. — Etude des alignements orographiques, hydrographiques et stratigraphiques.  
 De l'unification des travaux géologiques en général et particulièrement en ce qui concerne les figurés conventionnels.  
 Discussions des règles à adopter pour la rédaction d'un dictionnaire de géologie.  
 Excursion de Vanves, Meudon et Bellevue.  
 Excursion de Vernon, Courcaille et le château de la Madeleine.

(1875)  
**Congrès de géographie en 1878 à Paris.**

- Alignements.  
 Cartes géographiques, systèmes de projection.  
 Transcription des noms géographiques en lettres de l'alphabet latin avec une planche.

**Congrès géologique international de Bologne en 1881.**

- Sur la classification des masses minérales. Tableau.  
 Tableau de classification lithologique.  
 Sur l'unification du coloriage.

**Congrès international de Venise en 1881.**

- Tome II. — L'adoption d'un méridien initial international.  
 — De l'unification des cartes géologiques et des cercles d'alignement.

**Ouvrages présentés à différentes expositions**

(Vienne, Philadelphie, Madrid, Melbourne).

- De la régularisation des travaux de géologie, de l'association des études de géologie, d'hydrologie et de météorologie, et de l'institution d'un relevé topographique et physique du territoire à l'échelle cadastrale de 1/10.000. Paris, 1873.  
 Tableau des formations sédimentaires avec indications des couleurs pour la récurrence du spectre.  
 Études sur les alignements géologiques, orographiques, hydrographiques et stratigraphiques.

BULLETIN.

**STATISTIQUE DE LA PRODUCTION DES MINES ET DES USINES  
 DANS LA SILÉSIE PRUSSIENNE EN 1886.**

**Charbonnages.**

Les charbonnages, au nombre de 71, possèdent 604 machines à vapeur dont la force nominale totale est de 51.874 chevaux vapeur.

Ces machines se divisent ainsi qu'il suit :

	Nombre.	Force en chevaux
Machines d'extraction. . . . .	147	15.247
— d'exhaure. . . . .	185	30.917
— diverses. . . . .	272	5.710

Le nombre des chevaux affectés au service des mines est de 1.343.

Les ouvriers sont au nombre de 40.586; et ce nombre total comprend :

Hommes . . . . .	36.731
Femmes . . . . .	3.855

Les salaires distribués s'élevaient à 22.018.526 marks; ce qui correspond à 542<sup>m</sup>,57 par ouvrier.

La production totale est de 12.864.882 tonnes, représentant une valeur de 47.426.666 marks; et la part afférente au salaire dans le prix du produit extrait est 46,43 p. 100.

La valeur moyenne de la tonne est de 3<sup>m</sup>,688; elle était de 3<sup>m</sup>,71 en 1885.

La production par tête d'ouvrier est de 317 tonnes et l'extraction de 242 tonnes par cheval vapeur.

Les proportions des diverses sortes de charbons sont indiquées dans le tableau suivant :

Tome XI, 1887.

CATÉGORIES DES CHARBONS désignées PAR LES NOMS ALLEMANDS	NOMBRE de tonnes	PROPORTION p. 100 de l'extraction
Stückkohle . . . . .	3.197.729	24,94
Würfelskohle . . . . .	1.564.026	12,46
Nusskohle . . . . .	1.320.715	10,25
Griesskohle et Erbsenkohle . . . . .	806.496	6,24
Förderkohle . . . . .	764.986	5,94
Kleinkohle . . . . .	3.424.029	26,68
Staub- et Grusskohle . . . . .	1.746.275	13,56
Schieferkohle . . . . .	40.628	0,31

Une partie des charbons a été consommée par les houillères ou conservée en stock; une autre partie a été consommée par les usines de la région; et la dernière partie expédiée hors du bassin.

Consommation des houillères . . . . .	1.213.534 tonnes
Stock . . . . .	480.370 —
Consommation des usines à zinc . . . . .	803.332 —
— — à fer . . . . .	1.938.642 —
Expédié par voies ferrées . . . . .	8.337.390 —
— eau . . . . .	53.307 —

L'industrie du fer consommait en 1882 18,5 p. 100 de la production totale; cette production est maintenant tombée à 15 p. 100.

L'exportation en Autriche-Hongrie a constamment augmenté dans ces dernières années; elle s'est élevée

	Pour la houille.	Pour le coke.
En 1882 à . . . . .	2.096.779 tonnes	59.820 tonnes
1883 . . . . .	2.315.212 —	67.606 —
1884 . . . . .	2.382.613 —	68.859 —
1885 . . . . .	2.484.665 —	68.311 —
1886 . . . . .	2.605.317 —	76.133 —

### Mines de fer.

Le nombre des mines est de 42, possédant en tout 7 machines à vapeur dont la force totale est de 78 chevaux.

Le nombre total des ouvriers s'élève à 3.069, comprenant :

Hommes . . . . .	1.790
Femmes . . . . .	1.279

Il a été distribué 951.898 marks de salaires, soit 310<sup>m</sup>,47 par ouvrier.

La production totale de 658.603 tonnes représente une valeur de 1.840.656 marks.

### Mines de zinc et de plomb.

Ces mines, au nombre de 30, emploient 7.310 hommes et 2,667 femmes, soit en tout 9.977 personnes.

Le total des salaires s'élève à 4.148.403 marks, ce qui correspond à 425<sup>m</sup>,82 par ouvrier.

La production est de :

Calamine et blende . . . . .	571.270 tonnes
Pyrite . . . . .	2.083 —
Galène . . . . .	29.286 —

### Hauts fourneaux.

47 hauts fourneaux se répartissent dans 12 usines; 29, et à la fin de l'année 24 seulement, étaient en feu.

Ils nécessitent 131 machines à vapeur représentant une force nominale de 11.373 chevaux.

Le personnel qu'ils occupent comprend 2.839 hommes et 713 femmes; en tout 3.552 personnes.

Les salaires s'élèvent à 2.015.920 marks, soit 568<sup>m</sup>.05 par ouvrier.

La production totale égale à 371.453 tonnes se répartit comme il suit :

Fonte à puddler . . . . .	289.653 tonn.	} (77,78 p. 100 de la production totale).
— de moulage . . . . .	20.161 tonnes	
— d'affinage Bessemer . . . . .	19.960 —	
— — Thomas . . . . .	42.612 —	

La valeur totale de la fonte produite s'élève à 17.048.114 marks, ce qui donne 45<sup>m</sup>,78 pour la valeur moyenne de la tonne.

337.009 tonnes sont consommées en Allemagne;	
612 — — en Autriche;	
64.138 — — en Russie.	

### Fonderies.

Les fonderies, au nombre de 22, possèdent 33 cubilots et 10 réverbères.

On y trouve 27 machines à vapeur dont la force totale est de 526 chevaux, et 8 roues hydrauliques dont la force totale est de 110 chevaux.

Les ouvriers au nombre de 1.330 touchent 788.434 marks de salaires; soit en moyenne 502<sup>m</sup>,90 par tête.

La production s'élève à 21.578 tonnes représentant 2.914.861 marks; la valeur moyenne de la tonne est donc de 135<sup>m</sup>,50.

### Usines à fer.

#### I. Fabrication du fer puddlé.

On trouve dans 14 usines :

- 256 fours à puddler;
- 143 fours à réchauffer;
- 43 fours à souder.

Le travail des loupes et des paquets s'effectue avec 62 marteaux à vapeur et 13 laminoirs.

Pour les transformations en barres, tôles, fils, etc., existent :

- 23 laminoirs dégrossisseurs;
- 19 — finisseurs;
- 5 — à tôle;
- 6 — pour petits fers;
- 1 — pour fils de fer.

Tous ces appareils sont mus par 166 machines à vapeur représentant une force nominale de 10.545 chevaux, et 2 roues hydrauliques dont la force totale est de 95 chevaux.

8.488 hommes et 385 femmes y sont employés, en tout 8.573 personnes.

Le total des salaires s'élève à 5.260.290 marks, soit 613<sup>m</sup>,39 par ouvrier.

Les résultats de la fabrication comprennent 4.738 tonnes de produits non finis et 200.464 tonnes de produits finis. Si on y joint 4.300 tonnes de tuyaux provenant des laminoirs de Gleiwitz, on arrive à la production totale de 209.500 tonnes, représentant 20.972.011 marks. Cela porte la valeur moyenne de la tonne à 104<sup>m</sup>,61.

La consommation de combustible par tonne de produits finis est de 2<sup>m</sup>,84.

#### II. Fabrication du fer fondu.

Les différents fours de fusion sont répartis dans 3 usines, et ils comprennent :

- 16 fours à réverbère;
- 10 cubilots;
- 4 fours Martin;
- 2 convertisseurs Bessemer;
- 3 convertisseurs Thomas.

Pour le travail mécanique des lingots, on trouve

- 7 marteaux à vapeur;
- 2 laminoirs à rails;
- 1 train pour les tôles de chaudières
- 1 train pour tôles fines;
- 2 laminoirs à bandages;
- 1 laminoir universel.

Ces diverses machines sont mues par 31 machines à vapeur dont la force totale est de 8.057 chevaux.

Les ouvriers, au nombre de 1.454, reçoivent 984.186 marks de salaires, soit en moyenne 677<sup>m</sup>,80 par tête.

Les usines livrent 1.966 tonnes de produits non finis et 46.428 tonnes de produits finis, dont la valeur totale est de 5.666.110 marks, soit en moyenne 117<sup>m</sup>,09 par tonne.

Par tonne de produits finis, les consommations sont de :

Fonte, riblons, spiegel, etc. . . . .	1 <sup>m</sup> ,456
Combustible . . . . .	1 569

La production par ouvrier est de 33<sup>m</sup>,03.

#### III. Fabrication des fils, chaînes, tuyaux, etc.

Les usines livrent 21.533 tonnes de produits finis représentant une valeur de 3.850.000 marks.

#### IV. Feux de finerie.

2 feux de finerie occupent 16 ouvriers recevant en moyenne par tête 456 marks.

La production est de 426 tonnes, représentant 73.252 marks.

### Usines à zinc.

#### I. Production du zinc brut.

Les usines, au nombre de 23, renferment :

- 112 fours ordinaires en feu avec 2.628 cornues;
- 381 fours à gaz avec 14.748 cornues.

On consomme 148.046 cornues, et la production moyenne du zinc par cornue est de 556 kilogrammes.

4.530 hommes et 1.624 femmes, soit en tout 6.174 personnes y sont employées. Elles reçoivent 3.547.580 marks, soit en moyenne 574<sup>m</sup>,60 par tête.

La production est de :

Zinc brut . . . . .	82.712 <sup>m</sup> ,00
Cadmium . . . . .	4 ,96
Plomb . . . . .	666 ,00

et la valeur totale des produits s'élève à 21.386.358 tonnes, soit 256<sup>m</sup>,49 par tonne.

### II. Fabrication du blanc de zinc.

2 usines avec 15 fours et 51 cornues produisent 3.770 tonnes de blanc de zinc, dont la valeur est de 1.049.142 marks.

On consomme 706 cornues, et les ouvriers au nombre de 75 reçoivent 55.039 marks, soit en moyenne 600<sup>m</sup>,52 par tête.

### III. Fabrication des tôles de zinc.

Cette fabrication se fait dans 4 usines, comprenant :

- 41 fours de fusion;
- 4 fours de réchauffage;
- 6 laminoirs simples;
- 6 laminoirs doubles;
- 15 cisailles.

La force motrice est de 1.160 chevaux fournis par 11 machines à vapeur. Il faut y ajouter une force hydraulique de 390 chevaux. 304.408 marks sont distribués aux 495 ouvriers.

Les produits finis comprennent :

Tôles de zinc . . . . .	25.066 tonnes
Plomb . . . . .	560 —
Oxyde de zinc et résidus . . . . .	279 —

La valeur totale est de 7.472.970 marks, soit 292<sup>m</sup>,72 par tonne de tôle.

### Usines à plomb et à argent.

On compte seulement 2 usines de cette espèce, et on y trouve :

- 13 fours à cuve;
- 5 fours de grillage;
- 24 chaudières de désargentation;

- 4 fours de coupellation;
- 2 fours d'affinage de l'argent.

9 machines à vapeur donnent une force motrice de 110 chevaux. Les usines occupent 669 ouvriers auxquels elles distribuent 435.930 marks de salaires, soit en moyenne 651<sup>m</sup>,61 par tête.

Les produits comprennent :

Plomb . . . . .	20.879 tonnes
Litharge . . . . .	2.489 —
Argent . . . . .	11.842 kilogr.

et leur valeur s'élève à 7.070.373 marks.

On a d'ailleurs comme valeur moyenne :

De la tonne de plomb et de litharge . . . . .	234 <sup>m</sup> ,56
Du kilogramme d'argent . . . . .	134 ,20

### Usines à coke.

On compte 20 usines avec 168 batteries et 1.858 fours. Les ouvriers, au nombre de 1.832, reçoivent 860.281 marks, soit en moyenne par tête 469<sup>m</sup>,38.

On consomme 1.481.577 tonnes de houille, et on produit :

Gros coke . . . . .	620.206 tonnes
Menu — . . . . .	20.738 —
Cendres de fabrication du coke ( <i>Cynder</i> ) . . . . .	93.803 —

Tableau résumé de la statistique de l'industrie minière et métallurgique dans la Silésie prussienne.

	PRO- DUCTION totale en tonnes	VALEUR des produits en marks	NOMBRE d'ou- vriers	SALAIRES	
				distribués (en marks)	moyens (en marks)
Charbonnages et mines métal- liques . . . . .	14.126.124	56.066.464	53.632	27.818.829	505,64
Industrie du fer et de l'acier . . . . .	710.836	51.644.255	16.688	10.000.722	599,28
— du zinc, plomb et ar- gent . . . . .	136.428	36.978.843	7.413	4.332.975	584,52
Fabrication du coke . . . . .	744.747	"	1.832	860.281	469,58
Totaux . . . . .	15.718.135	144.689.562	79.565	42.312.789	544,27

(Extrait par M. L. BABU, ingénieur des mines, du journal autrichien « Zeitschrift für Berg-und Hüttenwesen ».)

## LES MINES DE CHARBON DE LA NOUVELLE-CALÉDONIE.

Une Commission spéciale a été instituée, en Nouvelle-Calédonie, pour étudier les gisements houillers signalés sur plusieurs points de la colonie et formuler un avis sur leur valeur.

Les rapports de cette Commission, dite Commission de recherche des gisements houillers, signalent l'existence de trois lambeaux de terrain carbonifère :

1° Le terrain carbonifère du Mont-d'Or;

2° Celui de la presqu'île de Nouméa, de la Dumbéa et de Païta;

3° La formation houillère du bassin de Moindou et de Voh.

Ces mots, *terrain carbonifère* et *formation houillère*, ne sont pris ici, d'ailleurs, que dans le sens de terrain et formation renfermant du charbon ou de la houille; car, au point de vue géologique, l'âge de ces dépôts n'est pas encore définitivement fixé, et il est plus probable, d'après les études de M. Heurteau, qu'ils appartiennent à la période secondaire qu'à la période paléozoïque.

1° *Terrain carbonifère du Mont-d'Or.* — Le terrain carbonifère qui s'étend au pied du grand massif serpentineux du Mont-d'Or n'est qu'un étroit bourrelet suivant le rivage de la mer. On y trouve trois couches de charbon de peu d'étendue; la couche de la *Hulla*, presque verticale, bute très probablement en profondeur contre les serpentines sous-jacentes à la formation carbonifère; celle de la *République*, affleurant sur le rivage, plonge immédiatement dans la mer; celle de l'*Angelo* va manifestement buter, non loin de son affleurement, contre les serpentines. Ces couches sont inexploitable, soit à cause de leur impureté, soit à cause de leur faible puissance.

2° *Formation houillère de la presqu'île de Nouméa, de la Dumbéa et de Païta.* — Le terrain carbonifère s'appuie du côté de la mer sur une importante formation calcaire et schisteuse, remarquable par la présence de calcaires lithographiques et de bancs d'argile versicolore empâtant des cristaux de gypse; de l'autre côté il vient buter sur les massifs serpentineux du Malaoui, du Koghi, du Pidjitéré, de la Kouvelé et du Mont-Mou. Les gisements de la vallée de la Dumbéa et du bassin de Païta sont

sans importance (gisements des *Bruyères*, de la *Geôle*, de l'*Angèle*, de la *Plaine des Cailloux*, du *Mont-Béré*, de l'*Aurore*); seul, le gisement des *Portes-de-Fer* ou mine *Sainte-Cécile* a fixé l'attention de la Commission, qui y a fait exécuter plusieurs recherches.

Le gisement des *Portes-de-Fer* est situé à 4 kilomètres environ de Nouméa, dans une formation de grès qui apparaît au-dessus des roches métamorphiques de Montravail et qui occupe toute la vallée du Cimetière. Ces grès constituent également le col séparant cette vallée de Magenta. Les affleurements sont à peu près insignifiants, mais la houille fut découverte dans un puits creusé pour avoir de l'eau. Les recherches entreprises par la Commission ont abouti à une couche de 2 mètres de puissance qui a été suivie sur 10 mètres en direction. Le mur est net et son pendage varie de 35 à 45 degrés; il est formé par un schiste argileux et noduleux. Le toit, mal défini, consiste en lambeaux de grès rubanés de couleur claire, entre lesquels pénètre irrégulièrement le charbon. Celui-ci est un charbon anthraciteux, ou du moins un charbon maigre, qui manque un peu de cohésion et de solidité; cependant il est possible de séparer une proportion assez notable de morceaux solides du combustible déjà extrait. Tel qu'il est, ne renfermant, comme c'est le cas, que 6 à 7 p. 100 de cendres, il peut déjà servir à divers usages, tels que : la fabrication de la chaux; la cuisson des briques, et même le chauffage des chaudières à vapeur avec quelques soins spéciaux apportés à la conduite du feu.

Les essais faits à bord des navires de la station locale, particulièrement à bord du croiseur de 3<sup>m</sup>e classe le *Duchaffaut*, ont prouvé que ce charbon était suffisant pour le service de la flotte, et au moins équivalent au meilleur charbon d'Australie, sur lequel il a l'avantage de donner une fumée blanchâtre, peu abondante.

3° *Bassin houiller d'Ourail ou de Moindou.* — Ce bassin houiller comprend trois groupes d'affleurements désignés par les noms : *Loyalty*, *Bechtel*, *Heurteau*.

La couche *Loyalty* affleure sur le versant nord de la chaîne des collines élevées qui bordent la rive gauche de la rivière de Moindou. Sa direction est N. 115° E. et elle a pu être suivie sur plus de 200 mètres; son pendage est vertical. Le charbon, très friable, est assez pur; il n'y a que deux ou trois veines schisteuses intercalées dans la couche, dont la puissance est de 4 à

5 mètres. Les roches encaissantes sont des grès assez compacts au mur, et des schistes argileux tendres au toit. La Commission a fait exécuter une galerie de 37 mètres en direction, et les résultats n'ont pas été favorables, car le charbon tend à diminuer de puissance tout en restant aussi friable.

A une altitude un peu supérieure on a effectué différents travaux qui ont mis successivement à jour, en partant de la couche Loyalty et en gagnant progressivement des cotes de plus en plus élevées :

1° La couche *Carret*, de 1 mètre de puissance, charbon de bonne qualité, quoique assez friable;

2° Une couche brouillée;

3° La couche *Levat*, de 2 mètres de puissance et dirigée N. 60° O ;

4° La couche *Bechtel*, très saine, mais non encore suffisamment découverte.

Le groupe *Heurteau* (ainsi nommé en souvenir de l'ingénieur des mines qui a le premier étudié ce bassin) est situé sur la rive droite du Moindou dans le haut du ravin Foni-Tondé. Une longue tranchée a recoupé une formation carbonifère de 20 mètres de puissance comprenant une épaisseur totale de 6<sup>m</sup>,50 de charbon, en couches variant de 0<sup>m</sup>,50 à 2<sup>m</sup>,50. Le charbon, très friable, est sain d'aspect et paraît pur.

A Voh, l'on a reconnu plusieurs affleurements houillers, dont le principal est dirigé N. 35° E. avec un pendage presque vertical vers le N. O. et une puissance moyenne de 1<sup>m</sup>,20; le charbon y est sain et de bonne qualité, encaissé dans des schistes argileux. Il paraît probable, d'après la direction de ces affleurements et l'éloignement des serpentines, que le bassin houiller doit avoir dans cette région une étendue considérable.

*Analyses des houilles de la Nouvelle-Calédonie.*— Ces analyses, faites par M. Porte, pharmacien de la marine, sont résumées dans le tableau suivant, qui donne en outre, à titre de comparaison, l'analyse d'échantillons de houilles d'Australie.

PROVENANCES	MATIÈRES volatiles		CARBONE fixe	CENDRES	NATURE ou couleur des cendres	POUVOIR calorifique par la méthode de Berthier
	Eau hygroscopique	Gaz divers				
<b>Charbons de la Nouvelle-Calédonie.</b>						
Moindou, couche Loyalty . . . . .	6,00	18,00	74,23	1,77	Ferrugineuses	6.842 <sup>cal</sup>
Moindou, couche Levat . . . . .	1,90	5,50	86,50	7,00	Chamois	7.037
Voh, mine Thua-soïo . . . . .	1,00	8,00	69,50	21,50	Argileuses	6.023
Portes-de-Fer, mine Sainte-Cécile . . . . .	2,60	6,40	78,25	12,75	Grises	6.885
	3,00	14,50	75,80	6,70	Grises	7.049
	1,40	16,60	72,75	9,25	—	6.736
<b>Charbons d'Australie.</b>						
Mount-Kemble . . . . .	1,30	16,20	66,70	15,80	Argileuses	6.581
Newcastle . . . . .	3,30	22,20	65,30	9,00	Ferrugineuses	6.462

(Extrait par M. L. BABU, ingénieur des mines, des Rapports sur les mines de charbon de la Nouvelle-Calédonie.)

## TABLE DES MATIÈRES

DU TOME ONZIÈME.

## MINÉRALOGIE. — GÉOLOGIE.

	Pages
Expériences synthétiques sur l'abrasion; par M. <i>Thoulet</i> . . .	499

## MÉTALLURGIE. — MINÉRALURGIE.

Note sur l'état actuel de la mine et de l'usine d'Almaden (Espagne); par M. <i>Kuss</i> . . . . .	436
Recherches expérimentales sur la constitution des mortiers hydrauliques; par M. <i>H. Le Châtelier</i> . . . . .	345

## MÉCANIQUE. — EXPLOITATION.

Note sur les chemins de fer électriques dans les mines en Allemagne; par M. <i>F. Lebreton</i> . . . . .	5
Note sur des expériences de congélation des terrains; par M. <i>Alby</i> . . . . .	56
Note sur un accident survenu le 25 avril 1885 au puits de Fontanes, de la concession houillère de Rochebelle et Cendras, par suite d'un dégagement instantané d'acide carbonique; par M. <i>de Castelnau</i> . . . . .	87
Note sur un procédé d'exécution de travaux de sauvetage; par M. <i>Léon Lévy</i> . . . . .	417
Sur la théorie du planimètre d'Amsler; par M. <i>A. Thiré</i> . . .	121
Note sur l'établissement des canaux pour la création des chutes motrices; par M. <i>A. Thiré</i> . . . . .	132

	Pages
Note sur l'ozokérite, ses gisements, son exploitation à Boryslaw et son traitement industriel; par M. A. Rateau.	147
Note sur un système de rallumage intérieur des lampes de sûreté; par M. L. Janet.	191
Note sur le profil des cames des marteaux; par M. Arthur Thiré.	225
Mémoire sur l'extension des plaques élastiques; par M. Pelletan.	228
Note sur les travaux de la Commission chargée d'élaborer un nouveau règlement de police des mines pour le royaume de Saxe, et résumé de ce règlement; par M. Ichon.	277
Note sur les principales explosions survenues dans les houillères anglaises en 1883, 1884 et 1885; par M. Ichon.	299
Étude sur la situation économique de l'industrie houillère dans le bassin de la Ruhr; par M. L. Fèvre.	466

## OBJETS DIVERS.

Statistique de l'industrie minérale de la France. — Tableaux comparatifs de la production des combustibles minéraux, des fontes, fers et aciers, en 1885 et en 1886.	47
Rapport sur la nouvelle soupape de sûreté Barçon; par M. Michel Lévy.	171
Rapport sur la nouvelle soupape de sûreté Coret; par M. Michel Lévy.	179
Note sur deux explosions de chaudières à vapeur, aux forges de l'Adour (Landes) et au puits Marseille de la concession de Montrambert (Loire).	183
Discours prononcé sur la tombe de M. E. Blavier, inspecteur général des mines en retraite, le 1 <sup>er</sup> juin 1887; par M. E. Lorieux.	240
Congrès international des chemins de fer (Bruxelles, 1885). Rapport des délégués du gouvernement français.	243
— Rapport au Comité technique de l'exploitation des chemins de fer.	272

	Pages
Notice nécrologique sur M. A.-E. Béguyer de Chancourtois, inspecteur général des mines; par M. Edmond Fuchs.	505

## BULLETIN.

Statistique de la production des mines et des usines dans la Silésie prussienne en 1886.	537
Les mines de charbon de la Nouvelle-Calédonie.	544

## ERRATUM.

Page 139, ligne 7 à partir du bas, au lieu de : « Au prix de 25 francs la tonne; on dépense », lire : « Au prix de 35 francs la tonne, on dépense ».

## EXPLICATION DES PLANCHES

DU TOME ONZIÈME.

- Pl. I. — Chemins de fer électriques dans les mines.  
 Pl. II. — Expériences de congélation des terrains.  
 Pl. III, Pl. IV et Pl. V, *fig. 1 et 2.* — Accident survenu au puits de Fontanes par suite d'un dégagement instantané d'acide carbonique.  
 Pl. V, *fig. 3 à 7.* — Procédé d'exécution des travaux de sauvetage.  
 Pl. V, *fig. 8 à 11.* — Théorie du planimètre d'Amsler.  
 Pl. VI. — Gisement et exploitation de l'ozokérite à Boryslaw.  
 Pl. VII, *fig. 1, 2.* — Soupape de sûreté Barçon.  
 Pl. VII, *fig. 3 à 6.* — Soupape de sûreté Coret.  
 Pl. VII, *fig. 7 à 10.* — Explosions de chaudières à vapeur, aux forges de l'Audour et au puits Marseille.  
 Pl. VII, *fig. 11 à 13.* — Système de rallumage intérieur des lampes de sûreté.  
 Pl. VIII, *fig. 1 à 7.* — Expériences sur l'abrasion.  
 Pl. VIII, *fig. 8.* — Tracé des cames de marteaux.  
 Pl. VIII, *fig. 9 à 14.* — Extension des plaques élastiques.  
 Pl. IX, X et XI. — Explosions survenues dans les houillères anglaises en 1883, 1884 et 1885.

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

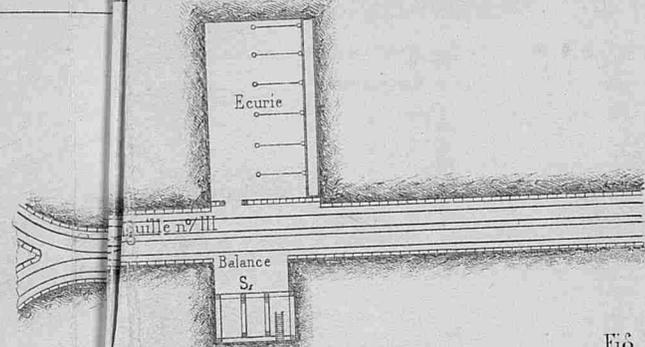


Fig. 3.

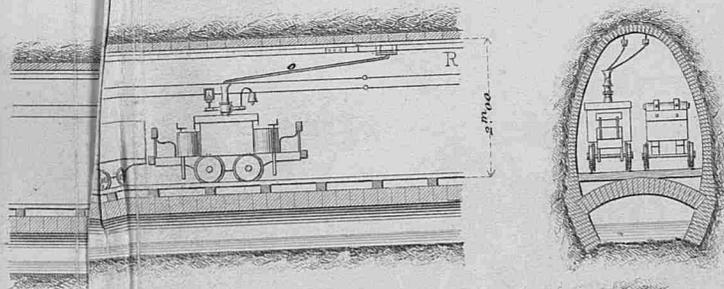


Fig. 7.

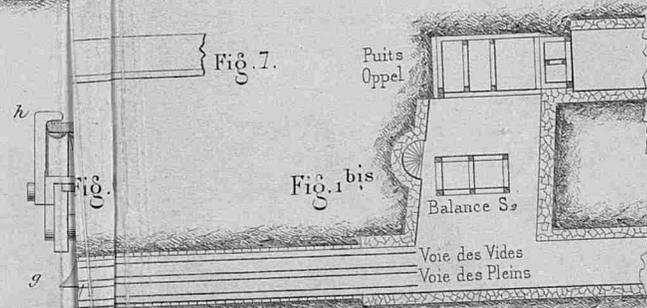


Fig. 1 bis

Voie des Vides  
Voie des Pleins

Fig. 9.

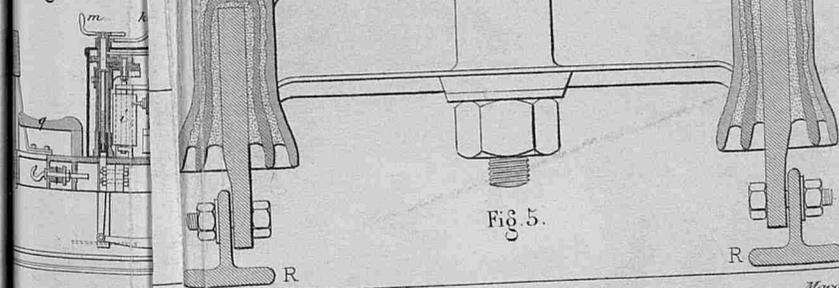


Fig. 5.

Macquet sc.

Chemins de fer électriques

Fig. 1.

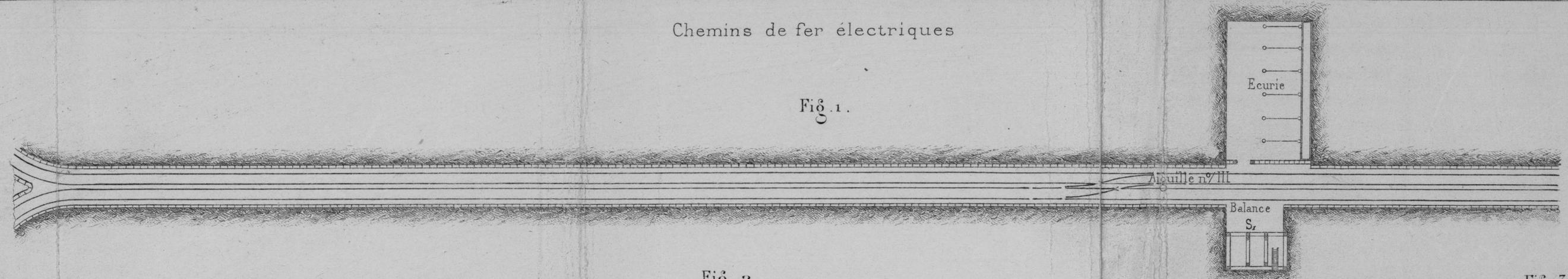


Fig. 2.

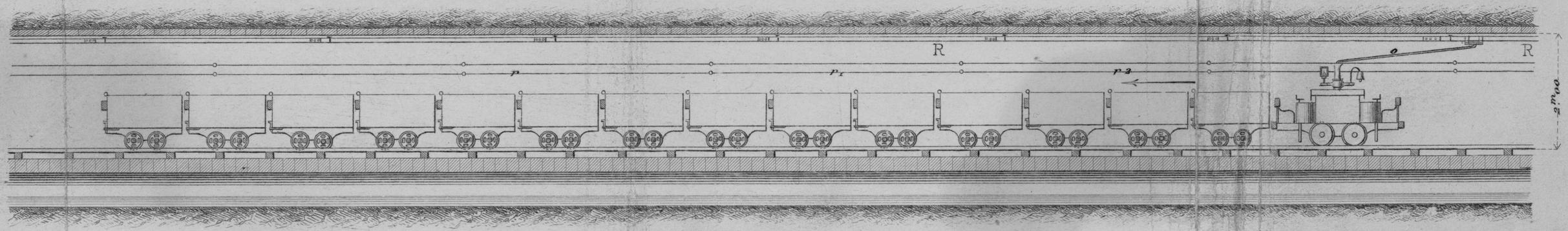


Fig. 3.

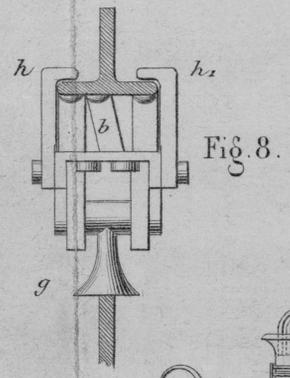
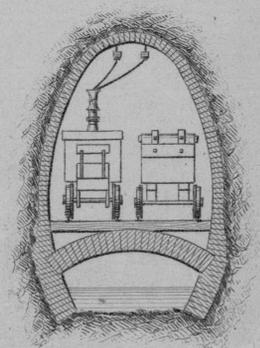


Fig. 8.

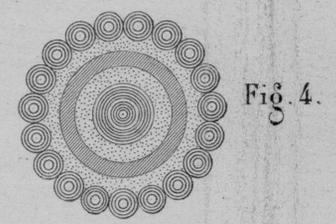


Fig. 4.

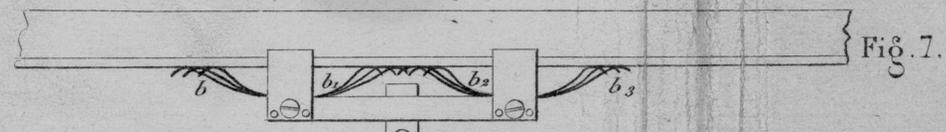


Fig. 7.

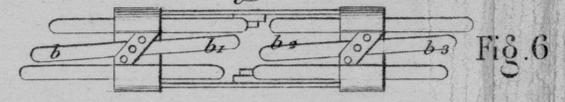


Fig. 6.

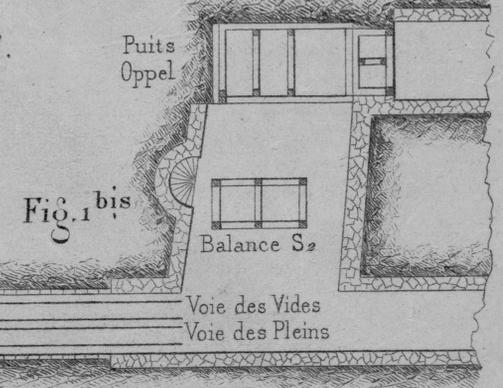


Fig. 1 bis.

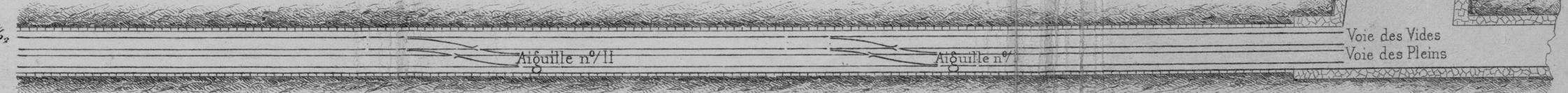


Fig. 9.

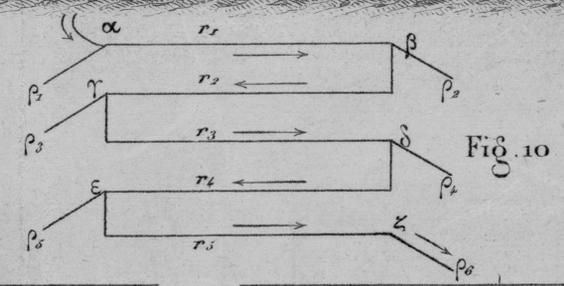
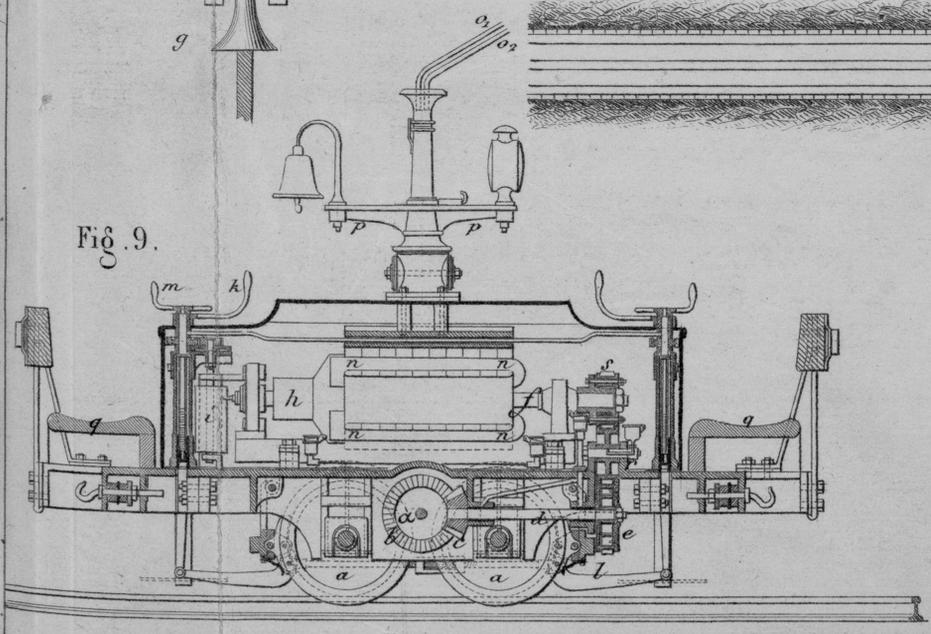


Fig. 10.

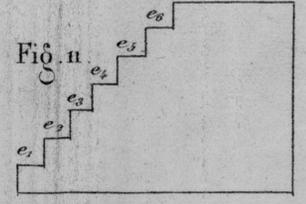


Fig. 11.

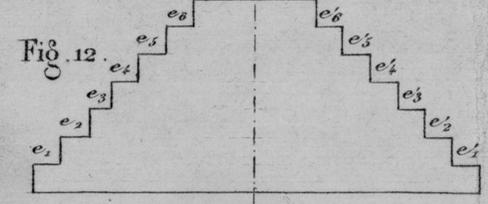


Fig. 12.

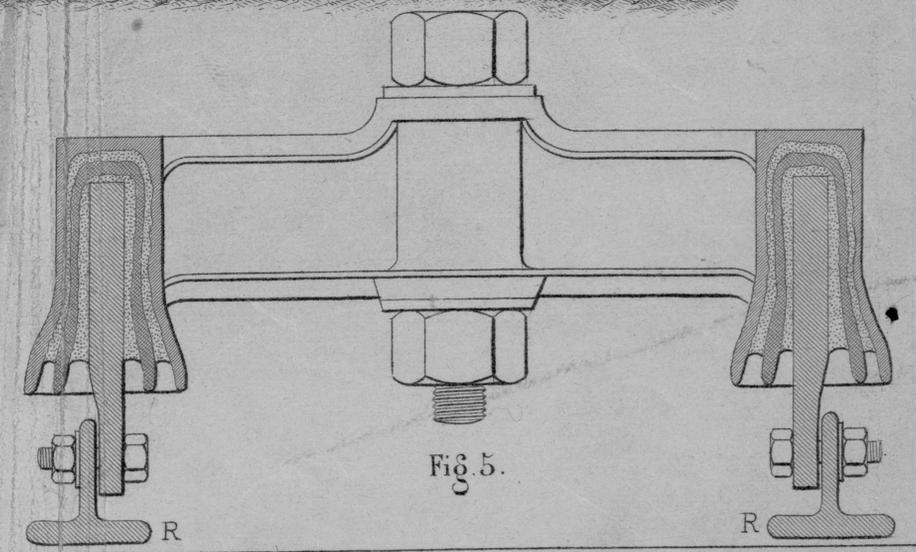


Fig. 5.

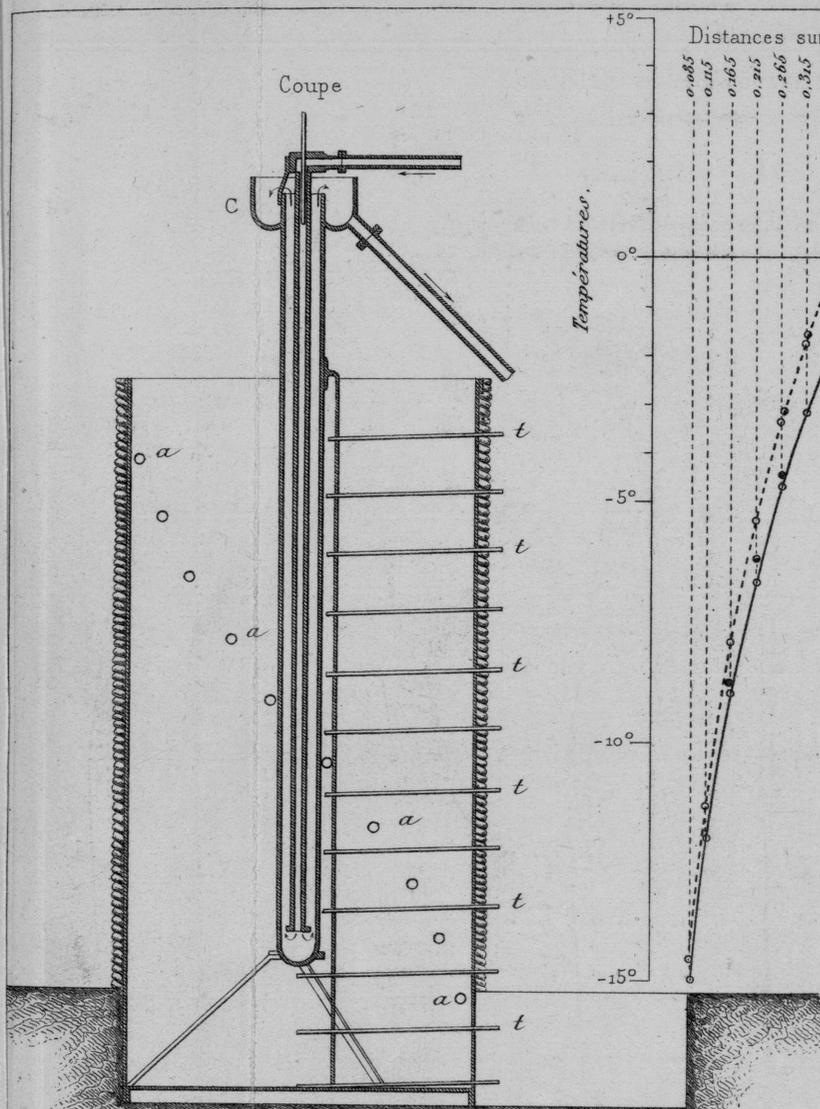
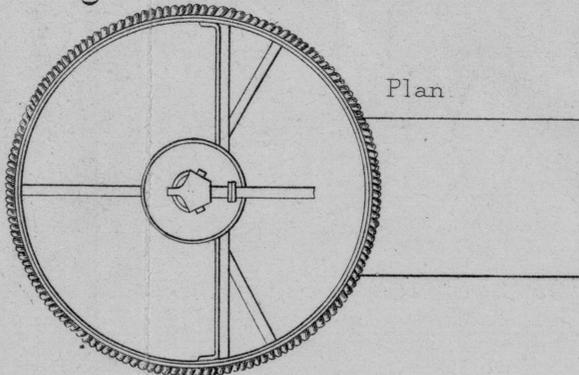


Fig. 1. Appareil d'expérience



Plan

1<sup>m</sup> 0,5 0<sup>m</sup> 1<sup>m</sup> 2<sup>m</sup> 3<sup>m</sup>

Echelle de la Fig. 1.

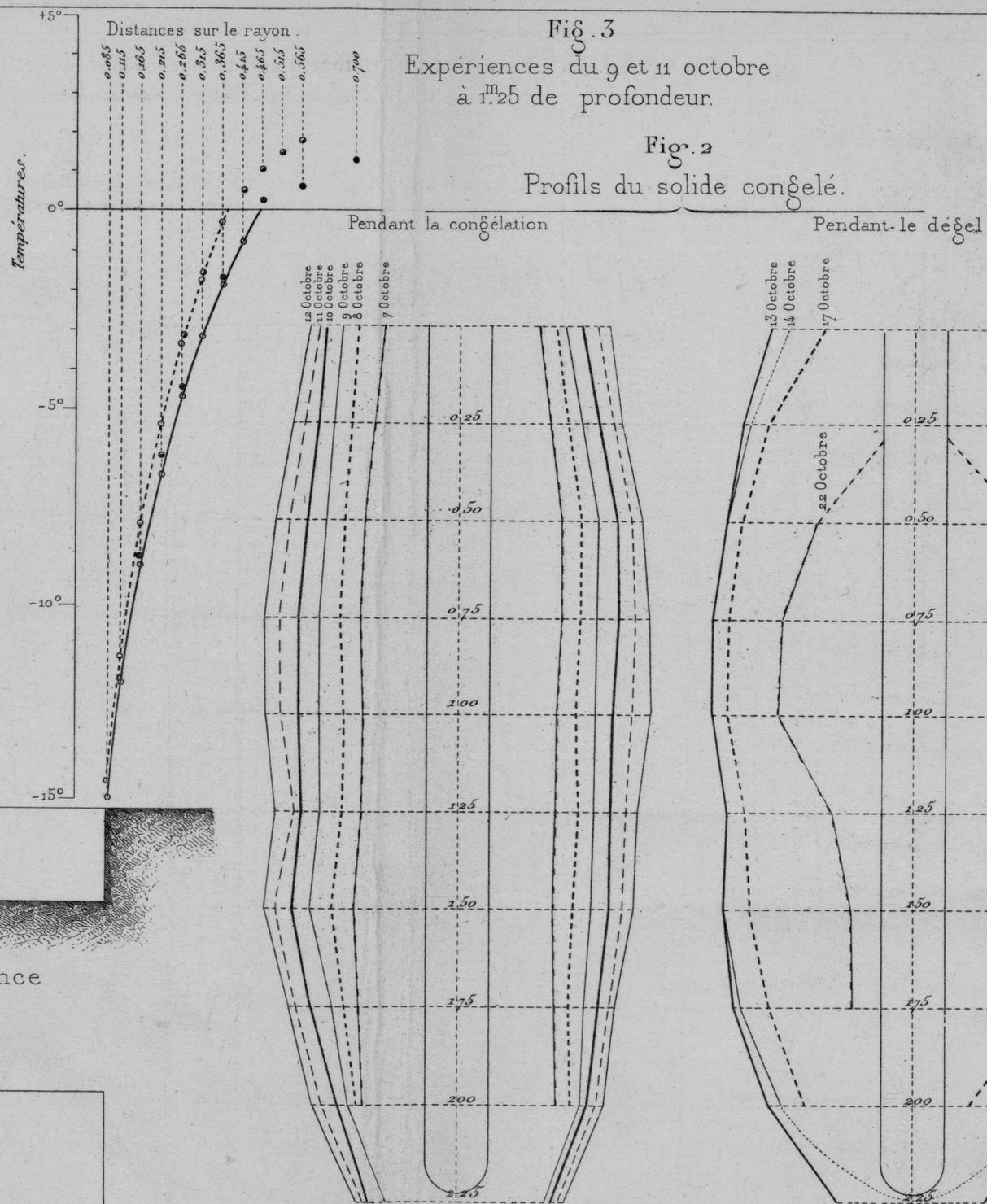


Fig. 3  
Expériences du 9 et 11 octobre  
à 1<sup>m</sup>25 de profondeur.

Fig. 2  
Profils du solide congelé.

Pendant la congélation

Pendant le dégel

Fig. 4  
Expériences du 25 et 26 septembre  
à 1<sup>m</sup>25 de profondeur

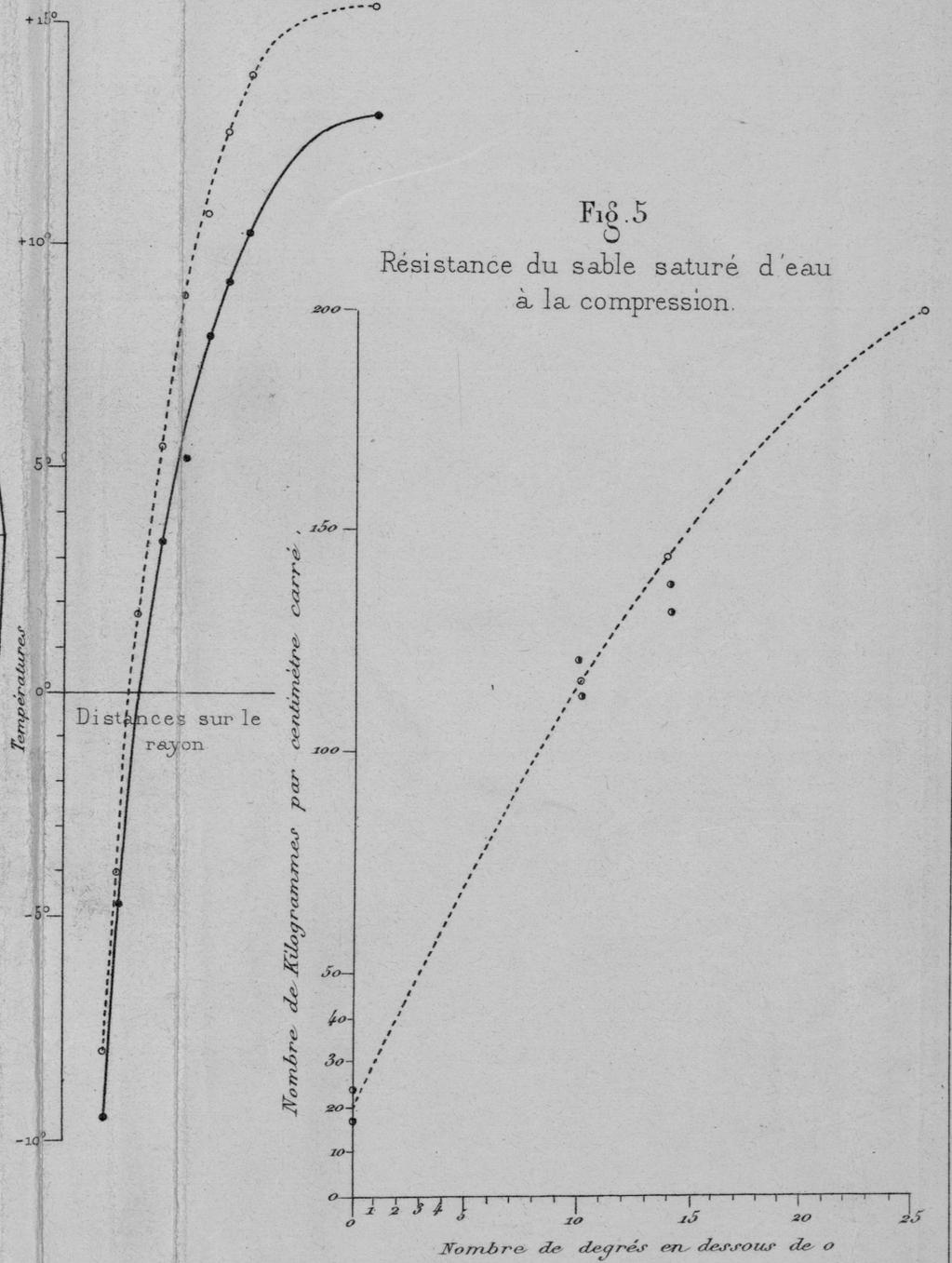


Fig. 5  
Résistance du sable saturé d'eau  
à la compression.

1<sup>m</sup> 0,5 0<sup>m</sup> 1<sup>m</sup>

Echelle de la Fig. 2.

Plan des travaux du puits de Fontanes

Echelle  $\frac{1}{50}$

Fig. 1.

- Courent du ventilateur
- id des remontées jumelles
- id naturel
- id entrant par le puits N°2 et se divisant
- Couche N°3
- Couche N°4

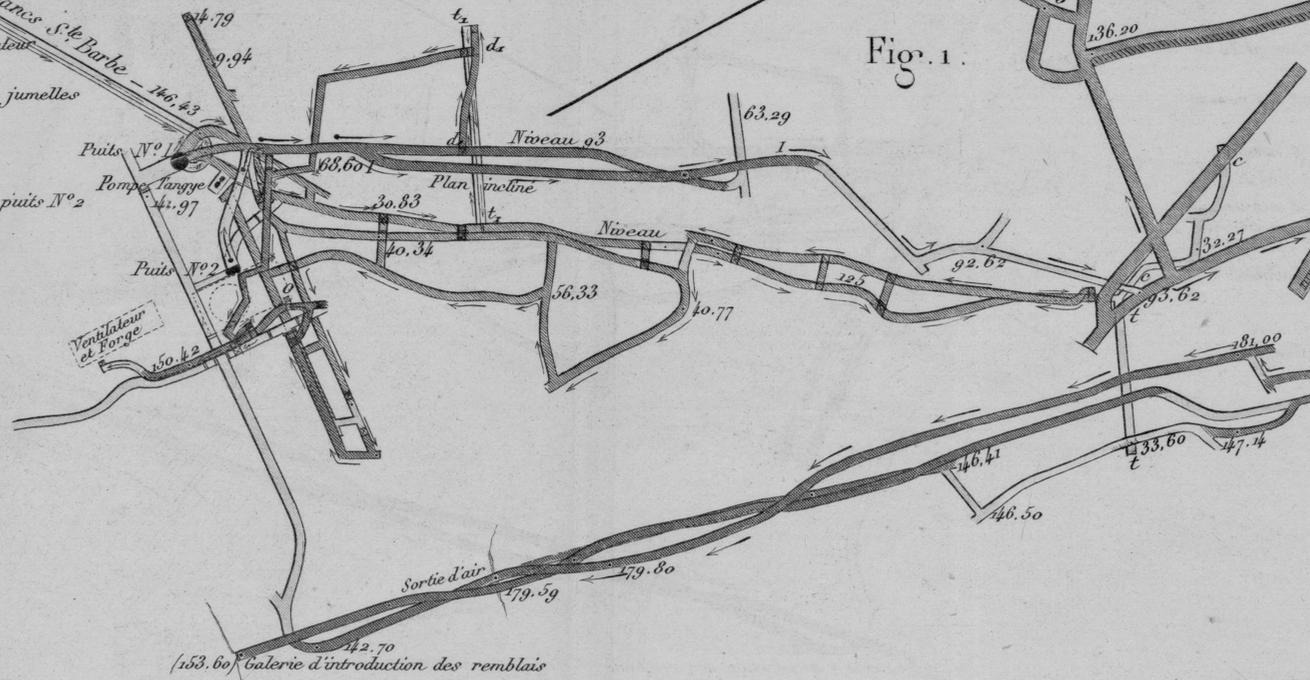


Fig. 2.

Projection verticale du parement droit

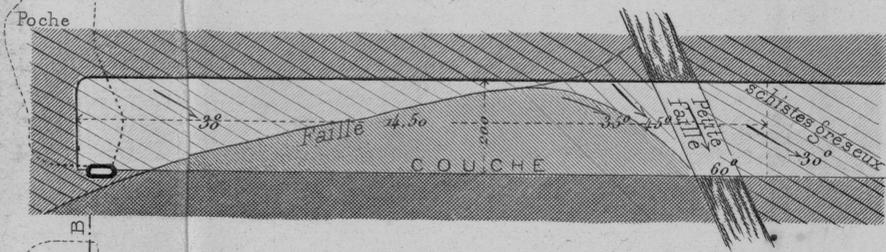


Fig. 3.

Plan

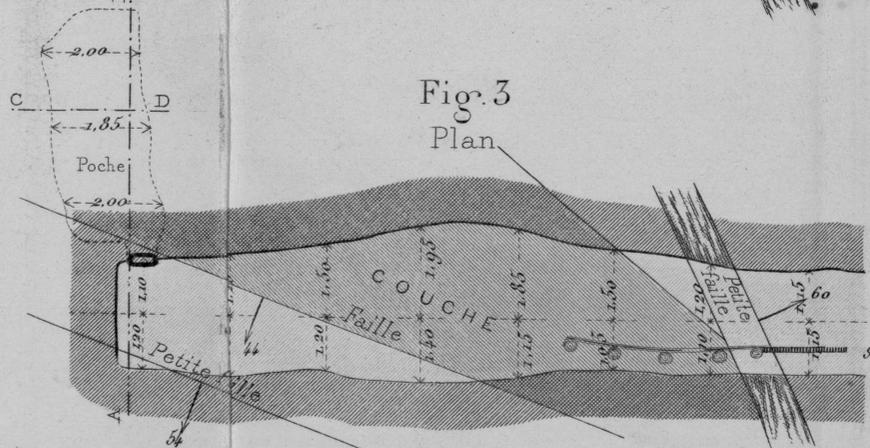


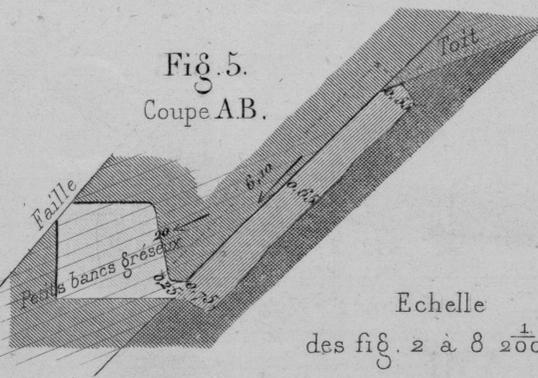
Fig. 4.

Coupe C.D.



Fig. 5.

Coupe A.B.



Echelle des fig. 2 à 8  $\frac{1}{200}$

Accident survenu au Puits de Fontanes

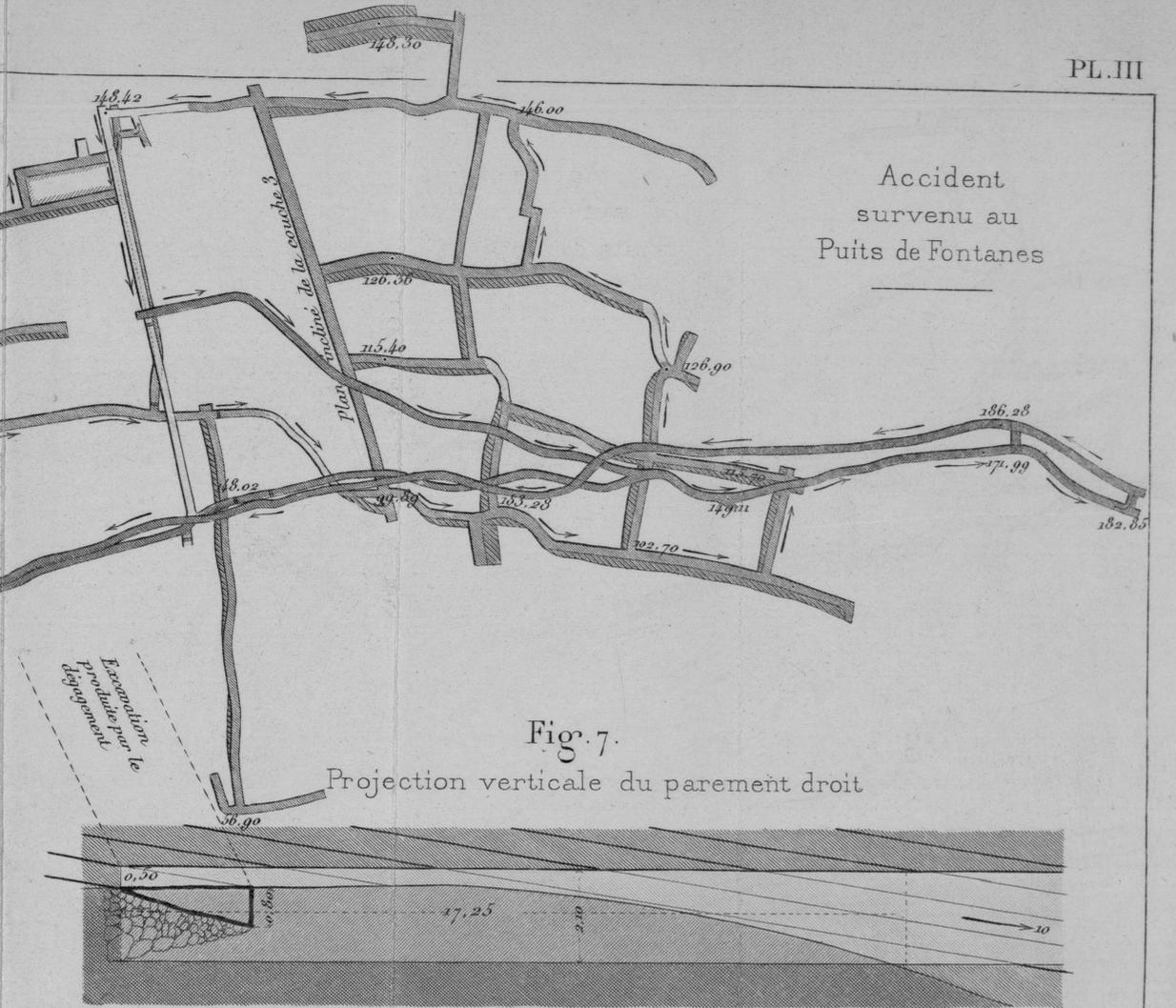


Fig. 7.

Projection verticale du parement droit

Fig. 8.

Vue de face de l'avancement et position des coups de mine

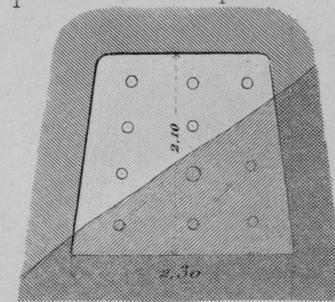
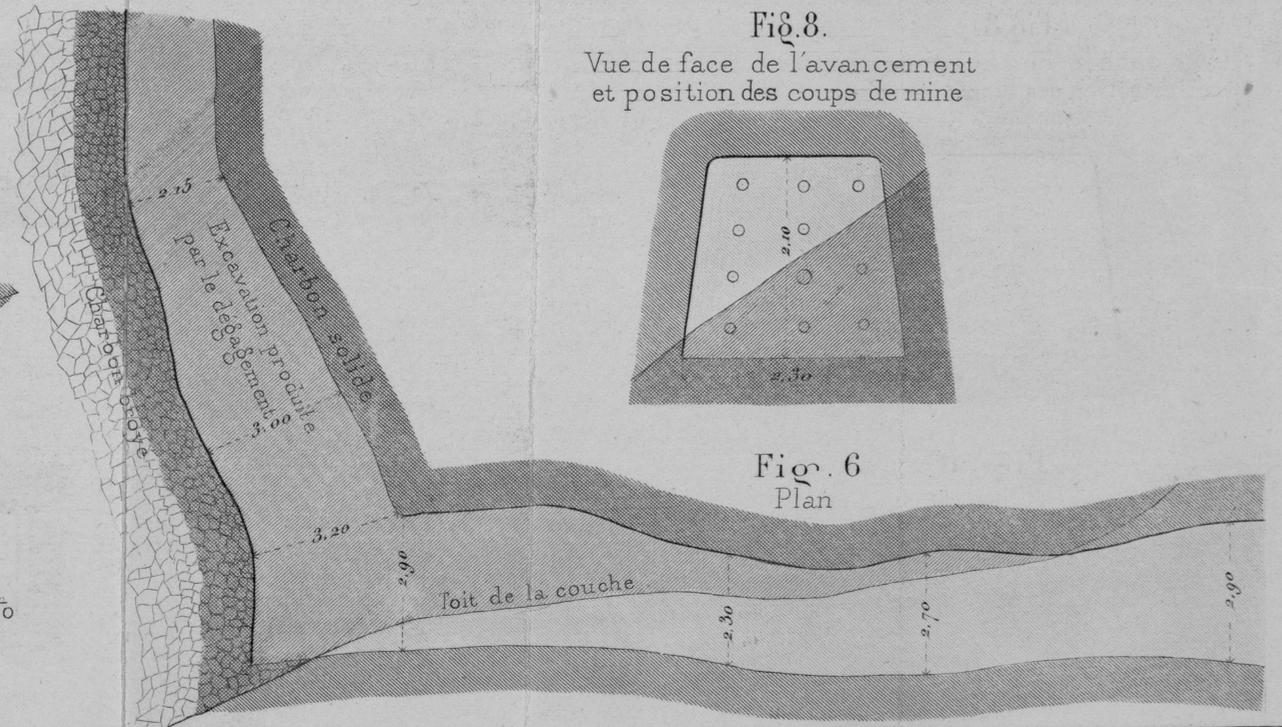


Fig. 6.

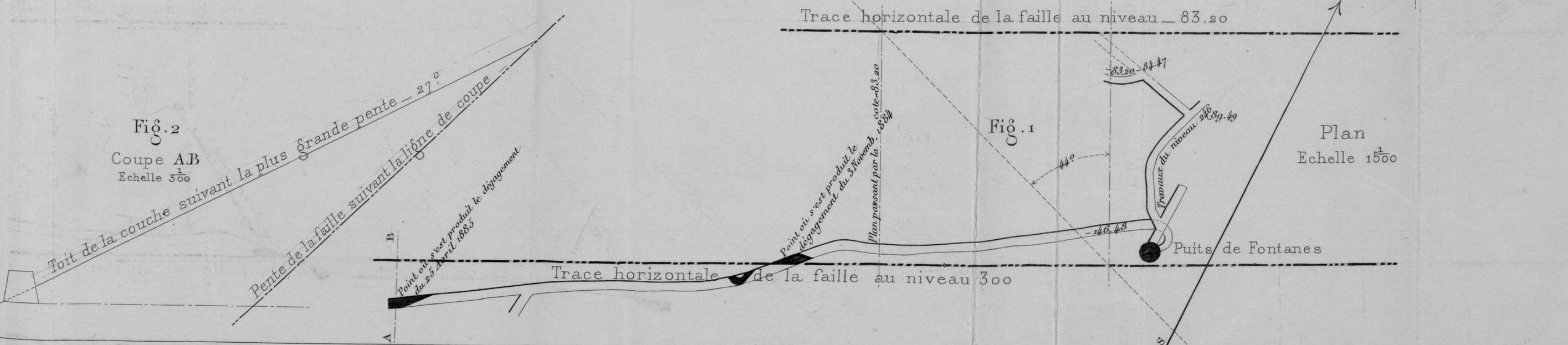
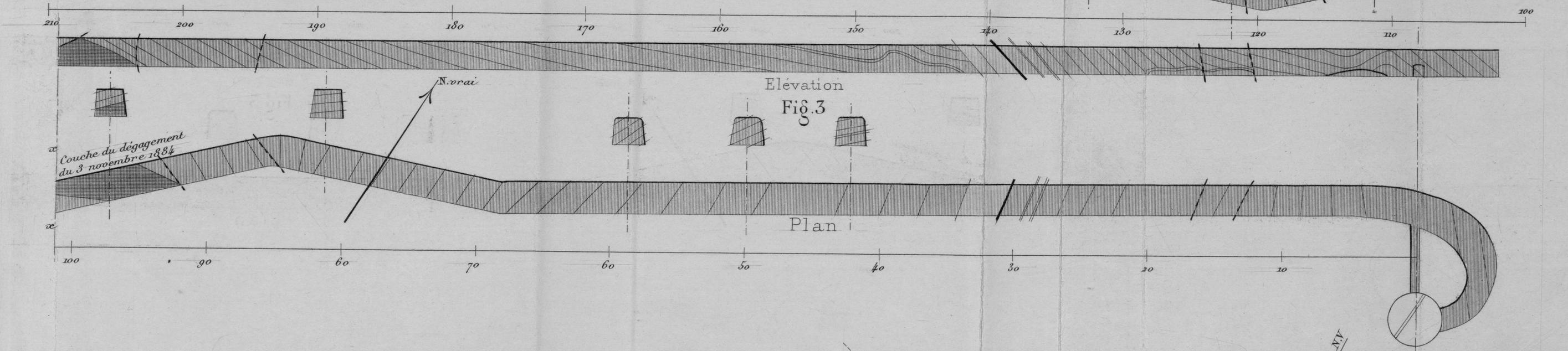
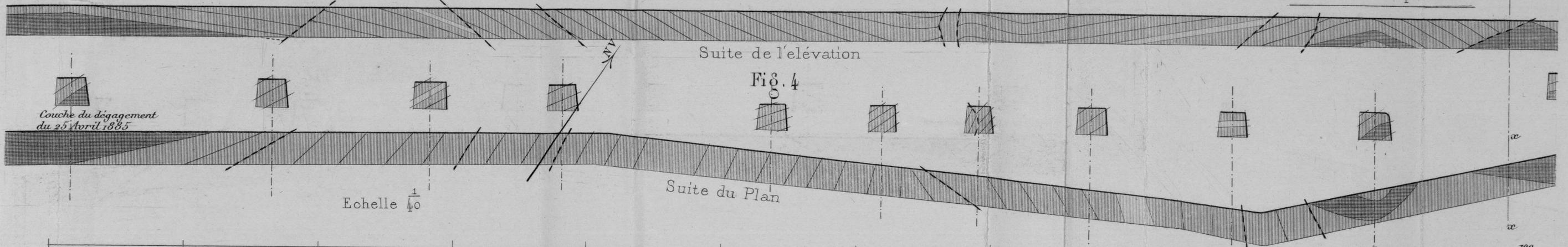
Plan



# EXPLOITATION

Plan, Elévation et coupes du travers-bancs S<sup>te</sup> Barbe

Accident survenu au puits Fontanes



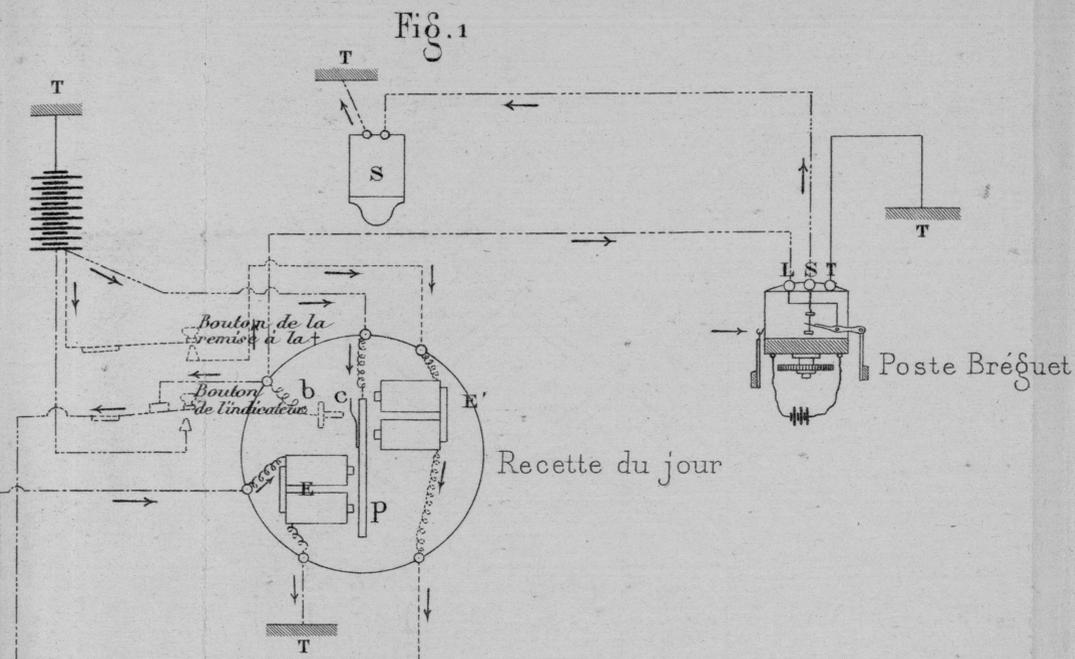
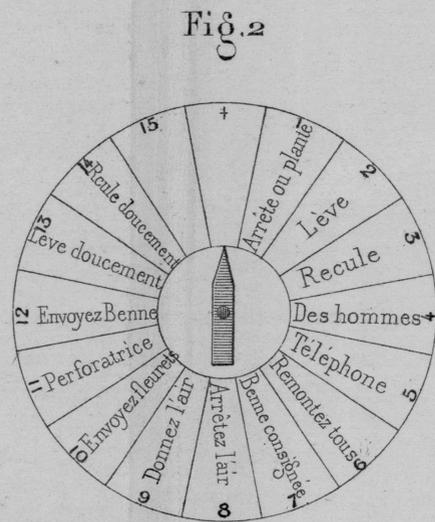
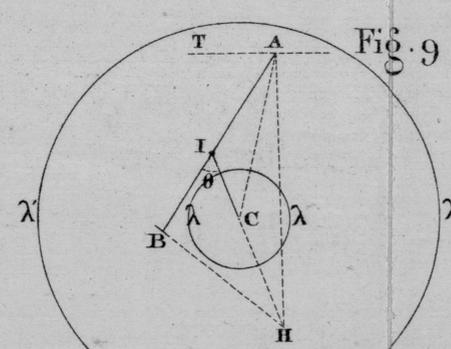
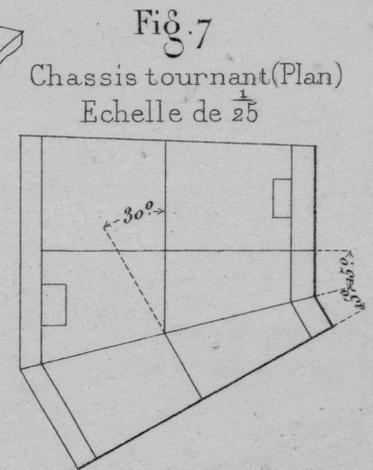
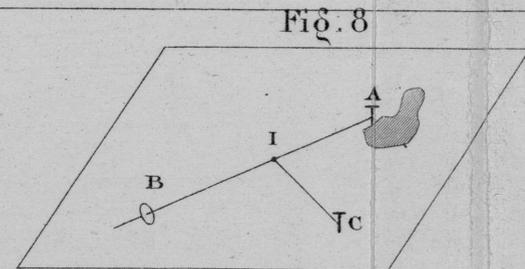
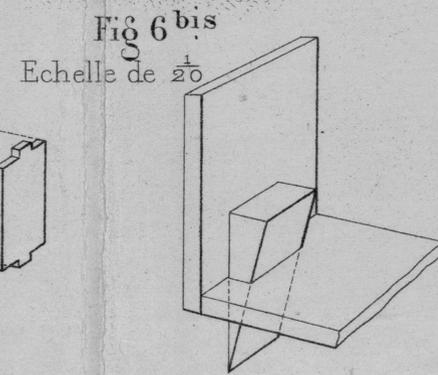
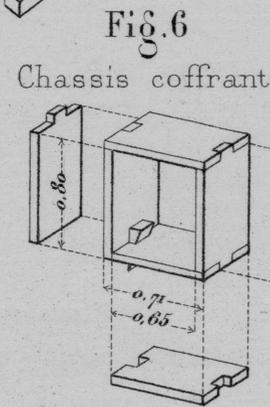
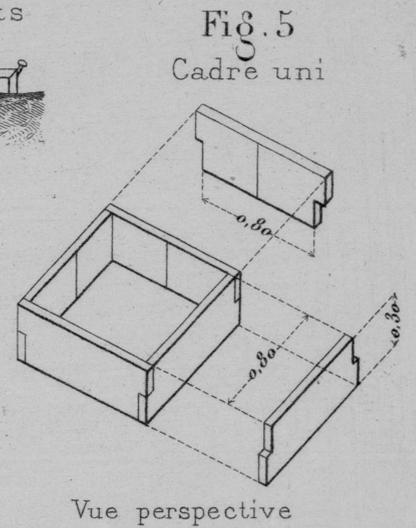
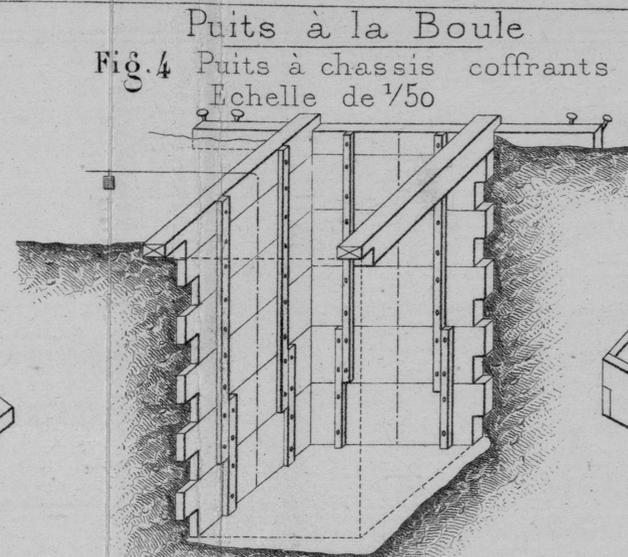
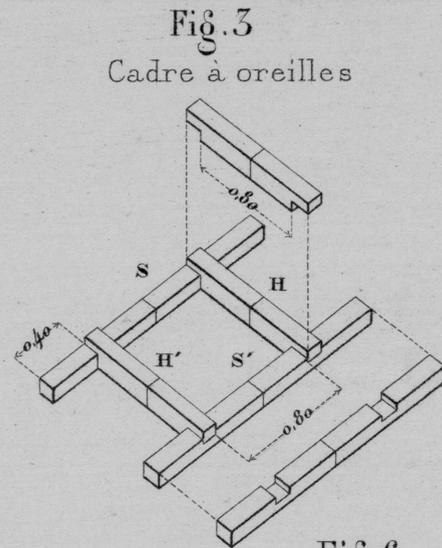
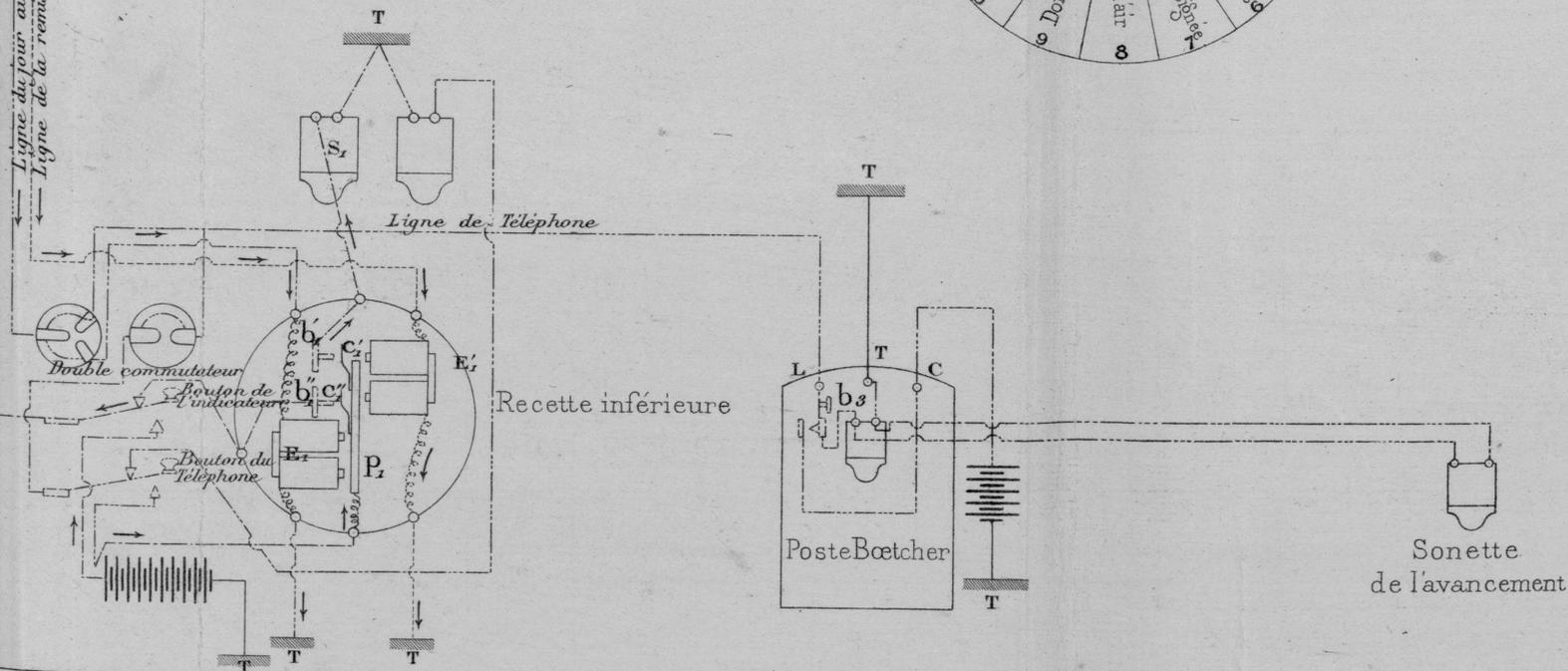


Diagramme des signaux électriques Bréguet du puits Fontanes



Ligne du fond au jour  
Ligne du jour au fond  
Ligne de la remise à la croix



Planimètre d'Amsler

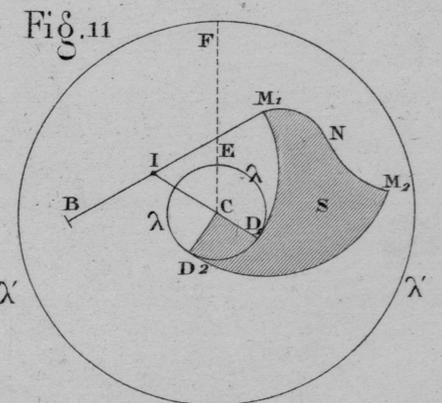
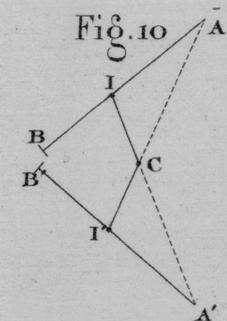
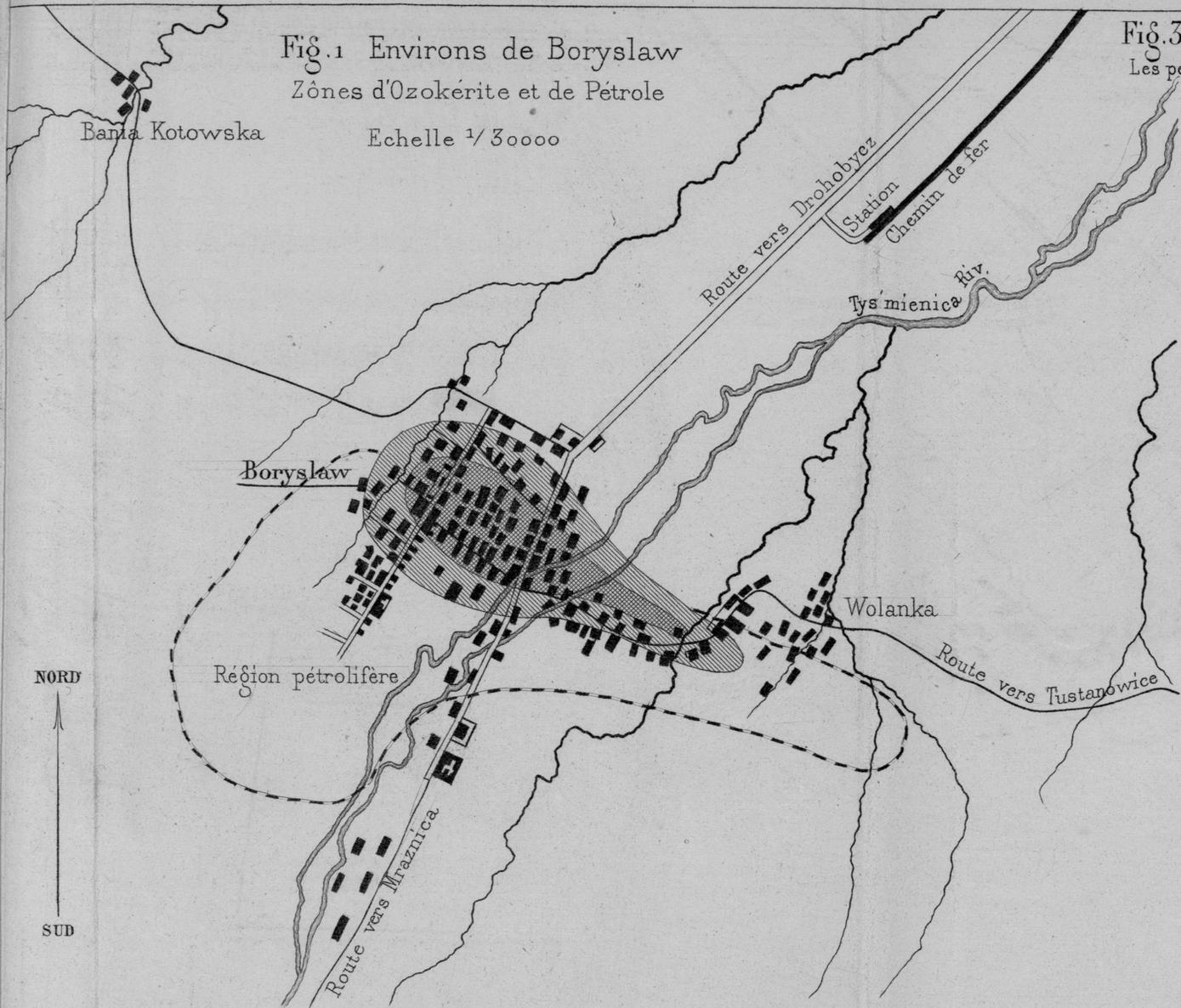


Fig.1 Environs de Boryslaw  
Zônes d'Ozokérite et de Pétrole

Echelle 1/30000



NORD  
SUD

Fig.3 - Exemples de quelques filons d'Ozokérite  
Les petits chiffres indiquent la puissance des filons en centimètres.

Echelle 1/400

Légende de la Fig. 3

- Schiste
- Grès bitumineux
- Grès quartzeux
- Seifengebirge
- Filon d'Ozokérite

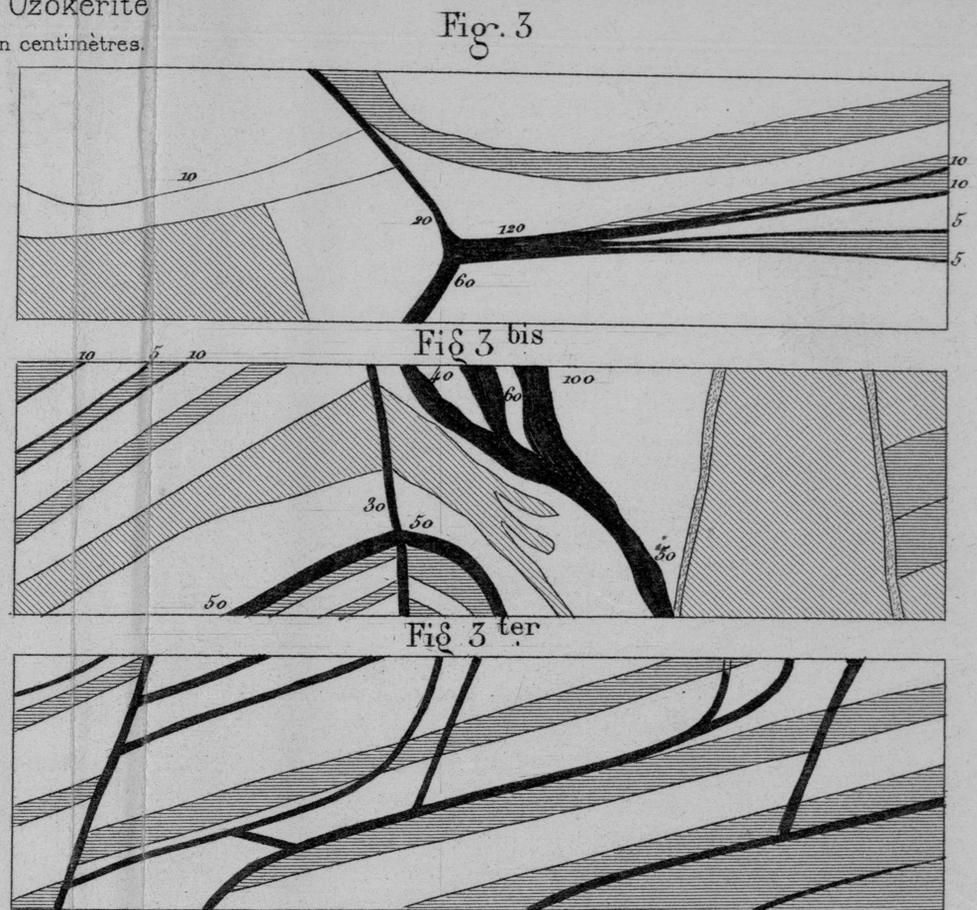
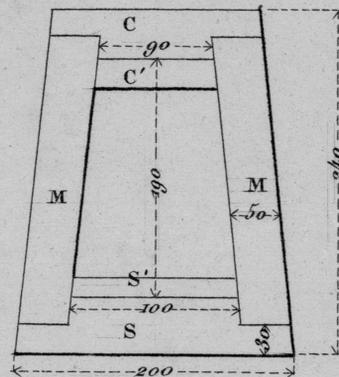


Fig.6

Cadre des grandes galeries

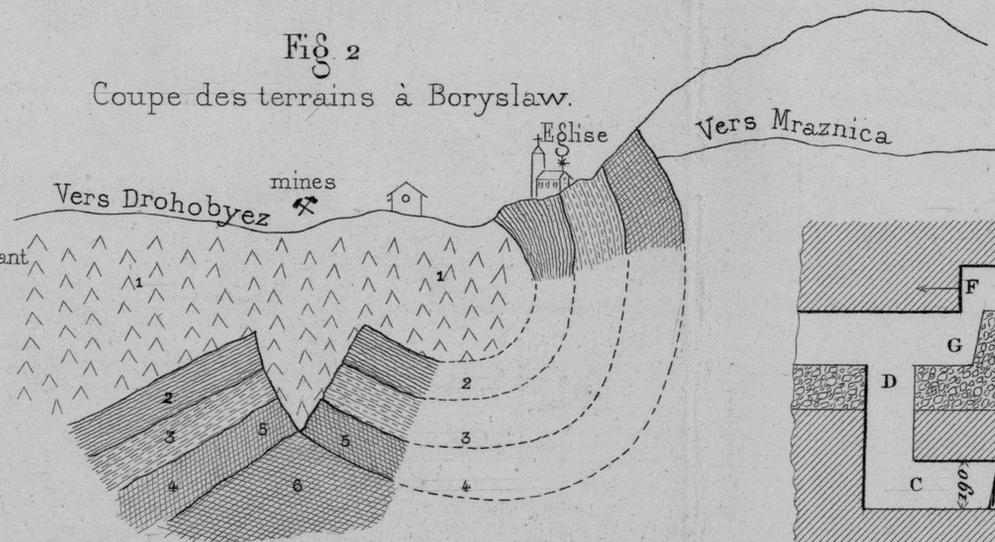


Légende

- 1 Salzthongruppe
- 2 Menilit-Schiefer
- 3 Grès éocène ne contenant pas de pétrole
- 4 Grès nummulitique
- 5 Eocène profond
- 6 Grès crétacés

Fig. 2

Coupe des terrains à Boryslaw.



- Terrain vierge
- Remblai

Fig.5 Coupe verticale

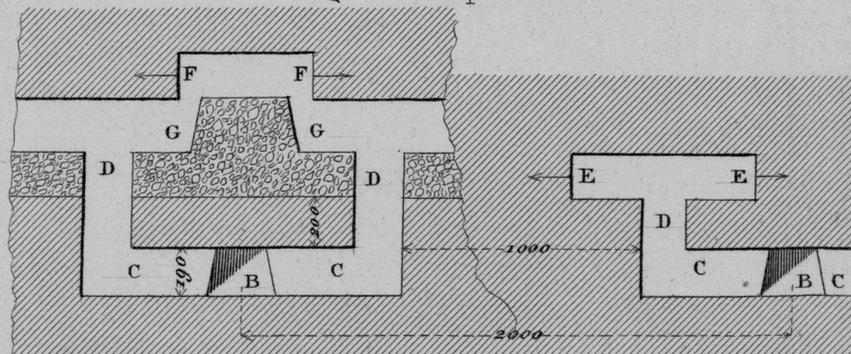
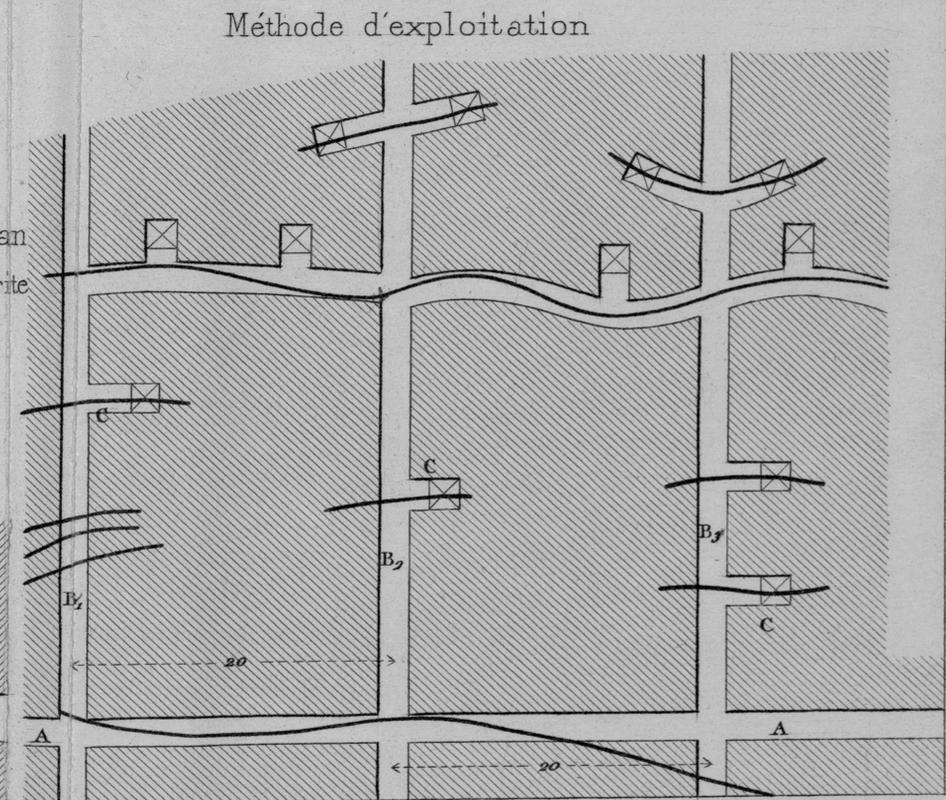


Fig.4 Plan  
Filon d'Ozokérite



Macquet sc.

Fig.1 Soupape Barçon Echelle de 1:2.

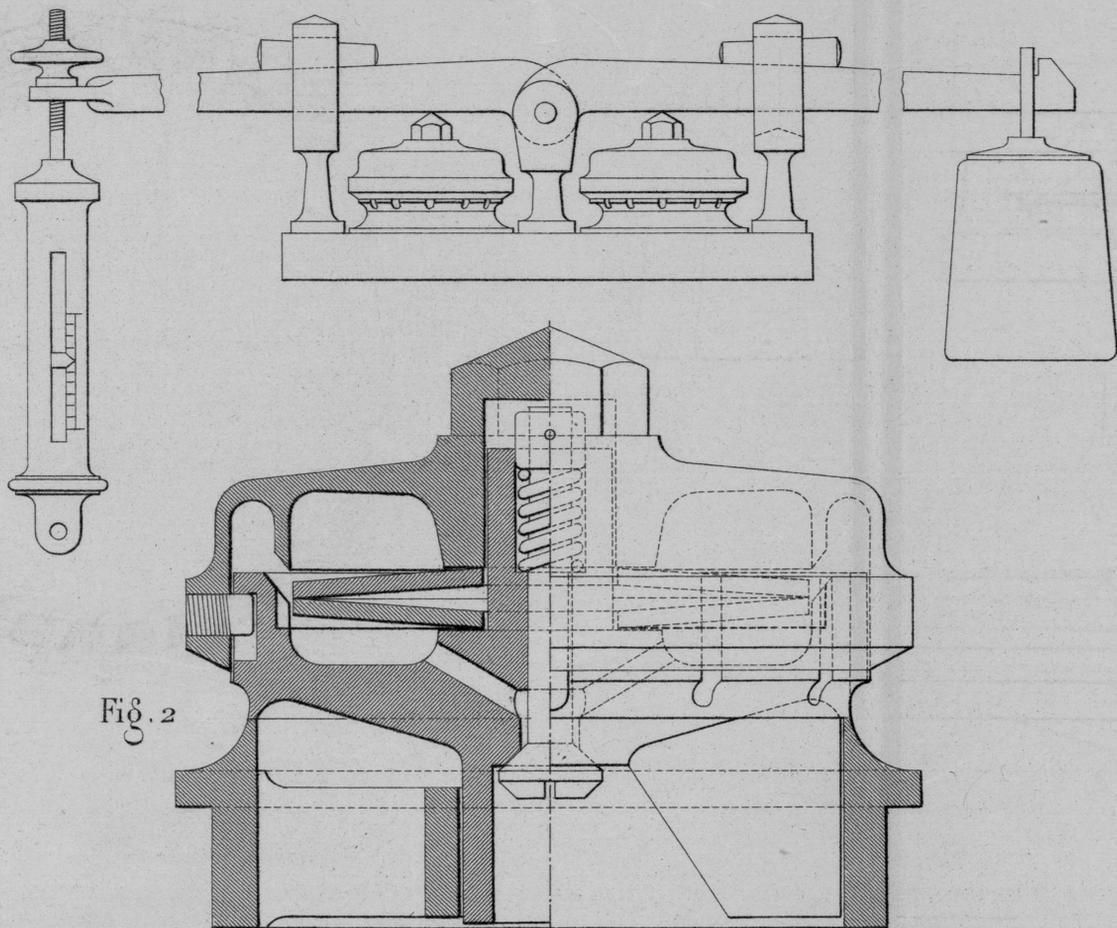


Fig. 2

Soupape Corret  
Echelle de 1:2

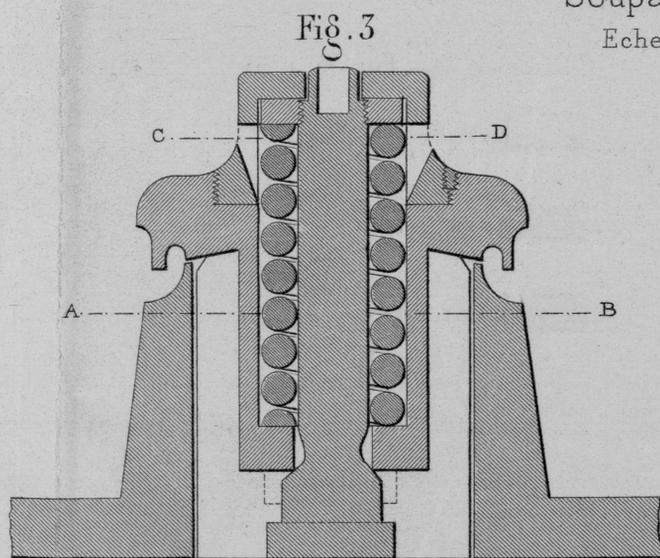


Fig. 4  
Tige  
mobile

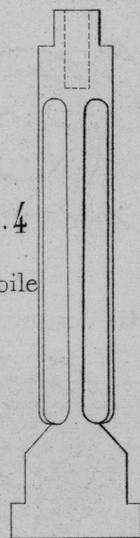


Fig. 5 Coupe suiv. A B.

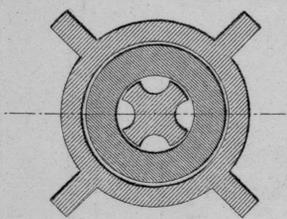
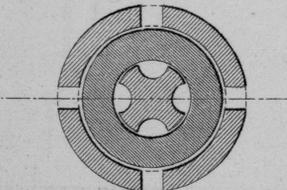


Fig. 6 Coupe suiv. C D.



Explosion des Forges de l'Adour

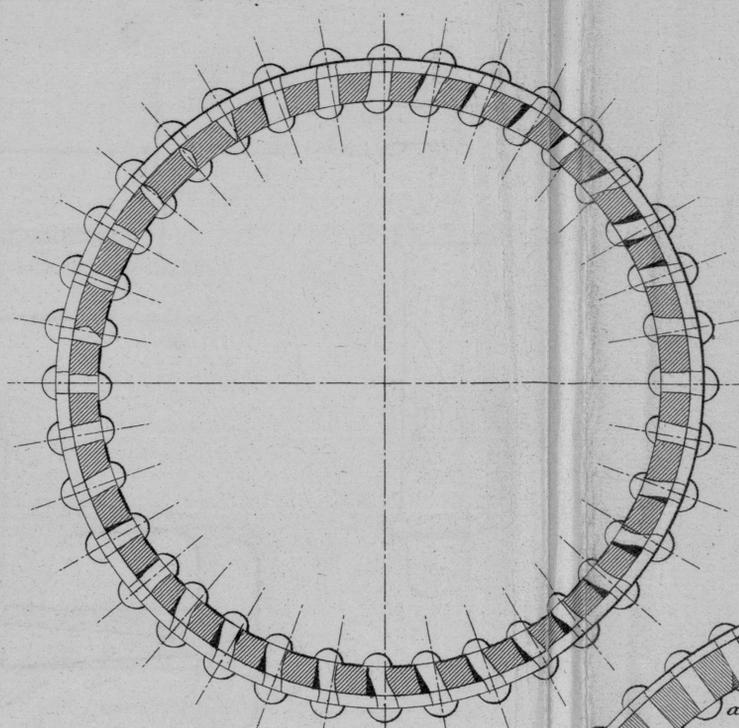
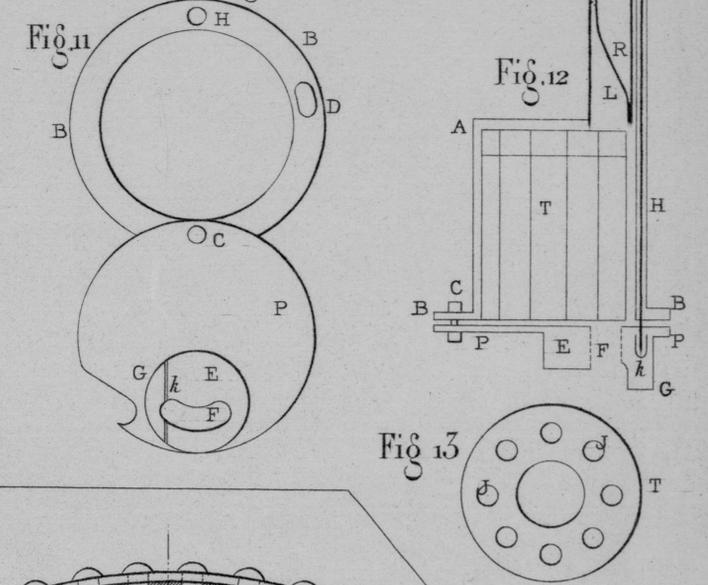


Fig. 7  
Vue de face de la  
section de rupture  
Echelle de 1:10

Système Catrice  
pour le rallumage des lampes de sûreté



Explosion au Puits Marseille  
de la concession de Montrambert

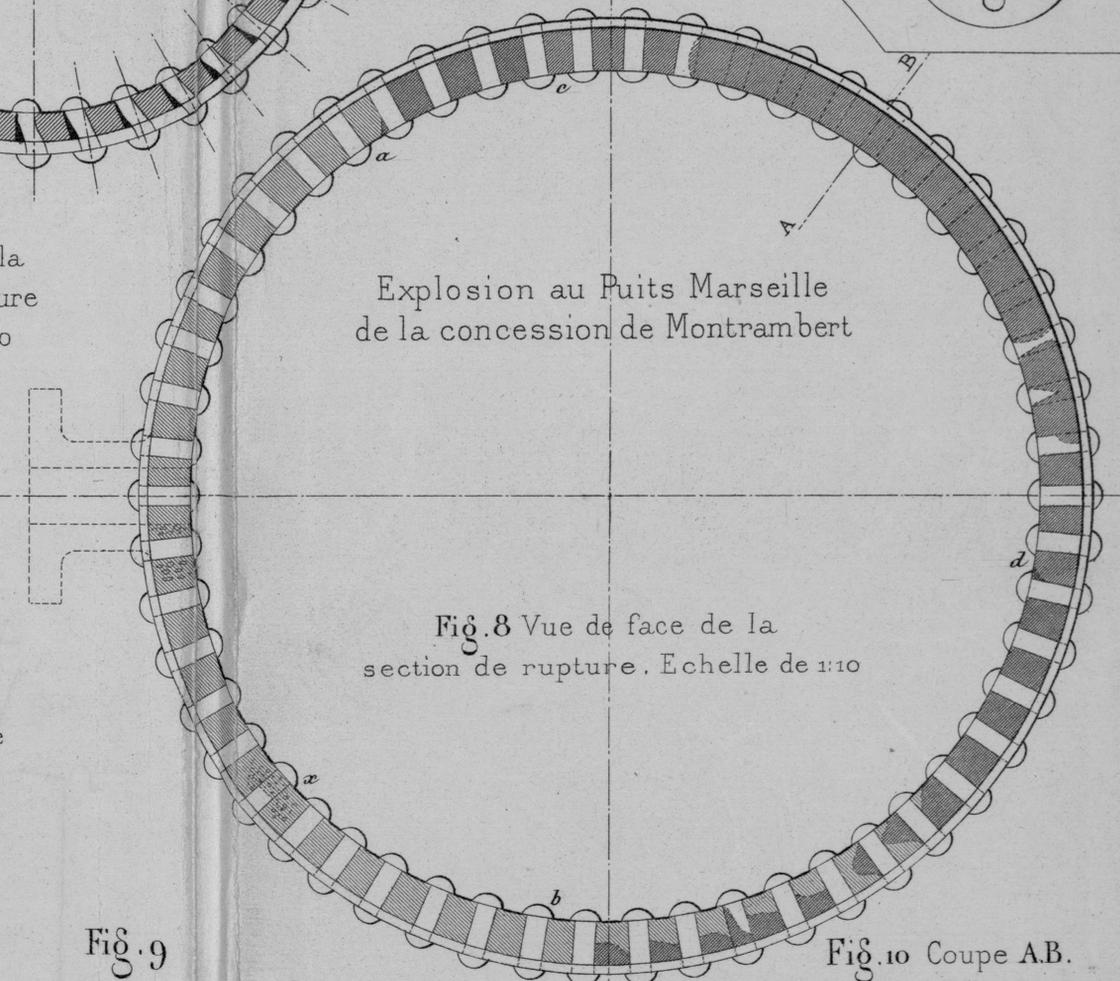


Fig. 8 Vue de face de la  
section de rupture. Echelle de 1:10

- Légende de la Fig. 8
- Dépôt terreux.
  - Coloration noirâtre
  - Cassure nette

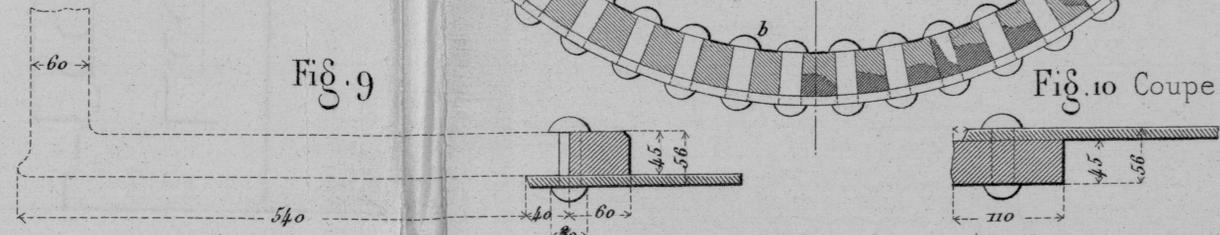
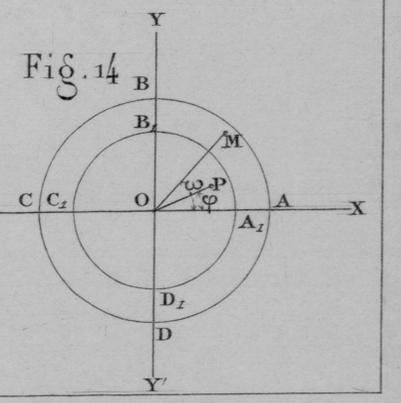
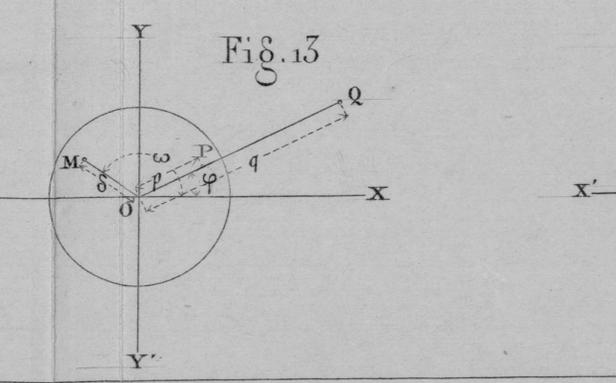
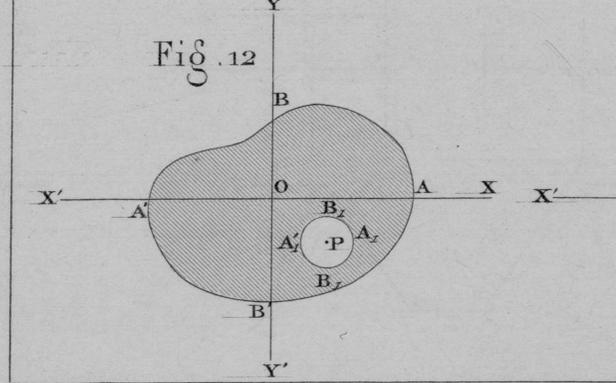
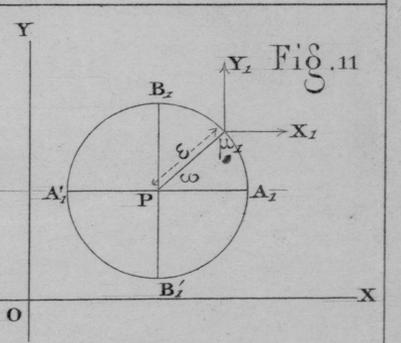
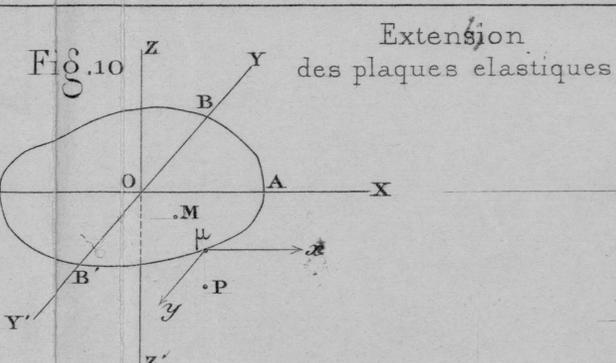
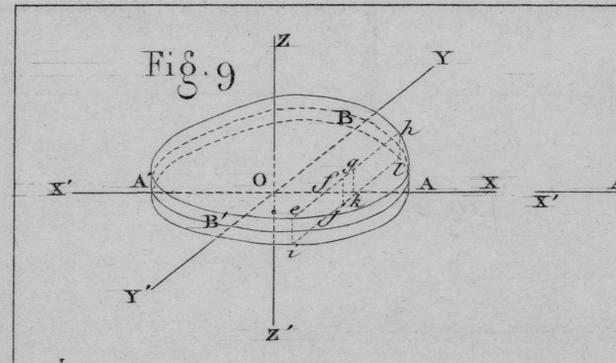
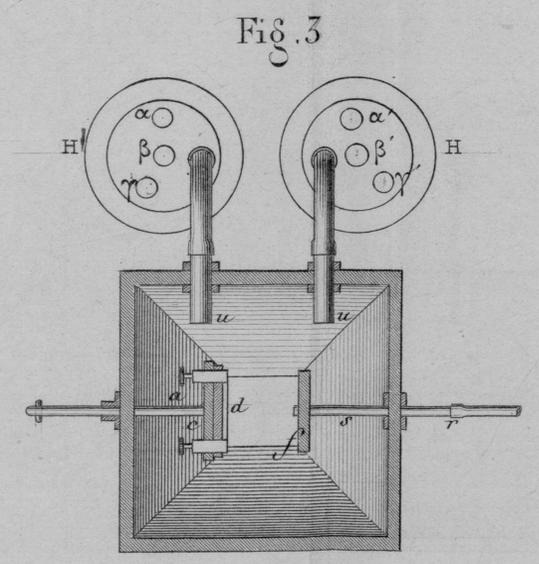
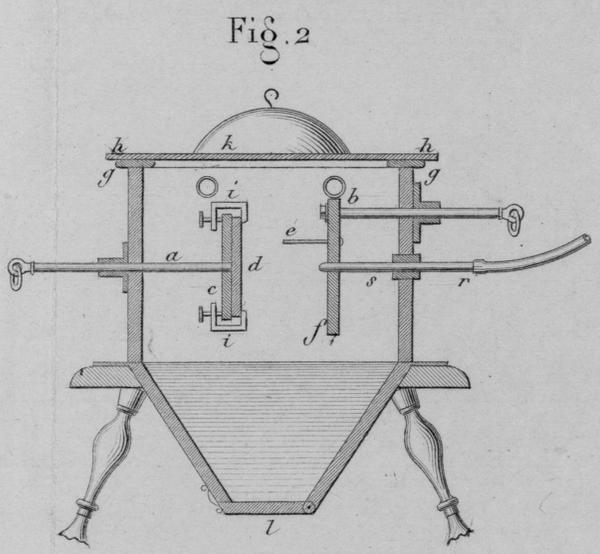
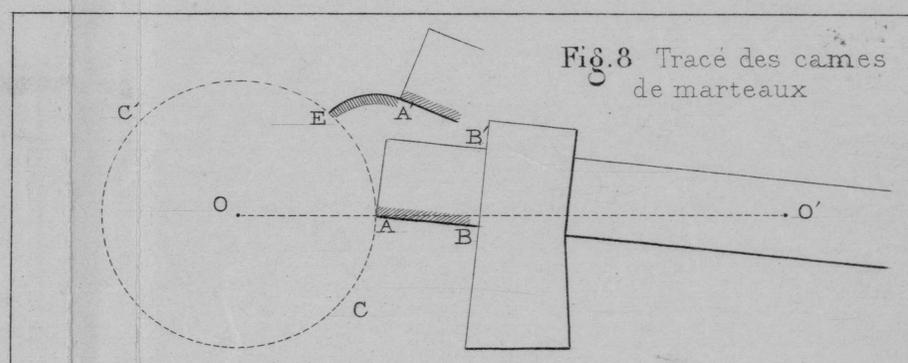
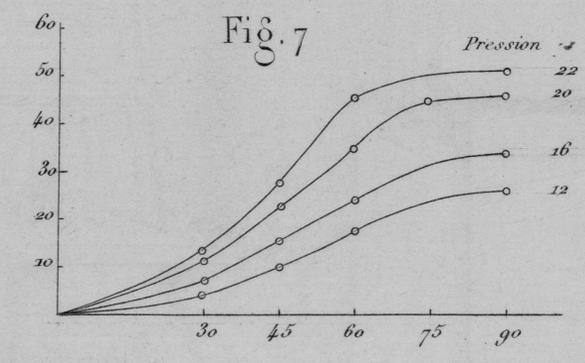
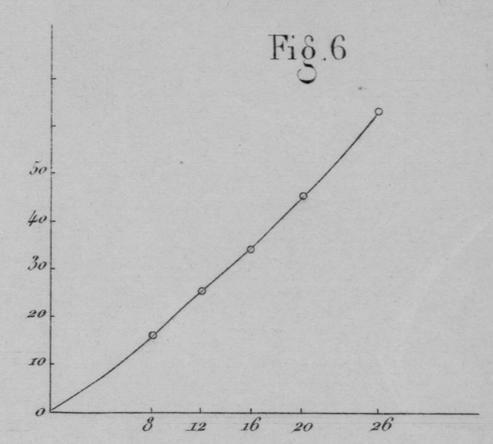
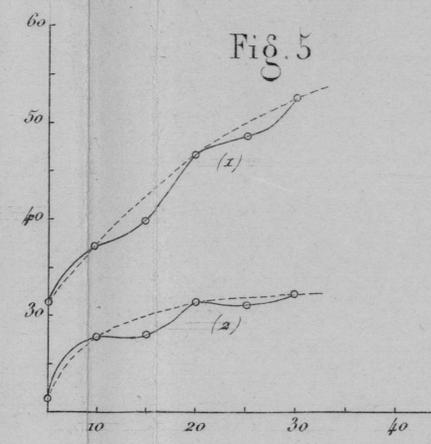
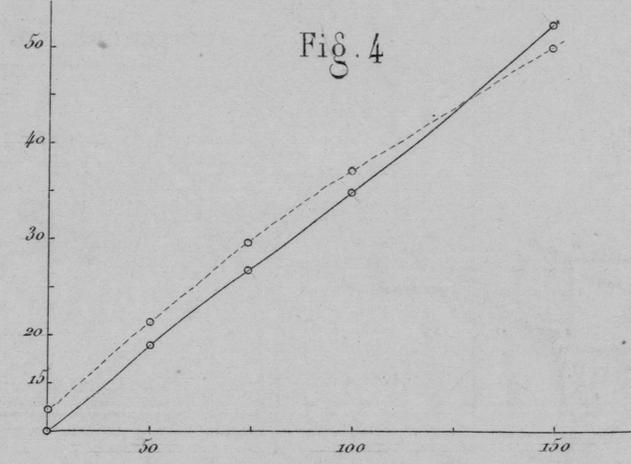
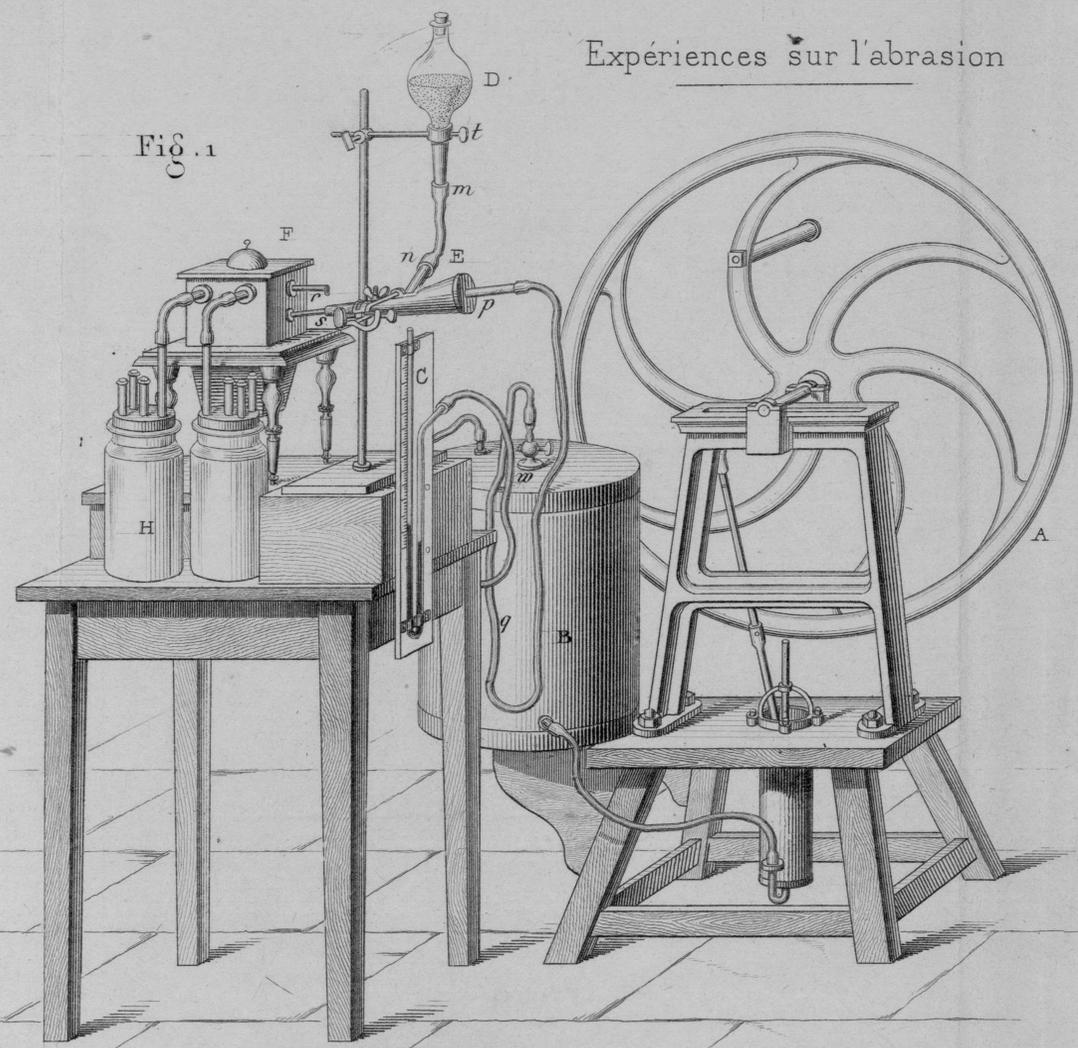


Fig. 9

Fig. 10 Coupe A B.

Expériences sur l'abrasion



PLAN DE TRENCHERBONE MINE, HOUILLÈRE DE CLIFTON HALL

Fig. 2

Echelle  $\frac{1}{10000}$

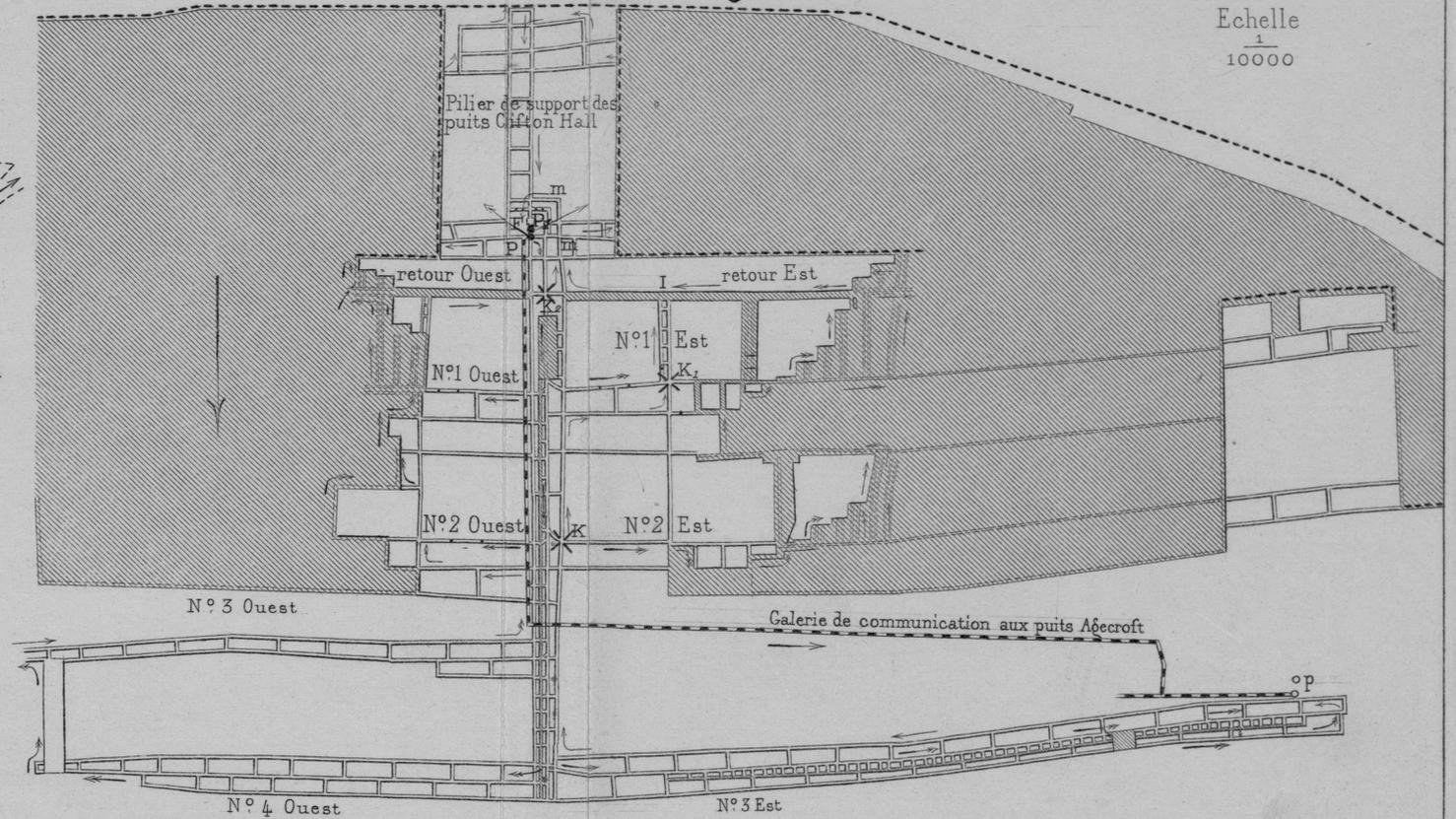


Fig. 3



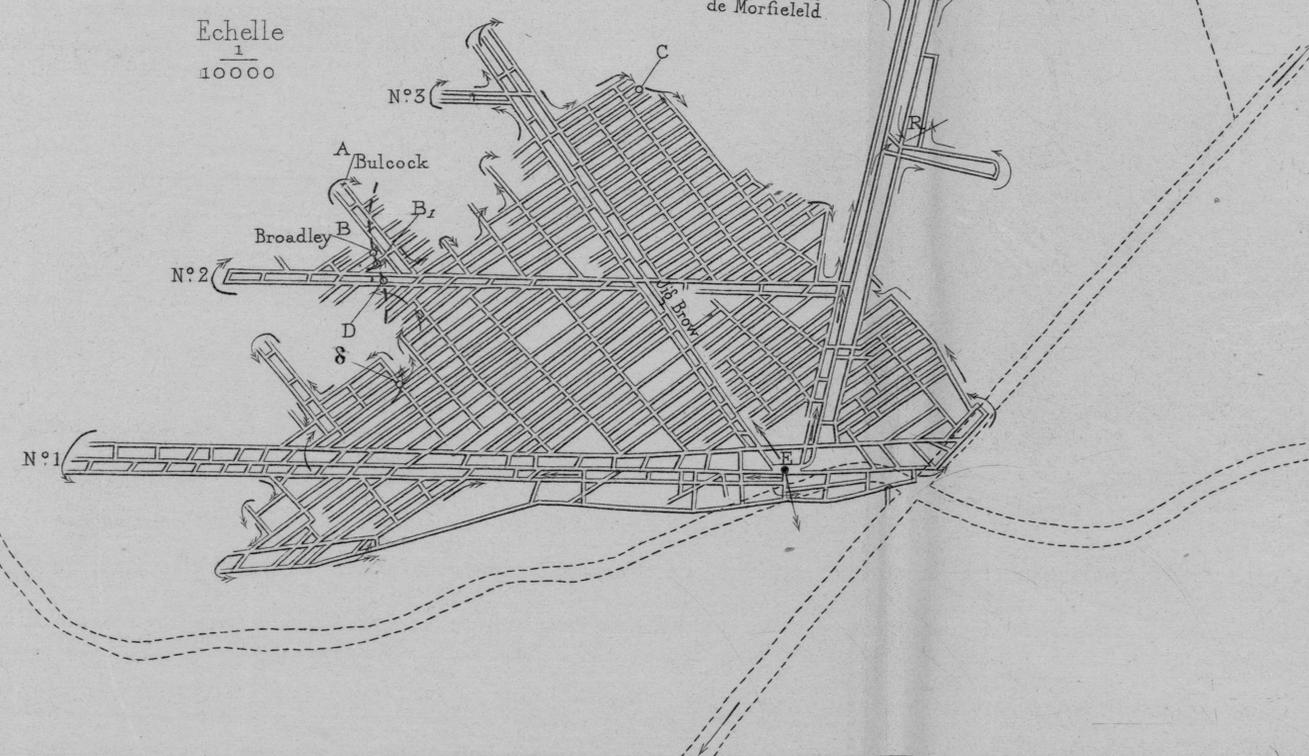
Légende

- Fig. 1 E. Puits d'entrée Moorfield
- E. Puits d'entrée Whinney Hill
- S. Puits de retour d°
- Fig. 2 P. Puits d'entrée Clifton Hall
- P. Puits de retour d°
- pi Puits Aðecroft
- m.m. Mixing run
- Courant d'entrée
- Courant de retour

Fig. 1

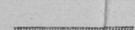
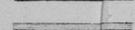
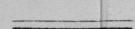
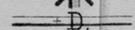
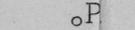
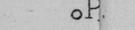
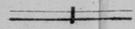
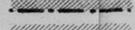
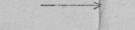
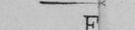
TRAVAUX DU PUIS MOORFIELD  
HOUILLÈRE DE ALTHAM

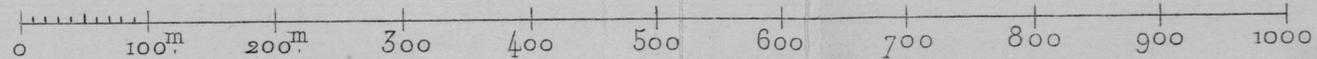
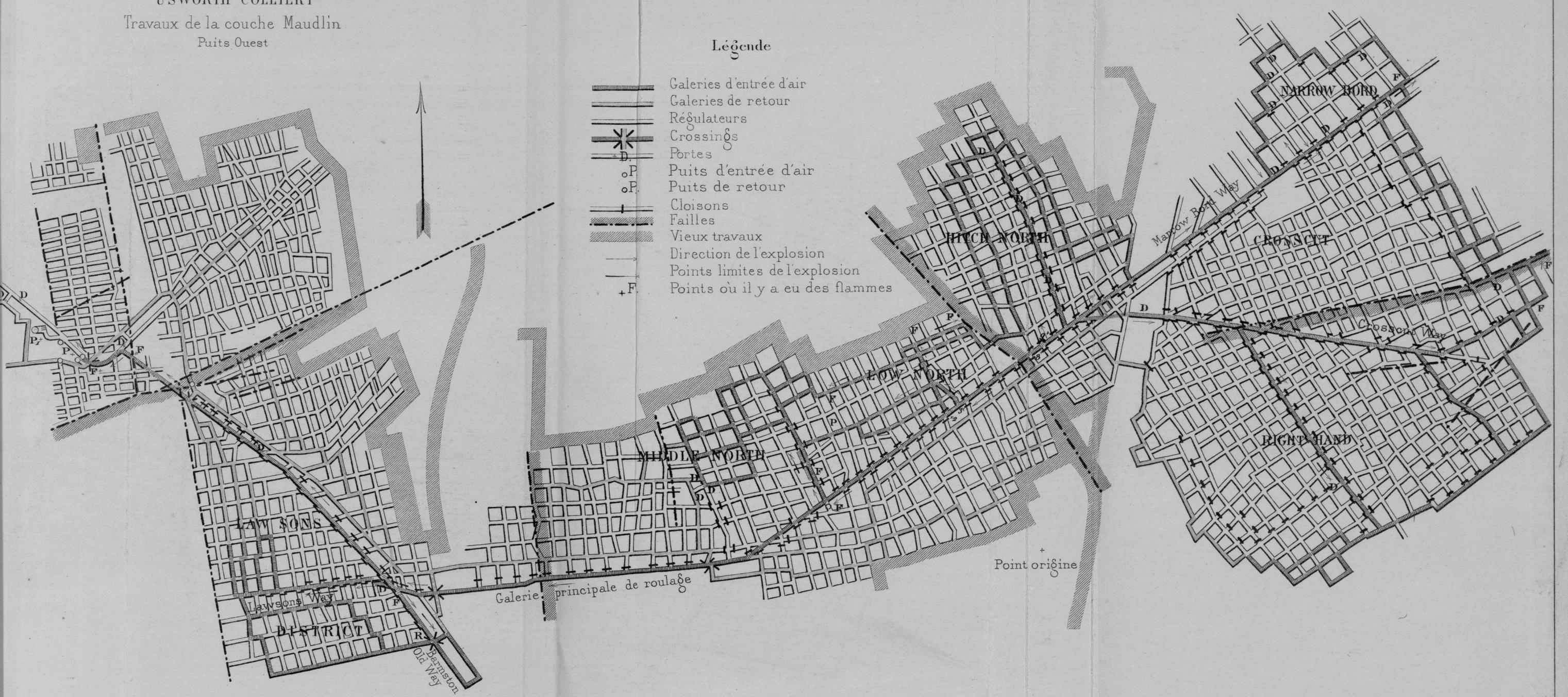
Echelle  $\frac{1}{10000}$



USWORTH COLLIERY  
Travaux de la couche Maudlin  
Puits Ouest

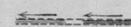
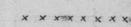
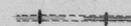
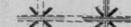
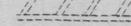
Légende

-  Galeries d'entrée d'air
-  Galeries de retour
-  Régulateurs
-  Crossings
-  Portes
-  Puits d'entrée d'air
-  Puits de retour
-  Cloisons
-  Failles
-  Vieux travaux
-  Direction de l'explosion
-  Points limites de l'explosion
-  Points où il y a eu des flammes



MARDY COLLIERY  
PLAN  
des Travaux du Puits N°2.

Echelle  
 $\frac{1}{750}$

- Légende
-  Direction des courants d'air
  -  Courant d'entrée
  -  Courant de retour
  -  Emplacements des victimes brulées
  -  Portes
  -  Toiles
  -  Régulateurs
  -  Crossings
  -  Travaux fermés
  -  Station de lampes
  -  •P' Puits de retour d'air
  -  •P Puits d'entrée d'air

