N° 433
(4)

BIBLIOTHÈQUE NATIONALE DES
N° d'Entrée
1 bis

ANNALES

DES MINES

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

MM.
LINDER, inspecteur général des mines, *président*.
BOCHET, inspecteur général.
CASTEL, d°
HATON DE LA GOUPILLIÈRE, inspecteur général, directeur de l'École supérieure des mines.
ROGER, inspecteur général.
ORSEL, d°
MALLARD, inspecteur général, professeur à l'École supérieure des mines.
LORIEUX, inspecteur général.
MASSIEU, d°
LAUR, d°
RÉSAL, inspecteur général, professeur à l'École supérieure des mines.
VILLOT, inspecteur général.
KELLER, ingénieur en chef, secrétaire de la Commission de la statistique de l'industrie minérale et des appareils à vapeur.

MM.
FUCHS, ingénieur en chef, professeur à l'École supérieure des mines.
VICAIRE, d°
CARNOT, ingénieur en chef, inspecteur de l'École supérieure des mines.
AGUILLON, ingénieur en chef, professeur à l'École supérieure des mines.
DOUVILLÉ, d°
CHEYSSON, ingénieur en chef des ponts et chaussées, professeur à l'École supérieure des mines.
BERTRAND, ingénieur des mines, professeur à l'École supérieure des mines.
LE CHATELIER, d°
LODIN, d°
SAUVAGE, ingénieur des mines, professeur-adjoint à l'École supérieure des mines.
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.

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

N° 433
(4)

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.

ÉCOLE NATIONALE DES MINES
BIBLIOTHÈQUE
N° d'Entrée
1 bis
2

HUITIÈME SÉRIE

MÉMOIRES. — TOME XIV

PARIS
V^VE CH. DUNOD, ÉDITEUR
LIBRAIRE DES CORPS NATIONAUX DES PONTS ET CHAUSSÉES, DES MINES ET DES TÉLÉGRAPHES
Quai des Augustins, n° 49

1888

N° 2433

(4)

LISTE DES ÉCHANGES AUTORISÉS

ENTRE LES ANNALES DES MINES ET LES PUBLICATIONS FRANÇAISES ET ÉTRANGÈRES.

Les *Annales des mines* ont été adressées, à titre d'échange, en 1888, aux Sociétés et publications dont les noms suivent :

1. — The Journal of the Franklin Institute. *Philadelphie.*
2. — The American Journal of science and arts. *New-Haven.*
3. — American philosophical Society. *Philadelphie.*
4. — Philosophical Transactions of the Royal Society of London.
5. — The quarterly Journal of the Geological Society. *Londres.*
6. — Minutes of the Proceedings of the Institution of civil Engineers. *Londres.*
7. — Royal Irish Academy. *Dublin.*
8. — Atti della Societa Toscana di Scienze naturali. *Pise.*
9. — L'Industria. Rivista tecnica ed economica illustrata. *Milan.*
10. — Mémoires de la Société de physique et d'histoire naturelle de Genève.
11. — Société géologique de France. *Paris.*
12. — Journal de mathématiques pures et appliquées. *Paris.*
13. — Annales de Chimie et de Physique. *Paris.*
14. — Société d'encouragement pour l'industrie nationale. *Paris.*
15. — Journal de Pharmacie et de Chimie. *Paris.*
16. — Kaiserlich-Königliche Geologische Reichsanstalt. *Vienne.*
17. — Royal geological Society of Cornwall. *Penzance.*
18. — Geological Survey of Great-Britain. *Londres.*
19. — Royal Society of Edinburgh. *Édimbourg.*
20. — Société de l'industrie minérale. *Saint-Étienne.*
21. — Smithsonian Institution. *Washington.*
22. — Zeitschrift der deutschen geolog. Gesellschaft. *Berlin.*
23. — Jahresbericht über die Fortschritte der Chemie. *Giessen.*
24. — Zeitschrift des Oesterreichischen Ingenieur-und Architekten-Vereins. *Vienne.*
25. — Anales de la Sociedad cientifica Argentina. *Buenos-Ayres.*
26. — Zeitschrift des Architekten und Ingenieur-Vereins zu Hannover. *Hanovre.*
27. — Geological Survey of India. *Calcutta.*
28. — Berg-und Huttenmännische Zeitung. *Leipzig.*
29. — Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse.
30. — Société Chimique de Paris.
31. — Il Politecnico. Giornale dell' Ingegnere, Architetto civile ed industriale. *Milan.*
32. — Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure. *Berlin.*
33. — Société des Ingénieurs civils. *Paris.*

Entrée 1 Cis

34. — Observatoire de Paris.
35. — Boston Society of Natural History. *Boston.*
36. — Société linnéenne de Normandie. *Caen.*
37. — Moniteur des intérêts matériels. *Bruxelles.*
38. — Iron. The Journal of science, metals and manufactures. *Londres.*
39. — Königliche Ungarische geologische Anstalt. *Bude-Pesth.*
40. — The Journal of the Iron and Steel Institute. *Londres.*
41. — The Engineering and Mining Journal. *New-York.*
42. — North of England Institute of Mining and Mechanical Engineers. *Newcastle-upon-Tyne.*
43. — Literary and Philosophical Society of Manchester.
44. — Berg-und Hüttenmännisches Jahrbuch der K. K. Bergakademien zu Leoben und Przibram und der Kön. Ungar. Bergakademie zu Schemnitz. *Vienne.*
45. — Oesterreichische Zeitschrift für Berg-und Hüttenwesen. *Vienne.*
46. — Revue universelle des Mines et de la Métallurgie. *Liège.*
47. — Transactions of the American Institute of Mining Engineers. *Easton* (*Pensylvanie*).
48. — Reale Accademia dei Lincei. *Rome.*
49. — American chemical Society. *New-York.*
50. — Academy of natural Sciences of Philadelphia.
51. — Comision del Mapa geologico de Espana. *Madrid.*
52. — Mémorial de l'Artillerie de la Marine. *Paris.*
53. — Midland Institute of mining, civil and mechanical Engineers. *Barnsley* (*Yorkshire*).
54. — L'Électricien, revue générale d'électricité. *Paris.*
55. — Giornale del Genio civile. *Rome.*
56. — Le génie civil. *Paris.*
57. — Revista minera y metalurgica. *Madrid.*
58. — Annales de la Société géologique de Belgique. *Liège.*
59. — United States geological Survey. *Washington.*
60. — Institut royal géologique de Suède. *Stockholm.*
61. — Canadian Institute. *Toronto.*
62. — Revue de la législation des mines. *Paris.*
63. — Section des travaux géologiques du Portugal. *Lisbonne.*
64. — Second geological survey of Pennsylvania. *Philadelphie.*
65. — Annalen des K.K. Naturhistorischen Hofmuseums. *Vienne.*
66. — Journal of the College of Science, Imperial University, Japan. *Tokyo.*
67. — Académie Impériale Léopoldino-Carolina des naturalistes. *Halle.*
68. — Annales de la Faculté des sciences de Toulouse.
69. — New-York Akademy of sciences. *New-York.*
70. — Institution of Mechanical Engineers. *Londres.*

N° 433 (4)

BIBLIOGRAPHIE.

DEUXIÈME SEMESTRE DE 1888.

Entrée 1 Juin 2

OUVRAGES FRANÇAIS.

1° *Mathématiques pures.*

Bertrand (J.). — Calcul des probabilités. In-8°, lviii-332 p. Paris, Gauthier-Villars et fils. 12 fr. (11194)

Biehler (C.). — Notes d'algèbre. Sur la théorie des équations et sur les séries. In-8°, 51 p. Paris, Gauthier-Villars et fils. 1f,75. (11933)

Bouvard (R. et L.). — Méthode rationnelle de simplification des calculs numériques reposant sur l'emploi simultané de tables ou échelles graphiques, numériques ou mixtes des nombres et des logarithmes concurremment avec les opérations les plus simples. Première partie : Table ou Échelle de multiplication. In-8°, 14 p. Versailles, imp. Cerf et fils; tous les libraires. (8558)

Calimon (A.). — Étude sur la sphère, la ligne droite et le plan. In-8°, 51 p. avec fig. Nancy, imp. Berger-Levrault et Ce. (12521)

Collignon (E.). — Examen de certaines séries numériques et Application à la géométrie. In-8°, 23 p. avec fig. Paris, imp. Chaix. (10212)

Commines de Marsilly (L. J. A. de). — Réfutation de l'interprétation de la géométrie non euclidienne essayée par M. Beltrami. In-8°, 15 p. Paris, imp. Chaix. (10489)

Darboux (G.). — Leçons sur la théorie générale des surfaces et les applications géométriques du calcul infinitésimal. Deuxième partie : les Congruences et les Équations linéaires aux dérivées partielles; Des lignes tracées sur les surfaces. In-8°, 528 p. Paris, Gauthier-Villars et fils. 15 fr. (12544)

DUCHEMIN (P.). — Des parallèles dans l'espace. Droites et Plans parallèles. In-8°, 16 p. avec fig. Avranches, imp. Gilbert (9969).

—— Théorie des parallèles et Certitude de la géométrie. État de la question. In-12, XVI p. avec fig. Coutances, Salettes. (9970)

—— Théorie des parallèles sans postulatum et Certitude de la géométrie. In-16, 78 p. avec fig. Coutance, Salettes. (9971)

GÉRAUDEL (N.). — Carrés et Racines. Ouvrage revu avec un très grand soin et consistant en une table des carrés et des nombres de 1 à 10.000, avec la différence entre chacun des carrés sur une nouvelle disposition des nombres, précédée d'une instruction sur la manière d'opérer. In-12, 72 p. Soissons, Lauthelin. (8889)

GRIESS (J.). — Un chapitre d'arithmétique. Nombres incommensurables, limites, mesure des grandeurs, rapports. In-8°, 8 p. Paris, Delagrave. (Extr. du *Journal de mathématiques élémentaires*). (9480)

HALPHEN (G.-H.). — Traité des fonctions elliptiques et de leurs applications. Deuxième partie : Application à la mécanique, à la physique, à la géodésie, à la géométrie et au calcul intégral. In-8°, 663 p. Paris, Gauthier-Villars et fils. 20 fr. (9196)

LAGAY. — Étude de la quadrature du cercle. 2e édition. In-8°, 16 p. Lyon, imp. Vitte et Perrussel. 0f,30. (6627)

LAGRANGE. — Œuvres de Lagrange. Publiées par les soins de M. J.-A. Serret (t. 1-10 et 13) et de M. Gaston Darboux, sous les auspices de M. le Ministre de l'instruction publique. T. 11. In-4°, XXII-502 p. Paris, Gauthier-Villars et fils. 20 fr. (9218)

LAISANT (C.-A.). — Propriété des équations; conséquences géométriques. In-8°, 12 p. avec fig. Paris, imp. Chaix. (10831)

LAURENT (H.). — Traité d'analyse. T. 4 : Calcul intégral. Théorie des fonctions algébriques et de leurs intégrales. In-8°, 458 p. av. fig. Paris, Gauthier-Villars et fils. 12 fr. (12621)

LEBON (E.). — Sur le calcul de quelques intégrales. In-8°, 8 p. Paris, imp. Chaix. (Extr. du *Journal de mathématiques spéciales*.) (9506)

LEMOINE (E.). — De la mesure de la simplicité dans les sciences mathématiques. In-8°, 20 p. av. fig. Paris, imp. Chaix. (10301)

LE PONT (H.). — Note d'analyse. In-8°, 5 p. Paris, imp. Chaix. (10052)

LOIR. — Caractère de divisibilité d'un nombre par un nombre premier quelconque (7, 11, 13, 17, 19, 23, 31...); par M. Loir, doyen honoraire de la Faculté des sciences de Lyon, et M. Loir, lieutenant de vaisseau. In-8°, 11 p. Paris, imp. Chaix. (Extr. du *Journal de mathématiques élémentaires*.) (7427)

RIEMANN (J.). — Sur le problème de Dirichlet (thèse). In-4°, 88 p. Paris, Gauthier-Villars et fils. (12115)

STOUFF (X.). — Sur la transformation des fonctions fuchsiennes (thèse). In-4°, 111 p. av. fig. Paris, Gauthier-Villars et fils. (6449)

STURM (C.). — Cours d'analyse de l'École polytechnique, par Ch. Sturm, de l'Institut. Revu et corrigé par E. Prouhet, répétiteur d'analyse à l'École polytechnique, et augmenté de la théorie des fonctions elliptiques par H. Laurent. 9e édition, revue et mise au courant du nouveau programme de la licence par A. de Saint-Germain, professeur à la Faculté des sciences de Caen. 2 vol. in-8°. T. 1, XXXII-563 p. av. fig.; t. 2, X-657 p. av. fig. Paris, Gauthier-Villars et fils. 15 fr. (9602)

TARRY (G.). — Nouvel essai sur la géométrie imaginaire. In-8°, 22 p. av. fig. Paris, imp. Chaix. (10660)

TISSERAND (F.). — Traité de mécanique céleste. T. 1er : Perturbation des planètes d'après la méthode de la variation des constantes arbitraires. In-4°, X-474 p. av. fig. Paris, Gauthier-Villars et fils. 25 fr. (12715)

2° *Physique. — Chimie. — Métallurgie.*

BERGET (A.). — Sur la conductibilité thermique du mercure et de quelques métaux (thèse). In-4°, 87 p. Paris, Carré. (7319)

BOUANT (E.). — Nouveau Dictionnaire de chimie, illustré de figures intercalées dans le texte, comprenant les applications aux sciences, aux arts, à l'agriculture et à l'industrie, à l'usage des chimistes, des industriels, des fabricants de produits chimiques, des agriculteurs, des médecins, des pharmaciens, des laboratoires municipaux, de l'École centrale, de l'École des mines, des écoles de chimie, etc., par E. Bouant, agrégé des sciences physiques, avec la collaboration de professeurs, d'ingénieurs et d'industriels. 4e fascicule : Pectique-Sucre. Avec 148 fig. Grand in-8° à 2 col., p. 721 à 960. Paris, J.-B. Baillière et fils. (9680)

CHAUTARD (P.). — Recherches sur les aldéhydes de la série grasse (thèse). In-4°, 67 p. Paris, Gauthier-Villars et fils. (6523)

CLASSEN (A.). — Précis d'analyse chimique qualitative; par A. Classen, professeur à l'École polytechnique d'Aix-la-Chapelle. Traduit sur la 3e édition allemande par L. Gautier. Avec figures dans le texte et tableaux d'analyse qualitative. In-18 jésus, 288 p. Paris, Savy. 6 fr. (10486)

Crolas et L. Ducher. — Note sur le phosphate monocalcique. In-8°, 8 p. Lyon, imp. Plan. (11528)

Crookes (W.). — Éléments et Méta-éléments, mémoire lu à la Société chimique de Londres par W. Crookes. Traduit, avec l'autorisation spéciale de l'auteur, par Willy Lewy, ingénieur civil, membre de la Société chimique de Paris. In-18 jésus, 43 p. av. fig. Paris, Gauthier-Villars et fils. 1 fr. (8848)

Denigès (G.) et E. Bonnans. — Pouvoir rotatoire et pouvoir réducteur de la lactose. In-8°, 13 p. Bordeaux, imp. Gounouilhou. (Extr. du *Bull. des travaux de la Soc. de pharmacie de Bordeaux.*) (9427)

Duhem (P.). — De l'aimantation par influence (thèse). In-4°, 143 p. Paris, Gauthier-Villars et fils. (11263)

Dumas. — Leçons sur la philosophie chimique professées au Collège de France, en 1836, par M. Dumas. Recueillies par M. Bineau. 2e édition. In-8°, 476 p. Paris, Gauthier-Villars et fils. (12560)

Engel (R.). — Nouveaux éléments de chimie médicale et de chimie biologique, avec les applications à l'hygiène, à la médecine légale et à la pharmacie. 3e édition, revue et corrigée. In-8°, VII-672 p. av. 107 fig. Paris, J.-B. Baillière et fils. 9 fr. (7570)

Enquête sur la précision des analyses dans les laboratoires de contrôle par la chambre syndicale des produits chimiques de Paris. In-4°, 12 p. Le Mans, imp. de l'Avenir de la Sarthe. (8337)

Four à chaux méthodique. (Système A. Billet.) In-8°, 8 p. et planche. Saint-Quentin, imp. Poëtte. (6589)

Gariel (C.-M.). — Physique. 2 vol. Grand in-8°. T. 1 : Propriétés générales des corps, chaleur, optique (première partie), 147 p. avec 198 fig.; t. 2: Optique (deuxième partie), acoustique, magnétisme, électricité, météorologie, XI-463 p. et fig. 199 à 448. Paris, Baudry et Ce. 30 fr. (11287)

—— Études d'optique géométrique: dioptres, systèmes centrés, lentiles, instruments d'optique. In-8°, VIII-240 p. av. fig. Paris, Nony et Ce. (12281)

Gouré de Villemontée (G.). — Recherches sur la différence de potentiel au contact d'un métal et d'un liquide (thèse). In-4°, 151 p. av. fig. Paris, Gauthier-Villars et fils. (6598)

Huntsman (B.). — Historique de l'invention de l'acier fondu en 1750. In-18, 15 p. Paris, imp. Capiomont. (10022)

Kalakoutski (N.-V.). — Étude sur les tensions intérieures dans la fonte et l'acier. In-8°, 104 p. av. fig. et 3 pl. Paris, Berger-Levrault et Ce. (Extr. de la *Revue d'artillerie.*) (8920)

Keromnès (C.). — Historique de la fabrication des principaux métaux employés dans la construction mécanique. Le Fer et ses dérivés : l'Acier et la Fonte; le Cuivre et le Bronze; Travail des métaux. Conférences faites les 27 novembre et 11 décembre 1887, à la Société industrielle du Nord. In-8°, 78 p. av. fig. et planche. Lille, imp. Danel. (Publication de la Société industrielle du nord de la France.) (8378)

Langlois (M.). — Dans les substitutions, les substitués ne prennent pas nécessairement la place des éléments éliminés; Isoméries dans la série benzinique; Composés ortho, méta, parabenziniques. In-8°, 5 p. avec fig. Paris, imp. Chaix. (10832)

—— Résultats généraux obtenus dans la théorie du mouvement atomique. In-8°, 8 p. avec fig. Paris, imp. Chaix. (10833)

—— Sur un point de la théorie du mouvement atomique. In-8°, 4 p. Paris, imp. Chaix. (10834)

Leidié (E.). — Recherches sur quelques combinaisons du rhodium (thèse). In-4°, 60 p. avec fig. Paris, Gauthier-Villars et fils. (12050)

Lippmann, E. Mathias et A. Renault. — Cours de thermodynamique professé à la Sorbonne; par M. Lippmann, de l'Institut. Rédigé par MM. Mathias et A. Renault, et précédé d'une préface de l'auteur. In-8°, VIII-248 p. avec fig. Paris, Carré. (10305)

Mathieu (E.). — Théorie de l'électrodynamique. In-4°, X-296 p. avec fig. Paris, Gauthier-Villars et fils. 15 fr. (9769)

Mahler (P.). — Les Principes de la métallurgie du fer et de l'acier. Travaux de M. Bell, par Pierre Mahler. Traduction par A. Hallopeau. In-8°, 4 p. Lille, imp. Lefebvre-Ducrocq. (9240)

Marchand (E.). — Relations des phénomènes solaires et des perturbations du magnétisme terrestre. In-8°, 47 p. et pl. Lyon, imp. Plan. (Extr. des *Mém. de l'Acad. des sciences, belles-lettres et arts de Lyon.*) (9523)

Montaud (B. de). — L'accumulateur employé comme transformateur-distributeur à courants continus dans les stations centrales électriques (mémoire présenté à la Société internationale des électriciens le 4 juillet 1888). In-8°, 44 p. avec fig. Paris, imp. Gauthier-Villars et fils; l'auteur. (12073)

Ouvrard (L.). — Recherches sur l'action des phosphates alcalins sur quelques oxydes métalliques (thèse). In-4°, 63 p. Paris, Gauthier-Villars et fils. (12090)

Riche (A.) et E. Gelis. — L'Art de l'essayeur (Principales opérations, fourneaux, vases, connaissances théoriques générales, agents et réactifs, argent, or, platine, palladium, plomb, mercure, cuivre, étain, antimoine, arsenic, nickel, cobalt, zinc,

aluminium, fer). In-18 jésus, 384 p. avec fig. Paris, J.-B. Baillière et fils. (10636)

Riche et Laborde. — Recherches sur le nickel et ses alliages. Action des sels de nickel dans l'économie, par M. Riche. Action du sulfate de nickel en injections hypodermiques et intraveineuses, par MM. Laborde et Riche. In-8°, 27 p. avec fig. Paris, imp. Marpon et Flammarion. (Extr. du *Journal de pharmacie et de chimie.*) (7966)

Ronna (A.). — Chimie appliquée à l'agriculture. Travaux et expériences du docteur A. Vœlcker, chimiste-conseil, directeur du laboratoire de la Société royale d'agricuture d'Angleterre. 2 vol. in-8°. Tome I, xxxiv-490 avec portrait; tome II, 488 p. Paris, Berger-Levrault et Ce. (Extr. des *Annales de la science agronomique française et étrangère.*) (8246)

Sainte-Claire Deville (E.). — Étude sur le gaz de houille : sa composition; rôle qu'y joue la benzine; influence de la composition élémentaire des houilles sur les rendements d'une usine à gaz. Extrait des rapports de M. Em. Sainte-Claire Deville, ingénieur de l'usine expérimentale de La Villette. In-4°, 91 p. Paris, imp. Ve Éthiou-Pérou et fils. (7477)

Saporta (A. de). — Les Théories et les Notations de la chimie moderne, avec une introduction par C. Friedel, de l'Institut. In-18 jésus, xvi-336 p. Paris, J.-B. Baillière et fils. 3^f^,50. (10118)

Sindico (P.). — L'immobilité de la terre graphiquement démontrée au moyen d'un fil à plomb. In-8°, 12 p. et planche. Paris, Klincksieck. (10123)

Terquem (A.) et B.-C. Damien. — Introduction à la physique expérimentale (Unités, calcul des erreurs, mesure des quantités primitives : longueurs, masse, temps). In-8°, viii-291 p. avec fig. Paris, Hermann. (8763)

Trouillot (J.-M.). — L'Hydrogène et les théories chimiques unitaire et dualistique. In-8°, 25 p. Paris, G. Masson. (7280)

Violle (J.). — Cours de physique. Tome II : Acoustique et Optique. Première partie : Acoustique, avec 163 fig. dans le texte. In-8°, v-315 p. Paris, G. Masson. (7716)

Willm (E.) et M. Hanriot. — Traité de chimie minérale et organique, comprenant la chimie pure et ses applications. Tome II : Chimie minérale. Grand in-8°, 788 p. avec fig. Paris, G. Masson. (12727)

Zalocostas (P.-N.). — Recherches sur la constitution chimique de la spongine. In-8°, 45 p. Paris, imp. Davy. (8506)

3° *Minéralogie. — Géologie. — Paléontologie.*

Benoist (E.-A.). — Esquisse géologique des terrains tertiaires du sud-ouest de la France. In-8°, 72 p. Bordeaux, imp. Gounouilhou. (Extr. du *Journal d'hist. nat. de Bordeaux et du Sud-Ouest.*) (6769)

Bosteaux (C.). — Un atelier néolithique au mont de Berru; les Degrés de perfectionnement du travail de la pierre, suivi de : Découverte d'un squelette d'auroch à Cernay; description d'un nouveau souterrain dolmen de la craie découvert à Cernay-lès-Reims. In-8°, 4 p. avec croquis. Paris, imp. Chaix. (12502)

Boyer (G.). — Remarques sur l'orographie des monts Jura; avec carte orogéologique du Jura bisontin, coupe du massif jurassien et un dessin de M. H. Michel. In-8°, 75 p. Besançon, imp. Dodivers et Ce. (8820)

Clerc (C.). — Etudes de géologie militaire. Le Jura. In-8°, iv-215 p. avec fig. et carte orogéologique du Jura franco-suisse à l'échelle de 1/500.000^e^. Paris, Berger-Levrault et Ce. 5 fr. (7551)

—— Les Alpes françaises, études de géologie militaire. Avec 30 fig. dans le texte et une carte coloriée. In-8°, 228 p. Paris, Berger-Levrault et Ce. (9115)

Daubrée (A.). — Les Eaux souterraines à l'époque actuelle, leur régime, leur température, leur composition au point de vue du rôle qui leur revient dans l'économie de l'écorce terrestre. 2 vol. in-8° avec fig. Tome Ier, iv-459 p.; tome II, 307 p. Paris, Ve Dunod. (11975)

—— Les Eaux souterraines aux époques anciennes, rôle qui leur revient dans l'origine et les modifications de la substance de l'écorce terrestre. In-8°, iv-447 p. avec fig. Paris, Ve Dunod. (11975)

Des Cloizeaux. — Notes sur les caractères optiques de la pharmacolite naturelle, suivie de : Note sur les propriétés optiques de la haidingérite. In-8°, 4 p. Paris, imp. Chaix. (8606)

Desplantes (F.). — Les Tremblements de terre. Grand in-8°, 121 p. avec grav. Limoges, E. Ardant et Ce. (9431)

Ficheur. — Esquisse géologique de la chaîne du Djurjura. In-8°, 15 p. Paris, imp. Chaix. (11548)

—— Sur l'âge miocène des dépôts de transport du versant sud du Djurjura. In-8°, 6 p. avec fig. Paris, imp. Chaix. (11549)

Fortin (R.). — Extrait des procès-verbaux du comité de géologie (année 1887). In-8°, p. 275 à 286. Rouen, imp. Lecerf. (Ext. du *Bull. de la Soc. des amis des sciences nat. de Rouen*). (9468)

Fouqué (F.). — Les Tremblements de terre, avec 44 fig. intercalées dans le texte. In-16, 328 p. Paris, J.-B. Baillière et fils. 3f,50. (7374)

Girardot (L.-A.). — Matériaux pour la géologie du Jura. Recherches géologiques dans les environs de Châtelneuf. Fascicule 1er. In-8°, 172 p. Lons-le-Saulnier, imp. Declume frères. (Publication de la Soc. d'émulation du Jura.) (9727)

Gosselet (J.). — Leçon d'ouverture du cours de géologie appliquée à la géographie professé à la Faculté des sciences de Lille. In-8°, 8 p. Lille, imp. Danel. (Publication de la Soc. de géographie de Lille.) (8640)

—— Cours élémentaire de géologie, à l'usage de l'enseignement secondaire classique et de l'enseignement secondaire spécial. 12e édition, entièrement remaniée. In-12, IV-212 p. avec 166 fig., une carte géologique de la France et plusieurs coupes géologiques. Paris, Ve Belin et fils. (12290)

Hébert (E.). — Notions générales de géologie. In-12, 123 p. avec 54 fig. Paris, G. Masson. (12303)

Kilian (W.). — Description géologique de la montagne de Lure (Basses-Alpes). In-8°, 468 p. Paris, G. Masson. (10829)

Kroustchoff (K. de). — Notice sur la granulite variolitique de Foni, près de Ghittoraï (Sardaigne). In-8°, 4 p. Paris, imp. Chaix. (8665)

Lacroix (E.). — De l'oxfordien dans le Mâconnais. In-8°, IV-20 p. Lyon, imp. Pitrat aîné. (9500)

Marcou (J.). — Sur les cartes géologiques, à l'occasion du *Mapoteca geologica americana*. In-8°, 32 p. Besançon, imp. Dodivers et Ce. (Extr. des *Mém. de la Soc. d'émulation du Doubs.*) (9244)

Montessus de Ballore (F. de). — Tremblements de terre et éruptions volcaniques au Centre-Amérique depuis la conquête espagnole jusqu'à nos jours. In-4°, 295 p. et planches. Dijon, imp. Jobard. (Publication de la Soc. des sciences nat. de Saône-et-Loire.) (12074)

Mouret (G.). — Note sur le terrain oolithique du sud-ouest de la France. In-8°, 11 p. Bordeaux, imp. Gounouilhou. (Extr. du *Journal d'hist. nat. de Bordeaux et du Sud-Ouest.*) (6655)

Nivoit (E.). — Géologie appliquée à l'art de l'ingénieur. Tome Ier (Phénomènes géologiques, minéraux, roches, fossiles). Grand in-8°, X-607 p. avec 197 fig. Paris, Baudry et Ce. 20 fr. (11365)

Nogués (M.-A.-F.). — La Sismologie terrestre, leçon d'ouverture du cours libre de sismologie de la Faculté des sciences de Paris. In-8°, 19 p. Paris, administration des Deux Revues. (Extr. de la *Revue scientifique.*) (10338)

Pallary. — Etude sur le quaternaire algérien. In-8°, p. 39 à 44. Lyon, imp. Pitrat aîné. (Publication de la Soc. d'anthropologie de Lyon.) (8207)

Pomel. — Le Suessonien à nummulites et à phosphorites des environs de Souk-Arras, suivi de : 1° Sur les boues geysériennes à quartz bipyramidés, à gypse et à cargneule des environs de Souk-Arras ; 2° Excursion de la section de géologie à l'ouest de la ville d'Oran ; 3° Excursion spéciale de la onzième section. In-8°, 20 p. Paris, imp. Chaix. (9564)

Portes (L.). — Manuel de minéralogie. In-12, 371 p. avec 66 fig. Paris, Doin. 5 fr. (9276)

Renard (A.). — La Reproduction artificielle des roches volcaniques, conférence faite le 18 mai 1888, à l'Institution royale de la Grande-Bretagne. In-8°, 27 p. Paris, administration des Deux Revues. (Extr. de la *Revue scientifique.*) (6704)

Renault (B.). — Les Plantes fossiles. In-18 jésus, 400 p. avec fig. Paris, J.-B. Baillière et fils. 3f,50. (10372)

Rouville (P. de). — La Société géologique de France à Commentry (Allier), août 1888. In-8°, 15 p. Moulins, imp. Auclaire. (Extr. de la *Revue scient. du Bourbonnais et du centre de la France.*) (12123)

Tavernier (H.). — Roches cristallines dans le canton de Taninge. In-8°, 15 p. Annecy, imp. Abry. (Extr. de la *Revue savoisienne.*) (9031)

Vélain (C.). — Conférences de pétrographie. 1er fascicule. Grand in-8°, XVIII-114 p. avec fig. Paris, Carré. (12967)

4° *Mécanique. — Exploitation des mines.*

Aguillon (L.). — De la réunion de la mine et de la minière de fer. In-8°, 10 p. Lille, imp. Danel. (Extr. de la *Revue de la législation des mines.*) (7725)

Barbier (E.-J.). — Notes sur l'approvisionnement du combustible en Italie; utilité de l'exportation des charbons français en Italie par chemins de fer. Notes sur l'approvisionnement du combustible en France et sur le développement à donner aux exploitations minières françaises. In-8°, 20 p. Paris, imp. Lefebvre. (12485)

Bel (J.-M.). — Aperçu de la situation de l'industrie minière au Venezuela en 1887. In-8°, 6 p. Lille, imp. Lefebvre-Ducrocq.

(Extr. du *Bull. de l'Assoc. amicale des élèves de l'Ecole sup. des mines.*) (9070)

Blavier (A.). — Note sur la résistance du schiste ardoisier d'Angers, d'après les expériences de M. P. Larivière, ingénieur civil. In-8°, 23 p. et 2 pl. Angers, imp. Lachèse et Dolbeau. (11483)

Buchetti (J.). — Les Machines à vapeur actuelles. Supplément. Machines simples, Compound, à triple expansion, à vitesse normale, à grande vitesse. Texte. In-4°, 40 p. avec fig. Paris, imp. Davy; l'auteur. (12510)

Compresseurs d'air et Pompes à faire le vide fonctionnant à sec, système de MM. Burckhardt et Weiss, ingénieurs-constructeurs à Bâle. Grand in-8°, 11 p. Paris, libr. technologique. (Extr. de la *Publication industrielle des machines, outils et appareils*, par Armengaud aîné.) (9406)

Cornut (E.). — Statistique des essais hydrauliques des chaudières à vapeur. In-8°, 38 p. avec fig. Lille, imp. Danel. (7554)

—— Théorème relatif au calcul du poids de vapeur présent dans le cylindre. In-8°, 4 p. Lille, imp. Danel. (8587)

—— Distribution d'eau d'Emmerin. Essais de réception des machines et des pompes. In-8°, 28 p. et pl. Lille, imp. Danel. (9130)

Corpet (L.) et M. Perret. — Les Engrais. Grue roulante à vapeur, de 10 tonnes, à châssis et pivot en fer; par M. L. Corpet, (pl. 41). Extracteurs ou purgeurs automatiques d'eau de condensation de divers systèmes (pl. 42). Chargeurs de rails sur wagons, système de M. C. Guyenet (pl 43). Semailles, ensemencement à la volée et au semoir, prix de revient comparatif, semoir et sarcloir; par M. Michel Perret (pl. 44). In-8°, pages 481 à 528. Paris, Libr. technologique. (*Publication industrielle des machines, outils et appareils*, par Armengaud aîné). (8844)

Demoulin (M.). — Nouvelles machines marines des bâtiments à grande vitesse, des torpilleurs et des embarcations à vapeur. In-4°, xvi-240 p. et atlas in-4° de 55 pl. Paris, Bernard et Ce. 40 fr. (8856)

Dujardin-Beaumetz (F.). — Histoire graphique de l'industrie houillère en Belgique depuis 1865 d'après les documents officiels. In-4°, viii p. et 24 pl. Paris, Bernard et Ce. (8864)

Errington de la Croix (J.). — Rapport sur les mines d'étain de Selangor (presqu'île malaise) et les concessions d'Ayer-Itam, Pataling, Batu. In-4°, 19 p. Paris, imp. Levé. (10995)

Fèvre (L.) et E. Parinet. — Mineur silésien du bassin houiller de la Ruhr (Prusse rhénane), ouvrier tâcheron, dans le système des engagements momentanés, d'après les renseignements recueillis sur les lieux en octobre 1886; par M. L. Fèvre, ingénieur des mines. Précédé du Paysan et Maçon émigrant de la Marche (Creuse), précis de monographie; par M. l'abbé Em. Parinet. Grand in-8°, p. 219 à 280. Paris, Firmin-Didot et Ce. (*Les Ouvriers des deux mondes*, publiés par la Société d'économie sociale.) (12569)

Flamant (A.). — Mécanique générale. Cours professé à l'École centrale des arts et manufactures. Grand in-8°, xxxvi-544 p. avec 203 fig. Paris, Bernard Tignol. 20 fr. (11277)

Gruner (E.). — Industrie du sel dans le bassin du Donetz (Russie méridionale). Rapport de mission (juillet-août 1888). In-4°, 58 p. Paris, Chaix. (9187)

Henry (J.-E.). — Note sur une nouvelle pompe foulante et à un seul clapet, utilisant la force vive de l'eau, dite pompe univalve à piston plongeur. In-8°, 15 p. Paris, Chaix. (Extr. des *Mém. de la Soc. des ingénieurs civils.*) (8153)

Ichon. — Note sur les explosions dans les mines. In-8°, 12 p. Angers, imp. Germain et Grassin. (Extr. du *Bull. de la Soc. d'études scientif. d'Angers.*) (9206)

Kapp (G.). — Transmission électrique de l'énergie; par Gisbert Kapp. Traité pratique traduit de l'anglais, par *E. Boistel*. In-8°, xii-398 p. avec 120 fig. Paris, Carré. (8377)

Lagrafel (A.) et J. d'Allest. — Note sur les chaudières tubulaires marines ou autres à très haute pression, système A. Lagrafel et J. d'Allest. (Ateliers Fraissinet et Ce, à Marseille.) In-4°, 28 p. av. fig. Marseille, imp. Barlatier-Feissat. (12618)

Launay (L. de). — L'Industrie des schistes bitumineux à Buxière-les-Mines (Allier). In-8°, 22 p. et planches. Moulins, imp. Auclaire. (Extr. de la *Revue scientifique du Bourbonnais.*) (7894)

Léauté (H.). — Sur les mécanismes cryptographiques de M. de Viaris. In-8°, 16 p. av. fig. Paris, imp. Chaix. (Extr. du journal *le Génie civil.*) (10293)

Lesourd (G.). — Mémoire sur un nouveau générateur à production de vapeur instantanée de MM. Serpollet frères. In-8°, 15 p. et planche. Paris, Chaix. (Extr. des *Mém. de la Soc. des ingénieurs civils.*) (11620)

Malosse (T.). — Écoulement d'un liquide dans un tube rigide. In-8°, 7 p. Montpellier, imp. Boehm. (Extr. de la *Gazette hebdomadaire des sciences médicales.*) (8685)

Mauclère (V.). — Note sur le frein funiculaire, système Lemoine.

In-8°, 18 p. Paris, Chaix. (Extr. des *Mém. de la Soc. des ingénieurs civils.*) (12354)

Périssé (S.). — Réponses aux observations présentées dans la discussion du Mémoire sur les accidents aux tôles de coup de feu des chaudières à vapeur; par l'auteur du Mémoire. In-8°, 16 p. et pl. Paris, Chaix. (Extr. du même recueil.) (8438)

Pierrot. — Rapport sur les travaux de sauvetage exécutés à Blancheface, commune de Sermaise (Seine-et-Oise), du 21 avril au 15 mai 1888, par un détachement du 1er régiment du génie. In-8°, 23 p. av. fig. Paris, Berger-Levrault et Ce. (Extr. de la *Revue du génie militaire.*) (12917)

Rapport supplémentaire sur l'étude des questions relatives à l'emploi des explosifs en présence du grisou. In-4°, 58 p. Paris, imp. Marpon et Flammarion. (Commission des substances explosives.) (12684)

Remaury. — Note sur l'emploi dans les chaudières à vapeur des tôles en métal fondu. In-8°, 11 p. Paris, Chaix. (Ext. des *Mém. de la Soc. des ingénieurs civils.*) (8746)

Société de l'industrie minérale. Réunion du district du Centre. Compte rendu de l'excursion aux Colettes du 3 juin 1888. In-8°, 10 p. Montluçon, imp. Herbin. (9312)

Stapfer (D.). — Proportions à donner aux chaudières à vapeur. In-8°, 15 p. av. fig. Marseille, imp. Barlatier-Feissat. (Extr. du *Bull. de la Soc. scientif. industrielle de Marseille.*) (12705)

Statistique de l'industrie minérale et des appareils à vapeur en France et en Algérie pour l'année 1886, avec un appendice concernant l'exploitation des phosphates de chaux et deux tableaux consacrés à la statistique minérale internationale. In-4°, 416 p. av. diagramme et carte coloriée. Paris, Ve Dunod; Baudry et Ce. 10 fr. (Ministère des travaux publics.) (7487)

Statistique des phosphates de chaux. In-4°, 72 p. et carte coloriée. Paris, Ve Dunod; Baudry et Ce. 4 fr. (Extr. de la Satistique de l'industrie minérale et des appareils à vapeur en France et en Algérie.) (9025)

Thiré (A.). — Éléments de statique graphique appliquée à l'équilibre des systèmes articulés. In-8°, II-73 p. Paris, Baudry et Ce. (6728)

Vautier (T.). — Recherches expérimentales sur la vitesse d'écoulement des liquides par un orifice en mince paroi (thèse). In-4°, 155 p. Paris, Gauthier-Villars et fils. (7285)

Witz (A.). — Graissage des moteurs à gaz. In-8°, 9 p. av. fig. Lille, imp. Danel. (Soc. industrielle du nord de la France.) (8782)

5° *Constructions. — Chemins de fer.*

Barbier (V.) et N. Riggenbach. — Club Alpin français. Section d'Aix-les-Bains. Chemin de fer du Revard. Rapport présenté au comité des études par M. V. Barbier, président, suivi de l'opinion de M. N. Riggenbach, ingénieur. In-8°, 52 p. Aix-les-Bains, imp. Gérente. (11467)

Bonnami (H.). — Fabrication et contrôle des chaux hydrauliques et des ciments. Théorie et pratique; influences réciproques et simultanées de différentes opérations et de la composition sur la solidification: énergie, thermodynamique, thermochimie. In-8°, XVI-276 p. Paris, Gauthier-Villars et fils. 6f,50. (7086)

—— Fabrication et contrôle des chaux hydrauliques et des ciments. In-8°, 7 p. Paris, imp. Chaix. (11485)

Bonnin (R.). — Sablière à vapeur pour augmenter l'adhérence des roues de locomotives. In-8°, 8 p. avec fig. Bureaux du journal *Le Génie civil.* (6783)

Boyer (L.). — Chemin de fer de Marvéjols à Neussargues. Viaduc de Garabit sur la Trueyre. Avec une notice nécrologique sur l'auteur par L. Lévy, ingénieur au corps des mines. In-8°, XVI-402 p. avec fig. et album in-4° oblong de 74 planches. Paris, Ve Dunod. (10454)

Breittmayer (A.). — La Navigation maritime et les Chemins de fer. Nécessité de la jonction du Rhône avec nos ports méditerranéens. Communication faite à la Société de géographie de Marseille. In-8°, 11 p. Marseille, imp. Barlatier-Feissat. (10458)

Buchetti (J.). — Manuel des constructions métalliques et mécaniques, ouvrage contenant le rappel des formules classiques, les conditions d'essai, de résistance, de réception des métaux actuels et des organes, tels que: câbles métalliques, de suspension, de transports aériens, d'extraction, et de transmissions, etc. Texte avec 220 fig. In-4°, VII-364 p. Angers, imp. Burdin et Ce. Paris, l'auteur. (7762)

Busquet (L.). — Chemin de fer à navires de Pauillac à la Méditerranée. In-8°, 7 p. Bordeaux, imp. Gounouilhou. (6797)

—— Le Chemin de fer à navires de Pauillac à la Méditerranée et le Canal des Deux-Mers. In-8°, 4 p. Bordeaux imp. Gounouilhou. (3099)

Canovetti (C.). — Charpente métallique de l'ancienne halle aux blés. Bourse du commerce, à Paris. In-8°, 7 p. et planche. Paris, imp. Chaix. (Extr. du journal *Le Génie civil*). (8827)

Carte spéciale des chemins de fer français, par *L. Bertin*. Paris, imp. Monrocq. (1374)

Collin (J.) et Eiffel. — Ponts portatifs économiques, système Eiffel. Communication sur leur application en Cochinchine et au Tonkin par M. J. Collin, ingénieur civil, et communication de M. Eiffel sur l'emploi de ponts du même type au rétablissement des voies ferrées à largeur normale. In-8°, 23 p. avec fig. Paris, Chaix. (Extr. des *Mém. de la Soc. des ingénieurs civils.*) (11964)

Cornut (E.). — Comparaison des tôles des diverses forges au point de vue des numéros. In-8°, 19 p. Lille, imp. Danel; Association des propriétaires d'appareils à vapeur du nord de la France. (8076)

Feraté (M.-A.-X.). — La Tour Eiffel, étude et description. In-8°, 8 p. avec fig. Paris, imp. Parrot et Ce. (7150)

Féraud. — Note sur l'amélioration de la suspension des voitures de chemins de fer par l'application en dedans des menottes des ressorts à lames. In-8°, 15 p. Paris, Chaix. (Extr. des *Mém. de la Soc. des ingénieurs civils*). (8125)

Guyenet (C.). — Chemins de fer. Chargeur de rails sur wagon. In-8°, 7 p. Paris, Libr. technologique. (Extr. de la *Publication industrielle des machines, outils et appareils*, par Armengaud aîné.) (9194)

Instruction sur le montage et le chargement sur wagon des rampes mobiles en charpente et en fer. (Compagnie des chemins de fer de l'Est. Voie.) In-8°, 16 p. av. fig. Paris, imp. Baudoin et Ce. (Extr. du Règlement général pour les transports militaires par chemin de fer.) (11041)

Lévy (L.). — Notice nécrologique sur Léon Boyer, ingénieur des ponts et chaussées, directeur des travaux du canal interocéanique. Avec une note de M. Maurice Lévy sur le viaduc de Garabit, exposée à l'appui de la présentation de l'ouvrage de Léon Boyer à l'Académie des sciences, et un compte rendu du même ouvrage par M. T. Seyrig. In-8°, 30 p. avec portrait et planche. Paris, Chaix. (Extr. de la *Revue scientifique.*) (11622)

Moreau (A.). — Expériences sur le dosage et le rendement des chaux et des mortiers. In-8°, 13 p. Paris, Chaix. (Extr. du *Bull. technol. de la Soc. des anciens élèves des Écoles nat. d'arts et métiers.*) (7644)

Note sur le tramway à vapeur à fortes rampes, système Decauville, et sur la locomotive Coupound articulée, système Mallet, In-8°, 7 p. av. fig. Paris, Chaix. (Extr. des *Procès-verbaux des séances de la Soc. des ingénieurs civils.*) (7000)

Pieussan (E.). — Traité de charpente par le calcul graphique : fermes simples, fermes Polonceau et fermes à treillis. 1re édition. In-8°, 48 p. av. atlas de 21 pl. Paris, imp. Chaix. Lille, l'auteur. (8220)

Protection des trains : Couverture par les trains eux-mêmes; Utilité de l'application du principe de l'automaticité aux disques avancés des gares et des postes intermédiaires du block-system sur les chemins de fer français. In-4°, 15 p. Dijon, imp. Darantière. (8738)

Recueil des lois, décrets, conventions et cahiers des charges concernant les chemins de fer d'Algérie. In-8°, 642 p. Paris, Imp. nationale. (Ministère des travaux publics.) (7957)

Schwab (F.). — Quelques mots sur l'exploitation des chemins de fer et en particulier sur l'exploitation de la Compagnie de l'Est. In-8°, 22 p. Nancy, imp. Berger-Levrault et Ce. (Extr. du *Bull. de la Soc. industrielle de l'Est.*) (12696)

Sinner (C. de). — La France et le Simplon. In-8° à 2 col., 83 p. Paris, bureau du Moniteur industriel. 2 fr. (Extr. du *Moniteur industriel.*) (6720)

Savinière (E.). — Rétablissement rapide des ponts détruits en temps de guerre. In-8°, 8 p. av. fig. Paris, imp. Chaix. (12420

Tour (la) Eiffel et l'Exposition de 1889, d'après les documents officiels; par Un ingénieur. Édition illustrée. In-12, 118 p. Paris, Gombault et Singier. (12429)

Tournier (J.-O.). — Sécurité, protection et bien-être en chemin de fer par les loges de sûreté et d'installation privée formant par leur réunion un nouveau genre de voiture dites wagons-loges. Mémoire relatif à l'article 5 du projet de loi sur la sécurité publique en chemin de fer. In-4°, 18 p. et planche. Paris, imp. Jouandeaux. (11430)

Vallée (Z.). — Notions pratiques sur les opérations du tracé de l'étude d'un avant-projet de chemin de fer, comprenant les problèmes de traction. In-12, II-254 p. av. fig. et 4 pl. Paris, Bernard et Ce. (11435)

Weyrauch (J.-J.). — Stabilité des constructions en fer et en acier et calcul de leurs dimensions; par J. J. Weyrauch, professeur à l'École polytechnique de Stuttgard. Édition française, revue et augmentée par l'auteur et annotée par Michel Svilokossitch, ingénieur civil. In-8°, VI-252 p. av. 63 fig. Paris, Bernard et Ce. 10 fr. (9046)

6° *Objets divers.*

Avantages de l'emploi du gaz à l'éclairage, au chauffage domestique et industriel ainsi qu'à la production de la force motrice. Chauffage au coke. In-18, 24 p. Paris, libr. du journal *le Gaz.* (12480)

Berland (E.) et A. Chenevier. — Nouvel appareil pour mesurer la fluidité des huiles et autres liquides. In-8°, 12 p. et 4 tableaux. Bordeaux, imp. Gounouilhou. (Extr. des *Mém. de la Soc. des sciences physiques et naturelles de Bordeaux.*) (9072)

Cheysson (E.). — L'Imprévoyance dans les institutions de prévoyance, communication faite à la Société d'économie sociale, le 27 mai 1888. In-8°, 23 p. Paris, Guillaumin et Ce. (10959)

Dumas-Guilin (M.). — Manuel du dynamiteur. La dynamite de guerre et le coton-poudre, leur fabrication, leur conservation, leur transport et leur emploi d'après les décrets et règlements en vigueur dans l'armée française. In-18 jésus, XXVIII-360 p. Limoges et Paris, Charles Lavauzelle. 4 fr. (6571)

Durand-Claye (A.). — Le Desséchement du lac Copaïs (Grèce). In-8°, 22 p. Paris, Imp. nationale. (Extr. du *Bull. de la direction de l'hydraulique agricole.*) (8868)

Francon (J.-A.). — Tarif de cubage des bois équarris et ronds évalués en stère et fractions décimales du stère. In-18 jésus, 407 p. Paris, Garnier frères. (6882)

Husson (F.). — L'Industrie devant les problèmes économiques et sociaux : travail, mutualité, épargne. In-18 jésus, 361 p. Tours, imp. Arrault et Ce. 3^f^,50. (7871)

Jannet (C.). — L'Assurance obligatoire. In-8°, 40 p. Paris, imp. de Soye et fils. (Extr. du *Correspondant.*) (6613)

Kessler (L.). — Étude sur le décret du 15 octobre 1870. Du régime des indemnités pour les dommages causés par l'industrie. In-8°, 47 p. Paris, imp. Maulde et Ce. Clermont-Ferrand, l'auteur. 1^f^,50. (7410)

Laffont (M.). — Le Gaz d'eau au point de vue du combustible, de la force motrice, de l'éclairage et de l'hygiène. In-8°, 150 p. et tableaux. Paris, Ve Larousse et Ce. 3 fr. (12040)

Moly (H. de). — L'Assurance obligatoire et le Socialisme d'État. In-8°, 16 p. Paris, Guillaumin et Ce. (Extr. de la *Réforme sociale.*) (6405)

Pillet (J.). — Cours de lavis théorique à l'École polytechnique. I : Ombres usuelles (rayon à 45°). II : le Rendu dans le dessin d'architecture et dans le dessin de machines. Grand in-4°, IV-90 p. av. fig. Bar-le-Duc, imp. Comte-Jacquet. (12389)

—— Traité de perspective linéaire, précédé du tracé des ombres usuelles (rayon à 45°) et suivi du rendu dans le dessin d'architecture et dans le dessin de machines. 2e édition, revue et augmentée. Le présent traité est accompagné d'un complément de 24 p. avec fig. renfermant les additions contenues dans la 2e édition. Grand in-4°, II-202 p. av. fig. Paris, Delagrave. (12390)

Ritter (G.). — Alimentation de la ville de Paris en eau, force et lumière électrique au moyen d'une dérivation des eaux des lacs du Jura suisse. In-8°, 40 p. Paris, Chaix. (Extr. des *Mém. de la Soc. des ingénieurs civils.*) (11693)

Rolland (G.). — La Commission française au Sahara, L'Ouéd Rir'; le Chemin de fer de Biskra-Tougourt-Ouargla. In-8°, 23 p. av. fig. Paris, imp. Chaix. (9585)

OUVRAGES ANGLAIS.

1° *Mathématiques pures.*

Ball (W. W. R.). — A Short Account of the History of Mathematics. In-8°, 466 p. Macmillan. 13^f^,15.

Blater (J.). — Table of Quarter Squares of all Whole Numbers from 1 to 200.000. In-4°. Trübner. 26^f^,25.

Crowther (W. E.). — Elementary Text-Book of Projectional Solid Geometry; or, The Descriptive Drawing of Solid Objects and their Component Parts according to the Method of Orthographic Projection; to which is added a Section on Plane and Arithmetical Geometry and the Construction of Scales. In-8°, 114 p. Heywood. 1^f^,25.

Dodgson (C. L.). — Curiosa Mathematica. Part 1 : A New Theory of Parallels. In-8°, 86 p. Macmillan. 2^f^,50.

Graham (R.). — Algebraic Factors and Elimination. With numerous Examples and Exercises. 3rd ed., Revised and Enlarged. In-8°, 120 p. Simpkin. 2^f^,50.

Klein (F.). — Lectures on the Ikosahedron and the Solution of Equations of the Fifth Degree. Trans. by G. C. Morrice. In-8°. Trübner. 13^f^,15.

Knight (W. T.). — Algebraic Factors : How to Find Them and

How to Use Them. Enlarged ed., to which is added Factors in the Examination Room. In-12, 120 p. Blackie. 2f,50.

Nixon (R. C.). — Euclid Revised. Containing the Essentials of the Elements of Plane Geometry as Given by Euclid in his First Six Books. 2nd ed. In-8°, 414 p. Frowde. 7f,50.

Palmer (J. H.). — Text-Book of Pratical Logarithms and Trigonometry. In-12, 136 p. Macmillan. 5f,65.

Rawle (J. S.). — Practical Plane and Solid Geometry, Scales and Pattern Drawing. Revised and enlarged ed. With nearly 600 Diagrams. In-8°, 132 p. Simpkin. 1f,90.

Skerry (G. E.). — Practical Papers on Higher Arithmetic. 2nd ed. In-8°, 80 p. Skerry. 1f,90.

2° *Physique. — Chimie. — Métallurgie.*

Adams (Miss). — Lessons on Light. Illust. by Easy Diagrams. In-8°, 42 p. Relfe Brothers. 0f,95.

Ayrton (W. E.). — Practical Electricity. 3rd ed. In-8°, Cassell. 9f,40.

Caillard (E. M.). — The Invisible Powers of Nature. In-8°, 250 p. Murray. 7f,50.

Eissler (M.). — The Metallurgy of Gold : A Practical Treatise on the metallurgical Treatment of Gold-bearing Ores, including the Processes of Concentration and Chlorination, and the Assaying, Melting and Refining of Gold. With 90 Illusts. In-8°, 198 p. Lockwood and Son. 9f,40.

Evans (J. C.). — A New Course of Experimental Chemistry, including the Principles of Qualitative and Quantitative Analysis; Being a Systematic Series of Experiments and Problems for the Laboratory and Class Room. In-8°, 228 p. Murby. 3f,15.

Gray (A.). — The Theory and Practice of absolute Measurements in Electricity and Magnetism. 2 vols. Vol. 1. In-8°, 534 p. Macmillan. 15f,65.

Heath (R. S). — An Elementary Treatise on Geometrical Optics. In-8°, 212 p. Cambridge Warehouse. 6f,25.

Hiorns (A. H.). — Practical Metallurgy and Assaying : A Text Book for the Use of Teachers, Students and Assayers. In-12, 480 p. Macmillan. 7f,50.

—— A Text-Book of Elementary Metallurgy for Use of Students. In-8°, 240 p. Macmillan. 5 fr.

Jago (W.). — An Introduction to Practical Inorganic Chemistry. In-8°, 72 p. Longmans. 1f,90.

Mills (J.). — Alternative Elementary Chemistry : Being a Course of Lessons Adapted to the Requirements of the New Syllabus of Chemistry Recently Instituted by the Science and Art Department. With a Preface by Prof. *Thorpe*. Illust. with 65 Drawings. In-12, 112 p. Low. 1f,90.

Murray (R. M.). — Chemical Notes and Equations for use of Students. New ed., revised. In-12, 114 p. Simpkin. 2f,50 et interfolié 3f,15.

Roscoe (H. E.) and Schorlemmer (C. A.). — Treatise on Chemistry. Vol. 1. The Non-Metallic Elements. With Illusts. and a Portrait of Dalton, engraved by C. H. Jeens. New and thoroughly revised ed. In-8°, 791 p. Macmillan. 26f,25.

Ross (W. A.). — The Blow Pipe in Chemistry, Mineralogy, and Geology. 2nd ed., Revised and Enlarged. In-8°, 228 p. Lockwood and Son. 6f,25.

Sexton (A. H.). — Outlines of Qualitative Analysis. With Illusts. In-8°, 174 p. Griffin. 4f,40.

—— Outlines of Quantitative Analysis. 2nd ed., revised. In-8°, 138 p. Griffin. 3f,75.

Wills (G. S. V.). — Chemistry. Vol. 1 : Inorganic. In-8°, 154 p. Simpkin. 3f,75.

Wylie (C.). — Iron ad Steel Founding. Illust. with 49 Diagrams. 2nd ed., revised and enlarged. In-8°, 324 p. Simpkin. 6f,25.

3° *Minéralogie. — Géologie. — Paléontologie.*

Challenger. — Report on the Scientific Results of the voyage of H. M S. *Challenger* during the Years 1873-1876. Prepared under the Superintendence of the late Sir *C. Wyville Thomson*. Zoology, vol. 26, 62f,50; vol. 27, 37f,50; vol. 28, 39f,40.

Eruption of Krakatoa. History and Description. Edit. by *G. J. Symons*. In-4°. Trübner. 37f,50.

Etheridge (R.). — Fossils of the British Islands : Stratigraphically and Zoologically Arranged. Vol. 1 : Palæozoic, comprising the Cambrian, Silurian, Devonian, Carboniferous and Permian Species. With Supplementary Appendix brought down to the end of 1836. In-4°, Frowde. 37f,50.

Galloway (W. B.). — Science and Geology in Relation to the Universal Deluge. In-8°, 167 p. Low. 10f,65.

Geikie (J.). — Outlines of Geology : An Introduction to the Science for Junior Students and General Readers. 2nd ed., revised. In-8°, 430 p. Stanford. 15 fr.

Geological Record for 1880-1884. Edit. by *W. Topley* and *C. D. Sherborn*. Vol. 1 : Stratigraphical and Descriptive Geology. In-8°, 554 p. Taylor and Francis. 20 fr.

Geological Survey. England and Wales. The Geology of the Cheviot Hills (English Side). Explanation of Quarter-sheet 108 N.-E. New Series, Sheet 5. By *C. T. Clough*. 1f,90.

—— England and Wales. The Geology of the Country Around East Dereham. Explanation of Quarter-sheet 66 N.-W. By *J. H. Blake*. Parts by *H. B. Woodward* and *F. J. Bennett*. 1f,90.

—— Memoirs 7 and 8. Explanatory Memoir to accompany Sheets 7 and 8 of the Maps of the Geological Survey of Ireland. By *R. G. Symes*, *F. W. Egan*, and *A. M'Henry*. With Palæontological Notes by *W. H. Baily*. 2f,50.

Gorham (J.). — A System for the Construction of Crystal Models in the Type of an Ordinary Plait Exemplified by the Forms belonging to the Six Axial Systems in Crystallography. In-8°, Spon. 7f,50.

Rutley (F.). — Rock-Forming Minerals. In-8°. Murby. 9f,40.

Sherborn (C. D.). — A Bibliography of the Foraminifera, recent and fossil, from 1565 to 1888. Londres. In-8°. 7f,50.

4° *Mécanique. — Exploitation des mines.*

Allen (G.). — Force and Energy. A Theory of Dynamics. In-8°, 170 p. Longmans. 9f,40.

Ball (Sir R. S.). — Experimental Mechanics : A Course of Lectures Delivered at the Royal College of Science for Ireland. With Illusts. 2nd ed. In-8°, 359 p. Macmillan. 7f,50.

Basset (A. B.). — Hydrodynamics. With Examples. Vol. 1. In-8°, Bell and Sons. 13f,15.

Blaine (R. G.). — Numerical Examples in Practical Mechanics and Machine Design. With an Introduction by Prof. *J. Perry*. In-12, 130 p. Cassell. 3f,15.

Clarke (G. S.). — The Principles of Graphic Statics. 2nd ed. In-4°, 174 p. Spons. 15f,65.

Cryer (T.) and Jordan (H. G.). — Text-Book of Applied Mechanics, for Use of Students in Science and Technical Schools. In-8°, 256 p. Heywood. 3f,75.

Donaldson (W.). — Transmission of Power by Fluid Pressure, Air and Water. In-8°, 78 p. Spons. 7f,50.

Hasluck (P. N.). — Screw Threads and Methods of Producing Them. 2nd ed. In-64. Lockwood. 1f,25.

Jamieson (A.). — Elementary Manual on Steam and Steam Engine, specially Arranged for the Use of First Year Science and Art, City and Guilds of London Institute, and other Elementary Engineering Students. With numerous Diagrams, Arithmetical Examples and Examination Questions. In-8°, 216 p. Griffin. 4f,40.

Lock (J. B.). — Elementary Statics. In-12, 250 p. Macmillan. 5f,65.

Milford (P.). — Pocket Dictionary of Mining Terms. In-18. E. Wilson. 1f,25.

Mitchell (H.). — Diamonds and Gold of South Africa. Together with the Transvaal Gold Law. In-8°. E. Wilson. 6f,25.

Parliamentary. — Mines and Mineral Statistics for 1887. Map. 5f,65.

—— Mines. Explosion at Morningside Colliery, Lanarkshire. Report and Plan. 0f,75.

—— —— Explosion at St. Helen's Colliery. Report and Plan. 1f,35.

—— —— Reports of Inspectors for 1887. 6f,60.

Pocock (J.). — Model Engine-Making in Theory and Practice. With ower 100 Illusts. In-8°, 180 p. Swan Sonnenschein. 3f,15.

Skinner (W. R.). — The Mining Manual for 1888. Containing Full Particulars of Mining Companies, and of all those Registered from June 1887, togeter with a List of Mining Directors. A separate Section is given of all South African Mining Compagnies. In-8°, 648 p. Office. 9f,40.

Taylor (J. E.). — Theoretical Mechanics. In-8°, 252 p. Longmans. 3f,15.

Thompson (S. P.). — Dynamo-Electro Machinery : A Manual for Students of Electrotechnics. 3rd ed., enlarged and revised. In-8°, 666 p. Spons. 20 fr.

Traill (T. W.). — Boilers : Their Construction and Strength. A Handbook of Rules, Formulæ, Tables, etc., Relative to Material, Scantlings and Pressures, Safety Valves, Springs, Fittings and Mountings, etc., for use of Engineers, Surveyors, Draughtsmen, Boiler Makers and Steam Users. With Illusts. In-8°, 444 p. Griffith and Farran. 11f,25.

Vanderbilt (A. T.). — Gold, not only in Wales, but in Great Britain and Ireland. Facts and Figures. In-8°, 156 p. Swan Sonnenschein. 1f,25.

5° *Constructions. — Chemins de fer.*

Addison (P. L.). — Practical Elements of Construction : A Reference Book for Engineers and Builders. Illust. with Plates and Diagrams. In-8°, 170 p. E. Stock. 7f,50.

DEMPSEY (G. D.) and CLARK (D. K.). — Locomotive Engines. New ed. In-8°, Lockwood and Son. 4f,40.

DYE (F.). — Hot Water Fitting and Stean Cooking Apparatus. A Guide for Builders and others, for the Fitting of Boilers and Pipes for the Circulation of Hot Water for Heating Buildings and for Domestic Purposes; with a Chapter on Boilers and Fittings for Steam Cooking. In-18, 100 p. Spons. 1f,90.

Parliamentary. — Railways. Continuous Brakes. Returns. January-June. 1f,60.

—— —— Maximum Charges. Return. 2f,80.

—— Railway Companies. Charges for Conveyance of Fish. Return. 0f,95.

—— —— Returns. United Kingdom, for 1887. 1f,50.

—— Railway Accidents. Returns to September. 2 fr.

SLAGG (C.). — Water Engineering : A Practical Treatise on the Measurement, Storage, Conveyance and Utilisation of Water for the Supply of Towns, for Mill Power and for other Purposes. In-8°, 320 p. Lockwood. 3f,40.

WALKER (T. A.). — The Severn Tunnel : Its Construction and Difficulties, 1872-1887. In-8°. Bentley. 31f, 25.

6° *Objets divers.*

Electric Lighting : Its Present Position and Future Prospects. With Illusts. by *Hammond and Co.* In-8°, 97 p. Whitehead and Co. 0f,65.

HEDGES (K). — Central Station Electric Lighting. In-8°. Spons. 4f,40.

POLEY (A. P.) and DETHRIDGE (F.). — A Handbook on the Electric Lighting Act, 1882, with Hints to Local Authorities, Explanatory Notes and Amended Rules of the Board of Trade; also, Detailed Information Expressly Prepared for the Use of Metropolitan Vestries and Electric Light Companies. In-8°, 114 p. Simpkin. 2f,50.

PREECE (W. H.) and MAIER (J.). — The Telephone. Illustrated. In-8°, XVI-498 p. Whittaker. 15f,65.

SHAW (J.). — Gas : Practical Hints on Gas Consumption, Showing the Advantages to be Derived from a proper Application and Use of Gas, and how to Obtain the Best Results. In-8°, 59 p. Huddersfield. Broadbent and Co. 0f,25.

OUVRAGES AMÉRICAINS.

ATKINSON (P.). — The Elements of Electric Ligthing, including Electric Generation, Measurement, Storage and Distribution. In-12, 260 p. New York. 9f,40.

BLAIR (A. A.). — The Chemical Analysis of Iron : A Complete Account of All the Best Known Methods for the Analysis of Iron, Steet, Pig-Iron, Iron Ore, Limestone, Slag, Clay, Sand, Coal, Coke and Furnace and Producer Gases. In-8°, 282 p. Philadelphie. 25 fr.

BRANNT (W. T.). — The Metallic Alloys : A Practical Guide for the Manufacture of all Kinds of Alloys. Amalgams, and Solders used by Metal Workers; together with their Chemical and Physical Properties, and their Application in the Arts and Industries with an Appendix on the Colouring of Alloys. Trans. and Edit. chiefly from the German of *A. Krupp* and *A. Wildberger*. With extensive Additions by *W. T. Brannt*. In-12, 428 p. Philadelphie. 15f,65.

JAMES (U. P. and J. F.). — Monograph of the Monticuliporoid Corals of the Cincinnati Group. In-8°, 48 p. Cincinnati. 5 fr.

THURSTON (R. H.). — Steam Boiler Explosions in Theory and in Practice. Illust. In-12. New York. 8f,15.

United States Geological Survey. — Monographs. Vol. 12. Geology and Mining Industry of Leadville, Colorado. With 45 Plates, 6 Figures and a Separate Fol. Atlas of 35 Sheets. By *S. F. Emmons*. In-4°, 770 p. Washington.

ZWICKER (P. H.) — Machinist's and Engineers' Instructor. In-12. Philadelphie. 12f,50.

OUVRAGES ALLEMANDS.

1° *Mathématiques pures.*

BAER (K.). — Parabolische Koordinaten in der Ebene und im Raum. Frankfurt a/Oder. Berlin, Mayer und Müller. In-4°, 40 p. avec 2 pl. 2 fr. (2441)

Beez (R.). — Ueber Euklidische und nicht-Euklidische Geometrie. Plauen, Neupert. In-4°, 32 p. 2f,50. (2444)

Bohnert (F.). — Bestimmung einer speciellen periodischen Minimalfläche auf welcher unendlich viele gerade Linien und unendlich viele ebene geodätische Linien liegen. Göttingen, Vandenhoeck und Ruprecht. In-8°, 13 p. av. 1 pl. 2f,25. (3972)

Dziobek (O.). — Die mathematischen Theorieen der Planeten-Bewegungen. Leipzig, Barth. In-8°, VIII-305 p. 11f,25. (3563)

Encke (J.-F.). — Gesammelte mathematische und astronomische Abhandlungen. I u. II Bd. Methode der kleinsten Quadrate. Fehler-theoretische Untersuchungen. Berlin, Dümmler. In-8°, 18f,75. (3564)

Fuhrmann (A.). — Anwendungen der Infinitesimalrechnung in den Naturwissenschaften, im Hochbau und in der Technik. Lehrbuch und Aufgabensammlung. I. Thl. Naturwissenschaftliche Anwendungen der Differentialrechnung. Berlin, Ernst und Korn. In-8°, XII-148 p. avec 28 fig. 3f,75. (Paraîtra en 6 parties). (4382)

Graefe (F.). — Aufgaben und Lehrsätze aus der analytischen Geometrie des Raumes, insbesondere der Flächen 2. Grades. Leipzig, Teubner. In-8°, XIV-127 p. 3f,75. (3568)

Grossmann (L.). — Die Mathematik im Dienste der Nationalökonomie mit Hinweis auf die Theorie und Lösung der irreductibelen transcendenten Gleichungen, einer neuen wissenschaftlichen Errungenschaft auf dem Gebiete der reinen Mathematik. 2. u. 3. Lfg. Wien, Selbstverlag. In-8°, IV-80 p. Chaque livraison 6f,25. (2460)

Kerz (F.). — Weitere Ausbildung der Laplace'schen Nebularhypothese. Ein Nachtrag. Leipzig, Spamer. In-8°, VIII-127 p. av. 3 pl. 3f,75. L'ouvrage complet avec le supplément 18f,75. (4388)

Kiefer (A.). — Ueber die geraden Kegel und Cylinder, welche durch gegebene Punkte des Raumes gehen, oder gegebene gerade Linien des Raumes berühren. Frauenfeld, Huber. In-4°, 30 p. 2 fr. (2464)

Knoblauch (J.). — Einleitung in die allgemeine Thorie der krummen Flächen. Leipzig, Teubner. In-8°, XIII-267 pages. 10 fr. (3224)

Lie (S.). — Theorie der Transformationsgruppen. I. Abschn. Unter Mitwirkung von *F. Engel* bearbeitet. Leipzig, Teubner. In-8°, X-632 p. 22f,50. (3225)

Mertens (F.). — Ueber die invarianten Gebilde einer ternären cubischen Form. (Extr. des *Sitzungsber. d. k. Akad. der Wissenschaften*. Vienne, Tempsky. In-8°, 82 p. 1f,75. (4393)

Michalitschke (A.). — Die archimedische, die hyperbolische und die logarithmische Spirale. Prague, Haerpfer. In-8°, 79 p. avec pl. 3f,75. (4394)

Neumann (C.). — Ueber die Methode des arithmetischen Mittels. 2. Abhandlung (Extr. des *Abhandl. d. k. sächs. Gesellsch. der Wissenschaften*). Leipzig, Hirzel. In-8°, 164 p. avec 19 figures. 7f,50. (4396)

v. Oppolzer (T.). — Zum Entwurf einer Mondtheorie gehörende Entwicklung der Differentialquotienten. Nach dessen Tode vollendet unter Leitung von *R. Schram.* (Extr. des *Denksch. d. k. Akad. der Wissenschaften*). Vienne, Tempsky. In-4°, 188 p. 12f,50. (3228)

Schroeter (H.). — Die Theorie der ebenen Kurven 3. Ordnung. Leipzig, Teubner. In-8°, VIII-295 p. 10 fr. (3585)

Unger (F.). — Die Methodik der praktischen Arithmetik in historischer Entwickelung vom Ausgange des Mittelalters bis auf die Gegenwart, nach den Original-Quellen bearbeitet. Leipzig, Teubner. In-8°, XII-240 p. 7f,50. (3236)

2° *Physique. — Chimie. — Métallurgie.*

Baurath (H.). — Ueber α-Stilbazol und seine Reduktionsprodukte. Kiel, Lipsius und Tischer. In-8°, 36 p. 1f,25. (2443)

Bohn (C.). — Ueber Linsenzusammenstellungen und ihren Ersatz durch eine Linse von vernachlässigbarer Dicke. Leipzig, Teubner. In-8°, IV-86 p. 2f,50. (3560)

Bolz (C.-H.) — Die Pyrometer. Eine Kritik der bisher construirten höheren Temperaturmesser in wissenschaftlich-technischer Hinsieht. Berlin, Springer. In-8°, VII-70 p. 3f,75. (3561)

Breithaupt (C.). — Ueber einige Derivate von Tetramethyldiamidobenzophenon. Göttingen, Vandenhoeck und Ruprecht. In-8°, 47 p. 1f,65. (3974)

Dubois. — Untersuchungen über die physiologische Wirkung der Condensatorenentladungen. (Extr. des *Mittheil. d. naturforsch. Gesellsch. in Bern.*) Berne, Wyss. In-8°, 65 p. 1f,90. (3978)

Dürre (E.-F.). — Die Anlage und der Betrieb der Eisenhütten. Ausführliche Zusammenstellung neuerer und bewährter Constructionen aus dem Bereiche der gesammten Eisen-und Stahl-Fabrikation. Unter Berücksichtigung aller Betriebs- Verhältnisse bearbeitet. 30 Lfg. Leipzig, Baumgärtner. In-4°. III. Bd.

p. 425—488, avec environ 120 pl. et nombreuses figures 7f,50. (2683)

Frankel (G.). — Die Wirkung der Cylinderlinsen, veranschaulicht durch stereoskopische Darstellung des Strahlengangs. 8 stereoskopische Ansichten, gezeichnet und erläutert von *G. F.* Wiesbaden, Bergmann. In-8°, 9 p. (Texte allemand et français). 1f,25. (4381)

Fröhlich (J.). — Allgemeine Theorie des Electrodynamometers. Vom Verfasser besorgte deutsche Ausgabe. Budapest. Berlin, Friedländer und Sohn. In-4°, xviii-168 p. avec 3 planches. 12f,50. (2807)

Gaertner (N.). — Ueber Weissblech-Fabrikation. Berlin, Simion. In-4°, iv-95 p. av. 6 pl. 10 fr. (4227)

Grünewald (W.). — Untersuchungen über die Dampfdichte des Eisenchlorids bei werschiedenen Temperaturen. Göttingen, Vandenhoeck und Ruprecht. In-8°, 40 p. av. 2 pl. 2 fr. (4384)

Handbuch der chemischen Technologie. In Verbindung mit mehreren Gelehrten und Technikern bearbeitet und herausgegeben von *A. Bolley* und *K. Birnbaum*. Nach dem Tode der Herausgeber fortgesetzt von *C. Engler*. I. Bd. 2. Gruppe. 2 Abth. Die Industrie der Mineralöle. I. Thl. I. Lfg. Brunswick, Vieweg und Sohn. xii-179 p. av. fig. 7f,50. (3044)

Handwörterbuch der Chemie, herausgegeben von *Ladenburg*. Unter Mitwirkung von *Ahrens*, *Berend*, *Biedermann*, etc. VI Bd. Breslau, Trewendt. In-8°, 625 p. av. fig. 20 fr. (3983)

Handwörterbuch (neues) der Chemie. Auf Grundlage des von Liebig, Poggendorff und Wöhler, Kolbe und Fehling herausgegebenen Handwörterbuchs der reinen und angewandten Chemie und unter Mitwirkung von Baumann, Bunsen, Fittig, etc., bearbeitet u. redigirt von *Hm. v. Fehling*, fortgesetzt von *C. Hell*. 58-60 Lfg. Brunswick, Vieweg und Sohn. In-8°. V. Bd. p. 417-704, av. fig. dans le texte. Chaque livraison 3 fr. (2461)

Heumann (K.). — Die Anilinfarben und ihre Fabrication. I. Thl. Triphenylmethan-Farbstoffe, Brunswick, Vieweg und Sohn. In-8°, xi-599 p. av. 42 fig. dans le texte. 25 fr. (3849)

Hoppe (E.). — Die Accumulatoren für Elektricität. Berlin. In-8°, ix-234 p. avec fig. 7f,50. (4632)

Jacob (C.). — Die Welt oder Darstellung sämmtlicher Naturwissenschaften mit den sich ergebenden allgemeinen Schlussfolgerungen zum Verständnisse für Gebildete jedes Berufes. II. Bd. Et sous le titre : Physik, dargestellt für Gebildete jedes Berufes. Würzburg, Stahel. In-8°, xix-822 p. 13f,50. (3985)

Jurisch (K.-W.). — Die Fabrikation von chlorsauren Kali und anderen Chloraten. Berlin. Gaertner. In-8°, viii-229 p. avec 65 fig. dans le texte et 6 pl. 10 fr. (2817)

Lehmann (O.). — Molekularphysik mit besonderer Berücksichtigung mikroskopischer Untersuchungen und Anleitung zu solchen, sowie ein Anhang über mikroskopische Analyse. I. Bd. Leipzig, Engelmann. In-8°, x-852 p. av. 375 fig. dans le texte et 5 pl. chromolith. 27f,50. (4389)

Lie (S.). — Zur Theorie der Berührungstransformationen. (Extr. des *Abhandl. d. k. sächs. Gesellsch. der Wissenschaften.*) Leipzig, Hirzel. In-8°, 28 p. 1f,25. (4390)

Kaiser (H.). — Beiträge zur Kenntniss des Acetessigesters. Anhang: Ueber die Einwirkung von Natriumaethylat auf Benzaldehyd. Göttingen, Vandenhoeck und Ruprecht. In-8°, 48 p. 1f,50. (4387)

Kelbe (W.). — Grundzüge der Maasanalyse. Karlsruhe, Braun. In-8°, viii-136 p. av. 20 fig. dans le texte. 5f,65. (2463)

Kohlrausch (F.).— Ueber den absoluten elektrischen Leitungswiderstand des Quecksilbers. (Extr. des *Abhandl. d. k. bayr. Akad. d. Wissenschaften.*) In-4°, 111 p. av. 3 pl. 4f,40. (3987)

v. Meyer (E.). — Geschichte der Chemie von den ältesten Zeiten bis zur Gegenwart. Leipzig, Veit und Co. In-8°, xi-466 p. 11f,25. (3991)

Nietzki (R.). — Chemie der organischen Farbstoffe. Berlin, Springer. In-8°, xi-256 p. 8f,75. (4397)

Rammelsberg (C.-F.). — Chemische Abhandlungen 1838—1888. Berlin, Habel. In-8°, viii-463 p. 12f,50. (4399)

Snape (H.-L.) — Ein Beitrag zur Kenntniss der Cyanate und Carbamate. Göttingen, Vandenhoeck und Ruprecht. In-8°, 37 pages. 1f,25. (4405)

Wedding (H.). — Aufgaben der Gegenwart im Gebiete der Eisenhüttenkunde. Brunswick, Vieweg und Sohn. In-8°, xii-72 pages av. fig. 3f,50. (3458)

Weinstein (B.). — Handbuch der physikalischen Maassbestimmungen. II. Bd. Einheiten und Dimensionen, Messungen für Längen, Massen, Volumina und Dichtigkeiten. Berlin, Springer. In-8°, xxii-552 p. 17f,50. (3240)

Winkler (C.). — Praktische Uebungen in der Maassanalyse. Anleitung zur Erlernung der Titrirmethode. Freiberg, Engelhardt. In-8°, xi-159 p. av. fig. 7f,50. (2831)

Zenker (W.). — Die Vertheilung der Wärme auf der Erdoberfläche. Berlin, Springer. In-8°, v-98 p. av. 1 pl. 3f,75. (2833)

3° *Minéralogie. — Géologie. — Paléontologie.*

v. Baer (K. E.). — Ueber Entwickelungsgeschichte der Thiere. Beobachtung und Reflexion. 2 Thle. Herausgegeben von *L. Stieda*. Königsberg, Koch. In-4°, 400 p. 35 fr. (2442)

Dubbers (H.). — Der obere Jura auf dem Nordostflügel der Hilsmulde. Göttingen, Vandenhoeck und Ruprecht. In-4°, 43 p. 2f,50. (3977)

v. Ettingshausen (C.). — Die fossile Flora von Leoben in Steiermark. I. Thl. (Enthaltend die Cryptogamen, Gymnospermen, Monocotyledonen und Apetalen.) II. Thl. (Enthält die Gamopetalen und Dialypetalen.) (Extr. des *Denksch. d. k. Akad. der Wissenschaften.*) Vienne, Tempsky. In-4°, 58 et 68 p. av. 4 et 5 pl. 12f,50. (3215)

Fritsch (A.). — Fauna der Gaskohle und der Kalksteine der Permformation Böhmens. II. Bd. 3. Heft. Prague, Rivnác. In-fol., p. 65-92, av. 10 pl. 40 fr. (3216)

Fugger (E.). — Beobachtungen in den Eishöhlen des Untersberges bei Salzburg. (Extr. des *Mittheil. d. Gesellsch. für Salzburger Landeskunde.*) Salzburg, Dieter. In-8°, 100 p. av. 5 pl. 4 fr. (2808)

Göppert (H. R.). — Nachträge zur Kenntniss der Coniferenhölzer der palaeozoischen Formationen. Aus dem Nachlass von *H. R. G.*, bearbeitet von *G. Stenzel*. (Extr. des *Abhandl. d. k. Akad. der Wissenschaften.*) Berlin, G. Reimer. In-4°, 68 p. av. 12 pl. 11f,25. (2459)

Katzer (F.). — Das ältere Palaeozoicum in Mittelböhmen. Prague, Calve. In-8°, 42 p. av. 1 carte et 1 pl. de profils. 2f,50. (3574)

Kobelt (W.). — Iconographie der schalentragenden europäischen Meeresconchylien. 8. Heft. Cassel, Fischer. In-4°, II. Bd. p. 1-16. av. 4 pl. 5 fr. Édition coloriée 7f,50. (2467)

Makowsky (A.). — Der Löss von Brünn und seine Einschlüsse an diluvialen Thieren und Menschen. (Extr. des *Verhandl. d. naturforsch. Vereines in Brünn.*) Brünn, Winiker. In-8°, 40 p. av. 7 pl. 3f,25. (2820)

Martini u. Chemnitz. — Systematisches Conchylien-Cabinet. In Verbindung mit Philippi, L. Pfeiffer, Dunker, etc., neu herausgegeben und vervollständigt von *H. C. Küster*, nach dessen Tode fortgesetzt von *W. Kobelt*. Livraisons 353-359. Nüremberg, Bauer und Raspe. In-4°, 230 p. av. 42 pl. color. Chaque livraison 11f,25. (2822)

Martini u. Chemnitz. — Systematisches Conchylien-Cabinet. In Verbindung mit Philippi, L. Pfeiffer, Dunker, etc., neu herausgegeben und vervollständigt von *H. C. Küster*, nach dessen Tode fortgesetzt von *W. Kobelt*. Sect. 115-116, Nüremberg, Bauer und Raspe. In-4°, 198 p. av. 34 pl. color. Chaque section 33f,75. (2823)

Meyer (M. W.). — Die Entstehung der Erde und des Irdischen. Berlin, Allgemeiner Verein für Deutsche Literatur. In-8°, x-400 p, av. 26 fig. 6f,25. (3581)

van Nievelt (C.). — Bergstudien. Een omgang in het land der Dolomieten. Leyde. In-8°, 195 p. 6f,90. (2472)

Pyliaeff (M. I.). — Les pierres précieuses, leurs propriétés, leurs gisements et leur emploi (En russe). Saint-Pétersbourg. In-8°, 390 p. 12f,50. (2473)

Quenstedt (F. A.). — Die Ammoniten des schwäbischen Jura. 17. Heft. Stuttgart, Schweizerbart. In-8°, p. 881-944 av. 6 pl. 12f,50. (2825)

Reyer (E.). — Theoretische Geologie. Stuttgart, Schweizerbart. In-8°, xiii-867 p. av. 760 fig. et 3 cartes. 25 fr. (2826)

Rüst. — Beiträge zur Kenntniss der fossilen Radiolarien aus Gesteinen der Kreide. (Extr. des *Palæontographica.*) Stuttgart, Schweizerbart. In-4°, 33 p. av. 8 pl. 25 fr. (3231)

Rzehak (A.). — Die Foraminiferen des kieseligen Kalkes von Nieder-Hollabrunn und des Melettamergels der Umgebung von Bruderndorf in Niederösterreich. (Extr. des *Annalen d. k. k. naturhist. Hofmuseums.*) Vienne, Hölder. In-8°, 14 p. av. 1 pl. 2f,50. (3583)

Schenk (A.). — Die fossilen Pflanzenreste. (Extr. du *Handbuch der Botanik.*) Breslau, Trewendt. In-8°, vi-284 p. av. 90 fig. et 1 pl. 13f,50. (4000)

Schröter (C.). — Oswald Heer. Lebensbild eines schweizer Naturforschers. O. Heers Forscherarbeit und dessen Persönlichkeit. Unter gefälliger Mitwirkung von *G. Stierlin*. Zürich, Schulthess. In-8°, iv-116 p. 6f,25. (4002)

Steinmann (G.). — Elemente der Paläontologie, bearbeitet unter Mitwirkung von *L. Döderlein*. 1 Hälfte : Evertebrata (Protozoa-Gastropoda). Leipzig, Engelmann. In-8°, xi-336 p. av. 386 fig. 12f,50. (4408)

Szajnocha (L.). — Ueber fossile Pflanzenreste aus Cacheuta in der Argentinischen Republik. (Extr. des *Sitzungsber. d. k. Akad. der Wissenschaften.*) Vienne, Tempsky. In-8°, 26 p. av. 2 pl. et 1 tabl. 1f,25. (4409)

TIETZE (E.). — Die geognostischen Verhältnisse der Gegend von Krakau. Hierzu Atlas, enthaltend eine geologische Karte in-4 Blättern. Vienne, Hölder. In-8°, 416 p. 18f,75. (4410)

WOLF (G.). — Das Erdbeben an der Riviera am 23 Februar 1887 beschrieben nach seinem Verlauf, seinen Folgen, und beleuchtet nach seinen Ursachen. Siegen. (Bonn, Cohen und Sohn.) In-8°, 37 p. av. 3 pl. 2f,50. (2832)

WALTHER (J.). — Die Korallenriffe der Sinaihalbinsel. Geologische und biologische Beobachtungen. (Extr. des *Abhandl. d. k. Sächs. Gesellsch. der Wissenschaften.*) Leipzig, Hirzel. In-8°, 70 p. av. 1 carte géol., 4 pl. et 34 fig. 7f,50. (4411)

ZITTEL (K. A.). — Handbuch der Palæontologie. Unter Mitwirkung von *A. Schenk* herausgegeben. I. Abth. : Palæozoologie, 11 Lief. II. Abth : Palæophytologie, 6 Lief. Münich, Oldenbourg. In-8°. Bd. III, p. 257-436 av. 154 fig.; p. 493-572 av. 36 fig. 12f,50. (3242)

4° *Mécanique. — Exploitation des mines. — Droit des mines.*

BRASSERT (H.). — Allgemeines Berggesetz für die Preussischen Staaten vom 24 Juni 1865. Mit Einführungesgesetzen und Kommentar. Bonn, Marcus. In-8°, XII-672 p. 15 fr. (4321)

POHLHAUSEN (A.). — Constructionen aus dem Dampfkesselbau. Mittweida, Polytechn. Buchhandlg. In-fol., 28 pl. 8f,75. (3058)

SCHLESINGER (J.). — Die geistige Mechanik der Natur. Leipzig, Mutze. In-8°, VIII-226 p. av. 1 pl. 6f,25. (3234)

THIELMANN (L. H.). — Handbuch über stationäre Dampfkessel der Gross-und Klein-Industrie und deren Feuerungen. Berlin, Muckenberger. In-8°, 156 p. av. 104 fig., 1 pl. 10 fr. (4639)

TOULA (F.). — Die Steinkohlen, ihre Eigenschaften, Vorkommen, Entstehung und nationalökonomische Bedeutung. Vienne, Hölzel. In-8°, 208 p. av. 20 profils et cartes géol. dans le texte, 1 tableau et 6 pl. 6f,25. (2830)

5° *Constructions. — Chemins de fer.*

BLUHM (J. G.). — Fünfzig Jahre Eisenbahn in Preussen. Eine statistische Darstellung der Entwickelung des Bahnnetzes und des Verkehrs. Berlin, Moeser. In-8°, VII-67 p. av. 4 tableaux. 2f,50. (3523)

EGER (G.). — Eisenbahnrechtliche Entscheidungen deutscher und österreichischer Gerichte. Zusammengestellt, [bearbeitet

und herausgegeben. VI. Bd. 1. Heft. Berlin, C. Heymann. In-8°, 128 p. 12f,50. (2405)

ENGEL (E.). — Eisenbahnreform. Iéna, Costenoble. In-8°, V-219 p. 5 fr. (2407)

GOTTGETREU (R.). — Lehrbuch der Hochbau-Konstruktionen. IV. Thl. Der innere Ausbau. Berlin, Ernst und Korn. In-8°, XVIII-292 p. av. 1 atlas de 25 pl. in-fol. et 607 fig. dans le texte. 40 fr. (2686)

Handbuch der Ingenieurwissenschaften in 4 Bdn. IV Bd. Die Baumaschinen. Unter Mitwirkung von *L. Franzius* herausgegeben von *F. Lincke*. III. Abtlg. 4. Lfg. Leipzig, Engelmann. In-8°, VI-99 p. av. 37 fig. et 2 pl. 4f,50. (2687)

HÄSELER (E.). — Der Brückenbau. Ein Handbuch zum Gebrauche beim Entwerfen von Brücken in Eisen, Holz und Stein, sowie beim Unterrichte an technischen Hochschulen. I. Thl. Die eisernen Brücken. 1. Lfg. Brunswick, Vieweg und Sohn. In-4°, 129 p. av. nombreuses fig. et pl. 18f,75. (Paraîtra en 3 parties.) (3045)

HILSE (K.). — Die Haftpflicht der Eisenbahnen und sonstigen Fuhrbetriebe. Berlin, C. Heymann. In-8°, VII-215 p. 5 fr. (3532)

KUPKA (P. F.). — Die Eisenbahnen Oesterreich-Ungarns. 1822-1867. Leipzig, Duncker und Humblot. In-8°, X-386 p. 10f,75. (4232)

v. LINDHEIM (W.). — Strassenbahnen in Belgien, Deutschland, Grossbritannien und Irland, Frankreich, Italien, Œsterreich-Ungarn, den Niederlanden, Niederländisch-Indien, der Schweiz und den verschiedenen Staaten von Amerika. Vienne, Gerold's Sohn. In-fol., IV-132 p. 10 fr. (3541)

5° *Objets divers.*

BOCK (J.). — Die Unfall- und Kranken-Versicherung der Betriebs- und Werkstätten-Arbeiter bei der Staats-Eisenbahn-Verwaltung. Königsberg. (Leipzig, Larsen). In-12, IV-179 p. 1f,25. (2398)

GRAF (J. H.). — Geschichte der Mathematik und der Naturwissenschaften in bernischen Landen vom Wiederaufblühen der Wissenschaften bis in die neuere Zeit. I. Heft : Das XVI. Jahrhundert. Berne, Wyss. In-8°, VII-82 p. 1f,25. (3982)

JUST. — Die Unfallversicherungen der in land- und forstwirthschaftlichen Betrieben beschäftigten Personen nach dem Reichsgesetz vom 5. Mai 1886 und den zu demselben ergangenen

Ausführungsbestimmungen der Bundesstaaten. Berlin, Siemenroth und Worms. In-8°, XVI-397 p. 8f,75. (3533)

KLEYER (A.). — Encyklopädie der gesammten mathematischen, techischen und exacten Natur-Wissenschaften. Besondere Ausgabe von Kleyer's vollständig gelöster Aufgabensammlung. 5-33. Lfg. Stuttgart, Maier. In-8°. Chaque livraison (4 feuilles, av. fig.) 1f,25. (2465)

OUVRAGES ITALIENS.

1° *Mathématiques pures.*

BOCCARDO (E. C.). — Trattato elementare completo di geometria pratica. Disp. 20. Parte II (Topografia). Turin, Unione tipografico-editrice. In-4°, p. 1-32 av. 4 pl. 1f,60. (6823)

—— Disp. 21. Parte II (Topografia). Turin, Unione tipografico-editrice. In-4°, p. 33-56 av. 4 pl. 1f,60. (10780)

CHICCA (DEL). — Brevi cenni sulla decomposizione delle funzioni algebriche razionali fratte. Foligno, tip. P. Sgariglia. In-8°, 20 p. (10783)

DANIELE (G.). — Appunti esplicativi sui due metodi dell' addizione. Campobasso, tip. G. e N. Colitti. In-8°, 15 p. (7339)

EREDE (G.). — Manuale di geometria pratica. Seconda edizione riveduta. Milan, U. Hoepli. In-16, x-183 p. av. fig. (8809)

FIBBI (C.). — Sulle superficie che contengono un sistema di geodetiche a torsione costante : tesi per l'esame di abilitazione all' insegnamento, presentata alla r. scuola normale superiore di Pisa. Pise, tip. T. Nistri e C. In-8°, 88 p. av. planche. (Extr. des *Annali d. r. scuola norm. super. di Pisa.*) (8811)

FORTI (A.). — Intorno ad una nota del sig. Giuseppe Bertrand alla *Mécanique analytique* del Lagrange e ad alcuni passi della *Géométrie de position* del Carnot : brano di lettera a d. B. Boncompagni. Seconda edizione con aggiunte. Pise, tip. F. Mariotti. In-8°, 13 p. av. planche. (8812)

FRASCHIGNI (E.). — La geometria immaginaria : studio. Bologne, N. Zanichelli. In-16, 23 p. av. fig. (7844)

GATTONI (V.). — Sulla determinazione di un punto rispetto ad altri noti di posizione. Caserta, tip. S. Marino. In-8°, 28 p. av. planche. 2 fr. (6322)

JADANZA (N.). — Sul calcolo degli azimut mediante le coordinate rettilinee. Turin, E. Loescher. In-8°, 20 p. (Extr. des *Atti d. r. accad. d. scienze di Torino.*) (5882)

—— Sullo spostamento della lente anallattica e sulla verticalità della stadia. Turin, E. Loescher. In-8°, 11 p. (Extr. du même recueil.) (6326)

MARANGONI (G. B.). — Preliminari di una teoria sulle cubiche gobbe. Padoue, tip. del Seminario. In-8°, 23 p. (8393)

MIGLIAVACCA (C.). — Memoria sul planimetro polare. Pavie, tip. fr. Fusi. In-8°, 36 p. (6383)

PADOVA (E.). — Sull' uso delle coordinate curvilinee in alcuni problemi della teoria matematica della elasticità. Padoue, tip. del Seminario. In-4°, 30 p. (6832)

PANIZZA (F.). — Nota su alcune somme di potenze e di prodotti. Gênes, tip. Ciminago. In-8°, 10 p. (Extr. du *Giornale della Soc. di letture e conversazioni scientifiche.*) (6833)

PEPIN (T.). — Étude bibliographique sur une formule d'Euler. Rome, imp. des Sciences mathématiques et physiques. In-4°, 12 p. (Extr. des *Atti dell' accad. pontif. de' nuovi Lincei.*) (7347)

PINCHERLE (S.). — Sulla risoluzione dell' equazione funzionale $\Sigma h_\nu \varphi(x+a) = f(x)$ a coefficienti razionali : memoria. Bologne, tip. Gamberini e Parmeggiani. In-4°, 26 p. (Extr. des *Memorie d. r. accad. d. scienze dell' istit. di Bologna.*) (7851)

PIZZETTI (P.). — Gli azimut reciproci di un arco di geodetica : nota. Turin, E. Loescher. In-8°, 18 p. (Extr. des *Atti d. r. accad. d. scienze di Torino.*) (7348)

RETALI (V.). — Ricerche sopra l' immaginario in geometria. Bologne, tip. Gamberini e Parmeggiani. In-4°, 21 p. (Extr. des *Memorie d. r. accad. d. scienze dell' istit. di Bologna.* (8814)

RICCARDI (P.). — Ancora del trattato *De quadratura Circuli* di Giovani Battista Della Porta. Rome, tip. delle Scienze matematiche e fisiche. In-4°, 2 p. (Extr. du *Bullettino di bibliografia e di storia delle scienze matematiche e fisiche.*) (7350)

RICCI (G.). — Delle derivazioni covarianti e controvarianti e del loro uso nella analisi applicata : memoria. Padoue, tip. del Seminario. In-4°, 23 p. (6835)

RIVELLI (A.). — I giuochi matematici. Disp. 4-5 (ultima). Naples, E. Detken. In-8°, p. 241-390 avec fig. (6331)

RUSSO (G.). — Sulla determinazione delle curve di second' ordine. Catanzaro, tip. C. Maccarone. In-8°, 27 p. (10285)

SALMOIRAGHI (A.). — Istrumenti e metodi moderni di geometria applicata. Parte I (Teoria degli istrumenti misuratori, descri-

zione e norme pratiche pel loro uso). Vol. I, fasc. 14 (Appendice). Milan, tip. degli Ingegneri. In-4°, p. 1-64 avec fig. et 1 planche. (11234)

Sasso (M.). Sui baricentri di alcune linee e superficie. Avellino, tip. E. Pergola. In-8°, 30 p. (6839)

Segre Corrado. — Sulle varietà cubiche dello spazio a quattro dimensioni e su certi sistemi di rette e certe superficie dello spazio ordinario: memorie. Turin, E. Loescher. In-4°, 48 p. (6840)

Storchi (G. V.). — Sulle variazioni simili in una rotazione di un sistema di punti, di rette e di piani. Camerino, tip. Savini. In-8°, 9 p. (7355)

Zanotti Bianco (O.). — Alcuni teoremi sui coefficienti di Legendre : nota seconda. Turin, E. Loescher. In-8°, 23 p. (Extr. des *Atti della r. accad. d. scienze di Torino.*) (5894)

Zucca (O.). — Applicazione del metodo delle coordinate curvilinee allo studio dell' iperboloide ad una falda. Gênes, tip. fr. Pagano. In-4° (autogr.), 26 p. (6844)

—— Cenni storici sulle origini del calcolo delle differenze finite. Gênes, tip. fr. Pagano. In-8°, 15 p. (7358)

2° *Physique. — Chimie. — Métallurgie.*

Albertoni (P.). — Galvani e le sue opere : discorso in occasione del 1° centenario della scoperta dell' elettricità animale. Bologne, N. Zanichelli. In-8°, 22 p. avec fig. 1 fr. (7331)

Battelli (A.). — Sulle variazioni della resistenza elettrica e del potere termoelettrico del nichel al variare della temperatura : ricerche sperimentali. Turin, E. Loescher. In-8°, 17 p. avec planche. (Extr. des *Atti della r. accad. d. scienze di Torino.*) (5874)

Bertacchi (C.). — La fisica dei deserti e segnatamente del deserto dell' Asia, con brevi riflessioni sulla climatologia europea : conferenza fatta alla società filotecnica di Torino la sera del 29 maggio 1888. Turino, Fornaris-Marocco. In-8°, 30 p. avec fig. 16 fr. (7838)

Bertoni (G.) e L. Fritsch. — Sulla tecnica della preparazione dell' idrossilamina dal fulminato di mercurio : nota. Florence, tip. dell' Arte della Stampa. In-8°, 8 p. (Extr. de la *Rivista scientifico-industriale.*) (8802)

Bertoni (G.). — A proposito di tre nuovi eteri nitrosi. Rome, tip. Prasca alle Terme Dioclesiane. In-8°, 11 p. (Extr. du *Bollettino farmaceutico.*) (10779)

Bombicci (L.) — Sulla formazione della grandine e sui fenomeni ad essa concomittanti : memoria. Bologne, tip. Gamberini e Parmeggiani. In-4°, 42 p. avec 2 pl. (Extr. des *Memorie d. r. accad. d. scienze dell' istit. di Bologna.*) (9840)

Campari (G.). — Sopra due nuovi composti a due nuclei benzinici, riuniti per mezzo del carbonio. Parme, L. Battei. In-4°, 9 p. (8804)

—— Azione della bromocanfora sull' anilina. Parme, L. Battei. In-4°, 6 p. (8389)

—— Intorno a due nuovi derivati della piridina. Parme, L. Battei. In-4°, 5 p. (8390)

—— Nuovo metodo per preparare il protossido d' azoto. Parme, L. Batti. In-4°, 2 p. (8391)

—— Sopra un composto del cloralio coll' uretano. Parme, L. Battei. In-4°, 3 p. (8392)

Canestrini (E.). — Fulmini e parafulmini. Milan, U. Hoepli. In-16°, viij-166 p. (6825)

Cavazzi (A.) e Ad. Ferratini. — Dei fluosiliciuri di morfina, di codeina e di cocaina : nota. Bologne, tip. Gamberini e Parmeggiani. In-4°, 5 p. (Extr. des *Memorie d. r. accad. d. scienze dell' istit. di Bologna.*) (8807)

Ciamician (G.). — Sui caratteri chimici del nucleo tetrolico nel pirrolo et nell' indolo : nota. Padoue, tip. del Seminario. In-4°, 7 p. (6827)

Errera (G.). — Derivati degli alcoli parabromo e paracloro-benzilico : nota. Turin, E. Loescher. In-8°, 10 p. Extr. des *Atti della r. accad. d. scienze di Torino.*) (7340)

—— Sugli eteri nitrobenziletilici. Turin, E. Loescher. In-8°, 7 p. (Extr. du même recueil.) (7341)

Ferraris (G.). — Rotazioni elettrodinamiche prodotte per mezzo di correnti alternate : nota. Turin, E. Loescher. In-8°, 18 p. (Extr. du même recueil.) (5880)

Franzeri (V.). — Breve cenno sui glucosidi : tema presentato e sostenuto per conseguire il diploma della licenza in chimica e scienze naturali nella r. università di Genova il 5 novembre 1887. Asti, tip. Michellerio. In-8°, 14 p. (7843)

—— Sull' acenaftene : tesi di laurea presentata e sostenuta per conseguire la laurea di dottore in chimica nella r. università di Bologna. Asti, tip. Brignolo. In-8°, 23 p. (8813)

Govi (G.). — Dei colori invisibili o latenti dei corpi : nota. Rome, tip. della r. accad. dei Lincei. In-4°, 6 p. (Extr. des *Rendiconti della r. accad. dei Lincei.*) (6323)

Govi (G.). — Nuovo metodo per costruire e calcolare il luogo, la situazione e la grandezza delle imagini date dalle lenti o dai sistemi ottici complessi : nota. Rome, tip. della r. accad. dei Lincei. In-4°, 6 p. avec fig. (Extr. du même recueil.) (6325)

—— Il microscopio composto inventato da Galileo : memoria. Naples, tip. d. r. accad. d. scienze fisiche e matematiche. In-4°, 33 p. (Extr. des *Atti d. r. accad. d. scienze fisiche e matematiche in Napoli.*) (6324)

Maissen (P.) e E. Rossi. — Analisi chimiche eseguite per conte dei privati nell' anno 1887. Modène, tip. Vincenzi. In-8°, 52 p. (Extr. du *Bolletino d. stazione agraria di Modena.*) (6945

Manca-Bogliolo (F.). — I progressi dell' elettricità : nota scientifica. Cagliari, tip. dell' Avvenire di Sardegna. In-8°, 12 p. (11206)

Morera (G.). — Sul problema della corda vibrante : memoria. Turin, E. Loescher. In-8°, 18 p. (Extr. des *Atti della r. accad. d. scienze di Torino.*) (7345)

Moretti (L.). — Relazione d' un' analisi chimica sopra campioni di stagno. Padoue, L. Crescini e C. In-8°, 8 p. (10786)

Naccari (A.). — Sui calori specifici di alcuni metalli della temperatura ordinaria fino a 320° : nota. Turin, E. Loescher. In-8°, 22 p. (Extr. des *Atti della r. accad. d. scienze di Torino.*) (5883)

Pierandrei (E.). — Nuova analisi chimica qualitativa, quantitativa e microscopica dell' acqua di Corneto. Rome, tip. del Genio civile. In-16°, 26 p. (10787)

Pozzetto (A.). — Contributo alla ricerca nei vini delle materie coloranti, derivate dal catrame di carbon fossile : nota. Padoue, tip. Prosperini. In-8°, 7 p. (Extr. du *Bolletino della soc. veneto-trentina di scienze naturali.*) (7349)

Provenzali (F. S.). — Sul rapporto fra le variazoni del barometro ed i cambiamenti di transparenza dell' atmosfera : nota. Rome, tip. delle Scienze matematiche e fisiche. In-4°, 7 p. (Extr. des *Atti dell' accad. pontif. de' Nuovi Lincei.*) (9843)

Righi (A.). — Sulla forza elettromotrice del selenio : memoria. Padoue, tip. del Seminario. In-4°, 29 p. (6836)

—— Sui fenomeni elettrici provocati dalle radiazioni : memoria. Bologne, tip. Gamberini e Parmeggiani. In-4°, 43 p. avec planche. (Extr. des *Memorie d. r. accad. d. scienze dell' istit. di Bologna.*) (10788)

Roster (G.). — L' aria atmosferica studiata dal lato fisico, chimico e biologico. Milan, fr. Dumolard. In-16°, xij-538 p. avec 6 pl. 5 fr. (11209)

Savorgnan D' Osoppo (M. A.). — L' acido fosforico e le sue fonti

e speciamente dell' origine, preparazione ed impiego dei fosfati marziali (scorie di defosforazione). Milan, *l'Italia agricola.* In-16°, 30 p. (8921)

Sostegni (L.). — Sulla composizione chimica delle soluzioni acquose che per capillarità salgono alla superficie dei terreni agrarî. Florence, tip. M. Ricci. In-8°, 20 p. (Extr. du journal *l'Agricoltura italiana.*) (6335)

Stefanini (A.). — Dell' energia minima che è necessaria a produrre la sensazione del suono. Lucca, tip. Giusti. In-8°, p. 239-262. (Extr. des *Atti d. r. accad. lucchese di scienze, lettere ed arti.*) (8041)

Stroppa (C.). — Analisi chimica dell' acqua solfurea di Riolo detta della Breta : relazione. Bologne, soc. tip. già Compositori. In-8°, 20 p. (9853)

Vincentini (G.) e D. Omodei. — Sulla densità di alcuni metalli allo stato liquido e sulla loro dilatazione termica : nota. Turin, E. Loescher. In-8°, 8 p. (Extr. des *Atti della r. accad. d. scienze di Torino.*) (5893)

Vitali (D.). — Della ricerca chimico-tossicologica dell' ammoniaca : nota. Bologne, tip. Gamberini e Parmeggiani. In-4°, 7 p. (Extr. des *Memorie d. r. accad. d. scienze dell istit. di Bologna.*) (9855)

Zanon (G.). — La teorica dei liquidi del sig. P. De Heen, adattati ai principî dell' ileformismo. Bologne, tip. Arcivescovile. In-8°, 30 p. (Extr. de *la Scienza italiana.*) (7357)

3° *Minéralogie. — Géologie. — Paléontologie.*

Achiardi (A. d'). — Guida al corso di litologia. Parte II (ultima). Pise, E. Spoerri. In-8°, p. 185-434. 4 fr. (7330)

Bellardi (L.). — I molluschi dei terreni terziarî del Piemonte e della Liguria. Parte V (Mitridae : fine). Turin, E. Loescher. In-4°, 52 p. av. 2 pl. (Extr. des *Memorie della r. accad. d. scienze di Torino.*) (9838)

Bertelli (T.). — Di alcune teorie e ricerche elettro-sismiche antiche e moderne : memoria. Rome, tip. delle Scienze matematiche e fisiche. In-4°, 62 p. (Extr. du *Bulletino di bibliografia e di storia delle scienze matematiche e fisiche.*) (7333)

—— Delle variazioni dei valori d' intensitá relativa nelle medie tromometriche mensili ed annuali, osservate nel collegio alla Querce di Firenze dall' anno meteorico 1872-73 a tutto il novembre 1887 : nota. Rome, tip. delle Scienze matematiche e

fisiche. In-4°, 6 p. av. 2 pl. (Extr. des *Atti dell' accad. pontif. de' nuovi Lincei.*) (8388)

Bertelli (T.). — Osservazioni fatte in occasione di una escursione sulla riviera ligure di ponente dopo i terremoti ivi seguiti nell' anno 1887 : memoria. Turin, tip. s. Giuseppe. In-4°, 14 p. (Extr. du *Bolletino mensuale dell' osservatorio di Moncalieri.*) (9295)

Bombicci (L.). — Le collezioni di mineralogia nella r. università di Bologna, anno 1888 : relazione terza a S. E. il Ministro dell' istruzione publica del regno. Bologne, tip. Gamberini e Parmeggiani. In-4°, 78 p. av. planche. (5875)

Brasa (G.). — Monte S. Giovanni e le sue septarie geodiche : note illustrative. (Esposizione emiliana del 1888 in Bologna.) Bologne, N. Zanichelli. In-8°, 17 p. (5876)

Bruno (C.). — La caverne ossifère de Bossea, près de Frabosa (Mondovi) : lettre a M^r. R. H. Budden. Mondovi, imp. E. Ghiotti. In-16, 28 p. (Extr. du journal *Le Touriste.*) (11202)

Capellini (G.). — Guida del r. istituto geologico di Bologna. Bologne, tip. Fava e Garagnani. In-16, 71 p. av. planche. (5878)

—— Sui resti di *Mastodon arvernensis*, recentemente scoperti a Spoleto, Pontremoli e Castrocaro : memoria. Bologne, tip. Gamberini e Parmeggiani. In-4°, 10 p. av. 2 pl. (Extr. des *Memorie d. r. accad. d. scienze dell' istit. di Bologna.*) (7840)

Cesaris (L. de) e V. Volpini. — Le acque minerali di Viterbo. Viterbe, tip. Agnesotti. In-16, 51 p. (10280)

Clerici (E.). — Sopra alcune specie di felini della caverna al Monte delle Gioie presso Roma : nota. Rome, tip. Reggiani e socî. In-8°, 22 p. av. planche. (Extr. du *Bollettino del r. comitato geologico.*) (7338)

Forni (L.). — Osservazioni stratigrafiche sul Monte Misma. Pavie, tip. fr. Fusi. In-8°, 22 p. av. planche. (7842)

Malagoli (M.). — Il calcare di Bismantova e i suoi fossili microscopici. Modène, tip. G. T. Vincenzi e nipoti. In-8°, 11 p. av. 3 pl. (Extr. des *Atti della soc. dei naturalisti di Modena.*) (7343)

Montemartini (C.). — Sulla composizione di alcune roccie della riviera di Nizza : note. Turin, E. Loescher. In-8°, 12 p. (Extr. des *Atti della r. accad. d. scienze di Torino.*) (7344)

Pantanelli (D.). — Le acque sotterranee nella provincia modenese. Modène, tip. G. T. Vincenzi e nipoti. In-8°, 12 p. (Extr. des *Atti d. soc. dei naturalisti di Modena.*) (10281)

Piolti (G.). — Sulla cossaite del colle di Boussen (alta valle di Susa) : osservazioni. Turin, E. Loescher. In-8°, 7 p. (Extr. des *Atti della r. accad. d. scienze di Torino.*) (5884)

Reinsch (P. F.). — Familiæ polyedriearum monographia : acceduut species 15 et genera 2 nova. Venise, M. Fontana. In-8°, 27 p. (Extr. de la *Notarisia.*) (7852)

Ristori (G.). — Alcuni crostacei del miocene medio italiano. Pise, tip. T. Nistri e C. In-8°, 8 p. av. planche. (Extr. des *Atti d. soc. toscana di scienze naturali residente in Pisa.*) (8815)

Sacco (F.). — I terreni terziarî e quaternarî del Biellese. Turin, tip. Guadagnini e Candellero. In-4°, 16 p. (9851)

Sansoni (F.). — Nota di mineralogia italiana : datolite e calcite di Monte Catini (val di Cecina). Turin, E. Loescher. In-8°, 10 p. av. planche. (Extr. des *Atti della r. accad. d. scienze di Torino.*) (5888)

Silvestri (O.). — Sopra alcune lave antiche moderne del vulcano Kilauea nelle isole Sandwich : studî petrografici. Rome, tip. eredi Botta. In-8°, 52 p. (7354)

Serpieri (A.). — Scritti di sismologia, nuovamente raccolti e pubblicati da *G. Giovannozzi*. Parte I (Il terremoto del 12 marzo 1873). Florence, tip. edit. Calasanziana. In-8°, viij-217 p. (6334)

Spezia (G.). — Sulla origine del gesso micaceo e anfibolico in Val Cherasca nell' Ossola : nota. Turin, E. Loescher. In-8°, 15 p. (Extr. des *Atti d. r. accad. d. scienze di Torino.*) (5890)

Squinabol (S.). — Il travertino fra Aosta e il Piccolo s. Bernardo. Gènes, tip. A. Ciminago. In-8°, 7 p. (10793)

Strobel (P.). — Barboi del parmigiano : relazione alla società geologica italiana. Parme, L. Battei. In-8°, 20 p. av. planche. (8402)

Viola (C.). — Contributo allo studio microscopico delle roccie, eseguito nel museo mineralogico dell' università di Bologna ; fisiografia dell' Oligoclasite (Bombicci) : memoria. Bologne, tip. Gamberini e Parmeggiani. In-4°, 16 p. av. planche. (Extr. des *Memorie d. r. accad. d. scienze dell' istit. di Bologna.*) (9854)

Zoppi (G.). — Descrizione geologico-mineraria dell' Iglesiente (Sardegna) compilata sugli studî fatti dal 1876 al 1886 dal medesimo e da altri ingegneri del corpo, pubblicata a cura del r. ufficio geologico. Texte et atlas. Rome, tip. Nazionale. In-8°, vij-154 p. av. 38 pl. et carte géol. (9857)

4° *Mécanique. — Exploitation des mines.*

Crotti (F.). — La teoria dell' elasticità ne' suoi principî fondamentali e nelle sue applicazioni pratiche alle costruzioni. Milan, U. Hoepli. In-8°, 207 p. 5 fr. (6894)

Donati (L.). — Sul lavoro di deformazione dei sistemi elastici : nota. Bologne, tip. Gamberini e Parmeggiani. In-4°, 25 p. (Extr. des *Memorie della r. accad. d. scienze dell' istit. di Bologna.*) (9846)

Marrullier (P.). — Sulla composizione di un sistema di forze concorrenti. Gênes, tip. A. Ciminago. In-8°, 7 p. (7847)

—— Teorema sui centri di gravità. Gênes, tip. Ciminago. In-8°, 4 p. (7848)

Ninci (G.). — Sul motore Bénier ad aria calda. Rome, tip. lit. del Comitato d' artiglieria e genio. In-8°, 24 p. av. planche. (Extr. de la *Rivista d' artiglieria e genio.*) (7414)

Notizie chimico-industriali sulle terre gialle e bolari del Monte Amiata, conosciute comunemente Terre di Siena. Sienne, tip. G. Nava. In-8°, 15 p. (5980)

Ovazza (E.). — Sul calcolo delle deformazioni dei sistemi articolati : nota. Turin, E. Loescher. In-8°, 20 p. av. planche. (Extr. des *Atti della r. accad. d. scienze di Torino.*) (7346)

Paoli (G. de). — La laminazione del fluido motore attraverso le luci di distribuzione delle motrici termiche. Turin, tip. G. Candeletti. In-8°, 15 p. av. fig. (Extr. de l'*Annuario del. r. museo industriale italiano.*) (7849)

Rivista del servizio minerario nel 1886 (Ministero di agricoltura, industria e commercio : direzione generale dell' agricoltura). Rome, tip. eredi Botta. In-8°, cxxxj-325 p. av. 7 pl. (6460)

Saviotti (C.). — La statica grafica : lezioni con una prefazione del prof. Luigi Cremona. Milan, U. Hoepli. In-8°. 3 vol. xij-175 p.; viiij-299 p.; vij-171 p.; av. 126 pl. 40 fr. (7416)

5° *Constructions. — Chemins de fer.*

Cerroti (F.). — Spinta dei terrapieni : risposta ad una nota del capitano del genio signor G. Figari. Rome, tip. del Ministero della guerra. In-8°, 8 p. (Extr. de la *Rivista d' artigliera e genio.*) (9891)

Costruzione ed esercizio delle strade ferrate e delle tramvie : norme pratiche dettate da una eletta di ingegneri specialisti. Disp. 2-12. Turin, Unione tipografico-editrice. In-4°, p. 1-40; 116; 51; 80; 1-16; 1-48, av. 54 pl. Chaque livraison 2 fr. (5935)

Costruzioni (Le nuove) ferroviarie. Rome, tip. G. Civelli. In-8°, 23 p. (Extr. du *Giornale dei lavori publici e delle strade ferrate.*) (6377)

Crugnola (G.). — Dizionario tecnico di ingegneri e di architettura nelle lingue italiana, francese, inglese e tedesca, compresovi le scienze, arti e mestieri affini. Parte I, disp. 19-20. Turin, F. Negro. In-8°, p. 857-952. (9894)

Figari (G.). — Nota sulla formola empirica della spinta dei terrapieni, proposta dal sig. generale Cerroti. Rome, tip. lit. del Comitato d' artiglieria e genio. In-8°, 29 p. av. planche. (Extr. de la *Rivista d' artiglieria e genio.*) (7412)

Gasca (C. L.). — Il codice ferroviario. Volume II (Diritto privato). Milan, U. Hoepli. In-8°, viij-960 p. 16 fr. (8281)

Moneta (P.). — Sull' applicazione dell' elettricità alla trazione delle vetture sulla guidovia Milano-Monza : relazione al consiglio d' amministrazione della società anonima degli omnibus in Milano. Milan, tip. A. Gattinoni. In-8°, 61 p. (9900)

Signorile (G.). — Sulle pozzolane vulcaniche. Rome, tip. lit. del Comitato d' artiglieria e genio. In-8°, 61 p. (Extr. de la *Rivista d' artigliera e genio.*) (9904)

Turazza (G.). — Della conduttura forzata della acque : lezioni. Testo. Secondo edizione riordinata ed accresciuta. Padoue, A. Draghi. In-8°, xvj-440 p. 10 fr. (5941)

6° *Objets divers.*

Belluomini (G.). — Manuale del fonditore in tutti i metalli : opera indispensabile al fonditori in ghisa, in bronzo, in ottone, in campane, in caratteri tipografici ed altre industrie. Milan, U. Hoepli. In-16, 146 p. av. fig. (7951)

Capparena (R.). — Lezioni pratiche di telegrafia elettrica. Quarta edizione riveduta ed ampliata. Livourne, tip. R. Giusti. In-16, viij-114 p. av. fig. 2 fr. (8805)

Keller (A.). — Ancora sui fosfati (usati in agricoltura). Padoue, tip. G. Randi. In-8°, 26 p. (Extr. des *Atti e memorie d. r. accad. di scienze, lettere ed arti in Padova.*) (8499)

Millosevich (E.). — Intorno ad alcuni problemi geografici e cronologici collegati coi movimenti della terra : conferenza tenuta alla società geografica italiana l' 11 marzo 1888. Rome, Soc. geograf. italiana. In-8°, 19 p. av. fig. (Extr. du *Bolletino d. soc. geografica italiana.*) (8394)

Note sur les derniers progrès de la question de l'unification du calendrier dans ses rapports avec l'heure universelle, aux universités et corps savants représentés aux fêtes du huitième centenaire de l'Université de Bologne (R. académie des scien-

ces de l'Institut de Bologne). Bologne, imp. Gamberini e Parmeggiani. In-8°, 26 p. (8396)

Rossi (G. de). — La locomozione aerea : studî. Fasc I. Lanciano, R. Carabba. In-8°, p. 1-118. 1 fr. (8400)

Salino (F.). — Tavole prontuario per la misurazione delle altezze col barometro per uso di tutti secondo una nuova formola. Turin, G. Massaja. In-8°, 48 p. 2 fr. (10790)

Schweiger Lerchenfeld (D. de). — Il secolo del ferro. Parte I (Le ferrovie), disp. 11-47 ; parte II (La navigazione, gli odierni istrumenti di guerra, la rete telegrafica del globo, la navigazione aerea, ferro e carbone), disp. 1-36 (ultima). Milan, E. Vallardi. In-8°, p. 81-375, 283, av. fig. Chaque livraison 10 cent. (8860)

Siacci (F.). — Sulla compensazione delle poligonali che servono di base ai rilievi topografici : nota. Turin, E. Loescher. In-8°, 5 p. (Extr. des *Atti della r. accad. d. scienze di Torino.*) (7853)

Viale (C.). — Il P. O. Standard-Relais e i sistemi Duplex-Hughes a correnti invertite (Direzione generale dei telegrafi). Rome, tip. Elzeviriana. In-8°, 34 p. av. 2 pl. (10795)

N° 433 (4)

ANNALES DES MINES

ÉTUDES MÉTALLURGIQUES

Par M. OSMOND, ingénieur des arts et manufactures.

BIBLIOTHÈQUE NATIONALE N° Entrée 1 bis

I

TRANSFORMATIONS DU FER ET DU CARBONE DANS LES FERS, LES ACIERS ET LES FONTES BLANCHES (*).

Introduction. — Dans une précédente étude (**), nous avons, en collaboration avec M. J. Werth, essayé de relier entre eux et de rapporter à un petit nombre de causes simples les phénomènes si complexes que présentent le travail et l'emploi des aciers.

(*) Cette première partie, sauf la bibliographie qui la termine, est le résumé d'un travail plus étendu publié par le *Mémorial de l'artillerie de la marine* (3e livr. de 1887) et édité à part chez MM. Baudoin et Ce. Ce résumé était nécessaire pour relier nos dernières recherches à celles qui les ont précédées dans ces *Annales*. Les lecteurs qui s'intéressent aux problèmes de la métallurgie scientifique pourront, pour plus de détails, se reporter au mémoire original. (Brochure in-8°, 131 p., 8 pl.)

(**) *Théorie cellulaire des propriétés de l'acier.* (*Annales des mines*, 8e série, t. VIII, p. 5-84. Juillet-août 1885.)

Nous rappelons, en peu de mots, celles de nos conclusions antérieures que nous nous proposons de contrôler et de préciser ici par de nouvelles expériences.

Le carbone des fers de commerce, des aciers et des fontes blanches, ordinairement et indifféremment appelé carbone combiné ou dissous, peut se trouver sous deux formes différentes qui coexistent le plus souvent, bien qu'en proportions relatives très variables :

1° Le carbone de recuit, qui domine dans l'acier refroidi lentement à partir du rouge ou d'une température supérieure, en y formant un ou plusieurs composés probablement définis et mécaniquement mélangés au fer ;

2° Le carbone de trempe, vraisemblablement dissous dans le fer, mais non combiné à lui sous forme de composés définis, combiné peut-être à l'azote et surtout à l'hydrogène occlus, dominant dans les fontes blanches et dans les aciers trempés et réparti dans la masse métallique avec une uniformité relative.

La transformation du carbone de recuit en carbone de trempe se fait par la dissociation au rouge du carbure de fer et, réciproquement, le carbone de trempe revient à l'état de carbone de recuit pendant le refroidissement lent. Mais, si le refroidissement est suffisamment rapide et la teneur en carbone assez élevée, une fraction plus ou moins importante du carbone de trempe échappe à la combinaison et reste, spécialement dans les aciers trempés et les fontes blanches, sous la même forme prise aux températures élevées.

D'autre part, le fer peut exister sous deux états moléculaires distincts au moins, α et β.

La variété α, malléable, domine dans les aciers refroidis lentement à partir du rouge et d'autant plus exclusivement que ces métaux s'approchent davantage du fer pur.

La variété β, dure et cassante, se forme :

1° Artificiellement, par l'action de toute pression mécanique appliquée au-dessous du rouge très sombre et produisant une déformation permanente ;

2° Spontanément, à une certaine température critique restée indéterminée. Mais la modification inverse ne se produit pas ou ne se produit pas complètement pendant le refroidissement brusque et en présence de certains corps étrangers : carbone, manganèse, tungstène.

La plupart des propriétés d'un métal donné dépendent enfin :

1° Des proportions relatives de fer α et de fer β qu'il contient actuellement, proportions qui dépendent elles-mêmes de la composition chimique du métal et des conditions physiques auxquelles il a été antérieurement soumis ;

2° De la présence, de la nature, de la proportion et de la distribution des substances étrangères interposées.

Ce nouveau travail a été entrepris : d'abord, pour vérifier, préciser, compléter et, au besoin, rectifier les conclusions ci-dessus qui reposaient encore, à l'époque où nous les avons prises, sur des données en partie insuffisantes ; ensuite, pour tâcher de relier entre elles les recherches étrangères sur les mêmes questions. Ces recherches, clairsemées à l'origine, tendent à devenir de jour en jour plus nombreuses et plus universelles ; nous en donnerons plus loin, pour ces vingt dernières années, une liste déjà longue et qui n'a pas cependant la prétention d'être absolument complète ; car les notes intéressantes sont éparses dans les nombreux périodiques des sciences et des industries les plus diverses. Mais il n'entre pas dans notre programme actuel d'en faire ici une analyse qui serait déjà volumineuse et souvent encore confuse (*). La plupart des auteurs n'ont pas, en effet,

(*) Nous avons résumé ailleurs une partie de ces travaux (*loc. cit.*). Voir aussi un article de M. Ledeboer : *Lumière électrique*, 7 janvier 1888.

dépassé les expériences qualitatives ; ils ont constaté que toutes les propriétés des fers et des aciers subissent des modifications plus ou moins brusques, pendant le chauffage et le refroidissement, à certaines températures critiques ; mais, sauf quelques exceptions, ils n'ont défini exactement ni ces températures, ni les échantillons sur lesquels ils opéraient ; de sorte qu'il est encore impossible de faire la synthèse complète de leurs travaux. Nous nous contenterons donc, chemin faisant, de signaler les points de contact entre les résultats de nos prédécesseurs et les nôtres, toutes les fois que la comparaison pourra se faire utilement.

Nos expériences, commencées au laboratoire de M. H. Le Chatelier, à l'École des mines, ont été terminées au laboratoire de M. Troost, à la Sorbonne, et nous prions les professeurs qui ont bien voulu nous donner l'hospitalité d'agréer l'expression de notre vive reconnaissance.

Nous devons aussi des remerciements à MM. Clémandot, Jordan, Brustlein et Ledeboer qui nous ont gracieusement fourni des échantillons qu'il eût été impossible de trouver dans le commerce sous la forme convenable et dont la préparation présentait quelquefois de réelles difficultés.

Méthode expérimentale. — Nous nous sommes proposé de suivre la marche du refroidissement ou de l'échauffement pour des échantillons convenablement choisis et de mesurer le plus exactement possible les temps nécessaires pour que la température s'élève ou s'abaisse d'un certain nombre de degrés ; tout dégagement ou toute absorption de chaleur, résultat d'un changement physique ou d'une réaction chimique, devait se traduire par un ralentissement ou une accélération anormale dans la marche du thermomètre.

Pour la mesure des températures, nous avons mis à

profit les progrès récents apportés par M. H. Le Chatelier à l'usage des couples thermo-électriques (*).

Le couple de M. Le Chatelier est composé d'un fil de platine rhodié à 10 p. 100 de rhodium et d'un fil de platine pur fondu. Les forces électromotrices sont mesurées au moyen du galvanomètre apériodique à miroir de MM. Deprez et d'Arsonval.

Pour transformer les forces électromotrices en degrés centigrades, nous avons trouvé, en utilisant les chiffres mêmes de M. Le Chatelier, que les déviations Δ lues sur l'échelle du galvanomètre pouvaient être convenablement représentées en fonction des températures ordinaires par la combinaison d'une parabole et d'une ligne droite tangente.

On construit la parabole en transportant dans la formule générale

$$\Delta = a\,(t_1 - t_0) + b\,(t_1^2 - t_0^2)$$

(où t_1 et t_0 sont les températures des soudures, a et b des coefficients numériques), les valeurs de Δ et de t_1 correspondant aux points d'ébullition du mercure et du sélénium.

On mène ensuite une tangente à la parabole par le point fixe correspondant à la solidification du sulfate de potasse (1015 degrés). Le point de contact est à 579 degrés.

La parabole et la ligne droite servent à calculer les températures respectivement au-dessous et au-dessus de 579 degrés.

Les formules générales une fois établies, il suffit, pour graduer un galvanomètre donné ou pour corriger la graduation, si la sensibilité du galvanomètre ne reste pas constante, de prendre un seul point fixe, soit la solidi-

(*) *Journal de physique*, t. VI (2e série), janvier 1887 et *Génie civil* du 5 mars 1887.

fication du sulfate de potasse recommandée par M. Le Chatelier. Les déviations qui correspondent à une même température de la soudure chaude restent en effet proportionnelles entre elles dans toutes les échelles, la température de la soudure froide demeurant la même.

Le temps que met le thermomètre, pendant le chauffage ou le refroidissement d'un échantillon, à monter ou à descendre d'une division de l'échelle (1 millimètre), a été enregistré au moyen d'un dérouleur de télégraphe Morse ou d'un cylindre tournant mû par une petite machine électrique actionnée elle-même par une pile de Clamond. L'erreur maxima est d'environ 5 p. 100.

Tous les métaux examinés ont été pris sous forme de tiges rondes ou carrées de 5 à 7 millimètres de diamètre ou de côté, longues de 60 centimètres environ, forgées ou coulées selon la nature du métal.

A l'une des extrémités de la tige F, on pratiquait, à la lime sur les fers et les aciers, à la meule sur les fontes, un petit logement de forme convenable pour le couple (*fig.* 1, Pl. III).

Un bout F′ du même métal, long de 3 à 4 centimètres et préparé de la même manière, était rapporté sur le couple mis en place, de sorte que la soudure se trouvait serrée entre les baguettes F et F′; et on ficelait solidement le tout avec du fil de fer (*fig.* 2, Pl. III).

La *fig.* 3, Pl. III, est un croquis schématique de toute l'installation vue en plan. La tige F est introduite dans un tube en porcelaine vernissée de telle façon que la soudure vienne au centre du four S (four Leclerq et Forquignon ou tout autre analogue). Les fils de platine et de platine rhodié sont isolés par des tuyaux de pipe de la baguette métallique.

Le tube de porcelaine est fermé à ses deux bouts par des bouchons de liège qui laissent passer à frottement dur : l'un la tige F et les fils du couple, l'autre un

tube C plein de chlorure de calcium et terminé en pointe effilée.

Les extrémités des fils, soudées aux conducteurs en cuivre, sont engagées dans deux tubes à essais remplis d'alcool et plongés dans un bain d'eau E; la température de ce bain est celle de la soudure froide.

G représente le galvanomètre avec son miroir *m*, L la lampe, R la règle graduée en celluloïd avec son réflecteur M; la ligne ponctuée LM*mn* figure le trajet d'un rayon lumineux envoyé par la lampe en M et réfléchi de M en *m* et de *m* sur l'échelle.

On doit se réserver, au moyen d'un dispositif convenable, la facilité de fermer le circuit quelque part entre *a* et *b*, de façon à faire passer le courant en dehors du galvanomètre et à vérifier le zéro.

Le tube de porcelaine, dans l'intérieur duquel on laissait se refroidir ou s'échauffer la tige métallique, est resté plein d'air dans toutes les expériences; la température s'élevant, une partie de cet air s'échappait par la pointe de C et la petite quantité d'oxygène demeurant dans le tube au rouge formait une mince couche d'oxyde à la surface de l'acier; la circulation de l'air ne pouvant se faire par la pointe effilée, on a pu soumettre la même tige à un assez grand nombre d'opérations sans apercevoir de modifications notables dans ses propriétés.

Pour représenter graphiquement les résultats des expériences, nous avons pris pour abscisses les températures et, pour ordonnées, les temps compris entre les passages de l'index sur deux divisions successives de l'échelle. Ces divisions sont figurées sur les planches par les ordonnées des températures correspondantes et le point représentant le temps écoulé entre deux passages est placé au milieu de l'intervalle. Une station du thermomètre se traduit donc par une pointe aiguë et un ralentissement par un renflement de la courbe, renflement

dont la surface est proportionnelle à la quantité de chaleur dégagée.

Résultats d'expérience. a. *Phénomènes observés pendant le refroidissement lent du fer, des aciers et de la fonte blanche entre* 1.100 *et* 600 *degrés. Rôle du carbone; son changement d'état; son influence sur la transformation moléculaire du fer.* — Nous étudierons d'abord une série d'échantillons à teneur croissante en carbone, les autres éléments restant, autant que possible, en proportions faibles et peu différentes.

Ci-dessous la liste et les analyses de ces échantillons :

Numéro d'ordre		1	2	3	4	5	6
Nature		FER électrolytique	ACIER extra-doux Martin basique	ACIER doux Bessemer basique	ACIER mi-dur Martin acide	AC. DUR au creuset Marque anglaise	FONTE blanche de Suède
Mode de préparation			forgé	forgé	forgé	forgé	coulée
Forme de la baguette		rectangulaire	ronde	ronde	ronde	ronde	carrée
Dimensions de la section droite		$10^{mm} \times 4^{mm}$	6^{mm}	5^{mm}	6^{mm}	6^{mm}	$6^{mm},5 \times 6^{mm},5$
Composition chimique	Carbone	0,08	0,16	0,29	0,57	1,25	4,10
	Silicium	»	$0,01_2$	0,06	$0,08_5$	0,19	0,22
	Soufre	»	$0,02_1$	0,06	0,02	0,02	0,04
	Phosphore	»	$0,02_9$	$0,05_2$	0,05	$0,02_1$	$0,01_8$
	Manganèse	»	0,11	0,27	0,23	0,10	0,12

Pour rendre plus commode la description des phénomènes observés et leur discussion, nous conviendrons de représenter par la lettre a toutes les perturbations qui se rattachent au phénomène de la trempe et, par conséquent, au point a de Tchernoff.

Mais comme il résulte des travaux étrangers et des nôtres que le point a n'est pas simple et qu'il peut exister en réalité plusieurs points critiques voisins correspondant soit aux transformations du carbone, soit à celles

du fer, nous appellerons a_1, a_2, a_3 ces différents points, a_1 désignant la perturbation qui se produit à la température la plus basse.

Comme, en outre, la même perturbation ne se produit pas forcément à la même température selon que la marche du thermomètre est montante ou descendante, il y aura lieu de distinguer une perturbation observée pendant le chauffage, a_{c_1} par exemple, de son inverse a_{r_1} pendant le refroidissement.

Le symbole $a_{r1.2}$ signifiera que les deux perturbations a_{r_1} et a_{r_2} se sont confondues en une seule dans l'échantillon considéré.

Le symbole $\frac{a_{r_1}}{m}$ signifiera que la perturbation a_{r_1} est incomplète.

Outre les perturbations a, dont on connaît la cause et, pour ainsi dire, l'identité, nous avons pu constater quelques autres ralentissements peu marqués qui pourraient indiquer la fusion ou la solidification de composés du fer avec les impuretés. Malgré l'importance théorique et pratique peut-être très grande de ces petites perturbations, nous ne nous en occuperons pas pour le moment, parce que, en admettant même qu'elles fussent certaines, nous ne pourrions faire encore que des hypothèses sur leur véritable nature.

Ces conventions posées, nous passons à la description des faits.

1. **Fer électrolytique.** — Bande découpée dans une plaque et donnée par M. Ledeboer; cette bande a été, avant l'essai, recuite au rouge cerise dans l'hydrogène pur pour chasser l'hydrogène occlus qui modifie beaucoup, comme on le sait, les propriétés du fer.

Contrairement aux prévisions, ce fer électrolytique s'est trouvé contenir un peu de carbone (0,08 p. 100) dont la présence imprévue a été vérifiée par deux do-

sages concordants (méthode Bousingault) et aussi par la coloration communiquée à l'acide azotique (méthode Eggertz).

Malgré cela, ce métal est, de tous ceux qui ont été examinés, celui qui se rapproche le plus du fer pur.

Pendant le refroidissement, le thermomètre s'arrête brusquement à 855 degrés et fait à cette température une station prolongée a_{r3}; puis il reprend, brusquement aussi, sa marche descendante.

Un ralentissement progressif a_{r2} commence vers 750 degrés, présente un premier maximum principal entre 737-730 degrés, un deuxième maximum secondaire entre 708-702 degrés et prend fin vers 690 degrés.

Un dernier ralentissement a_{r1} paraît se produire vers 660 degrés; mais il est tout à fait douteux, et nous ne le mentionnons ici que parce qu'il pourrait correspondre à un phénomène que nous retrouverons considérablement amplifié dans les aciers.

2. **Acier extra-doux.** — La marche du refroidissement présente trois ralentissements, tous les trois progressifs, dont les phases sont indiquées dans le tableau ci-dessous :

	Début vers	Maximum entre	Fin vers
a_{r3}	845°	825°–819°	800°
a_{r2}	755°	736°–725°	710°
a_{r1}	680°	662°–655°	645°

3. **Acier doux.** — Deux ralentissements progressifs :

	Début vers	Maximum	Fin vers
$a_{r3\cdot2}$	780°	721°–715°	690°
a_{r1}	680°	660°	640°

4. **Acier mi-dur.** — Un ralentissement progressif et une station.

Le ralentissement $a_{r3.2}$ commence vers 750 degrés, présente son maximum entre 700 et 690 degrés et va se

souder, avant d'être complètement terminé, à la station a_{r1} à 661 degrés.

5. **Acier dur.** — Le petit ralentissement $\frac{a_{r3}}{m}$ qui se produit nettement vers 860 degrés, dans le refroidissement donné comme exemple, n'est pas normal pour l'acier considéré. Les autres refroidissements du même acier n'ont donné aucune perturbation comparable. Il s'agit donc d'un accident qu'il était d'ailleurs intéressant de noter.

La caractéristique de ce métal est une longue et unique station $a_{r3.2.1}$ à 674 degrés. La station est accompagnée d'un ralentissement qui l'annonce et la suit, mais en se raccordant avec elle (début vers 720 degrés, fin vers 645 degrés).

6. **Fonte blanche.** — Solidification s à 1085 degrés.

Les phénomènes signalés pour les aciers sont représentés par une station unique $\frac{a_{r3.2.1}}{m}$ qui s'établit vers 695 degrés et se raccorde d'une façon continue à un ralentissement commencé vers 710 degrés et terminé vers 660 degrés.

Nous pouvons maintenant discuter ces résultats qui sont tous réunis Pl. I.

Il suffit de jeter un coup d'œil sur les courbes superposées pour voir que la station a_{r1} va en croissant depuis le fer électrolytique, où elle est presque nulle, jusqu'à l'acier le plus dur, où elle prend une importance considérable. a_1 *est une fonction de la teneur en carbone et on peut immédiatement l'identifier avec le phénomène auquel M. Barrett, qui l'a découvert en* 1873, *a donné le nom de récalescence* (*). Cependant, dans tous les

(*) La récalescence est naturellement accompagnée des autres phénomènes qui sont le corollaire d'une élévation de température, notamment d'une dilatation anormale interrompant le retrait de l'acier. Cette dilatation, observée par M. Gore dès 1869,

exemples que nous venons de donner, nous n'avons indiqué en a_{r_1} qu'une station plus ou moins longue du thermomètre, tandis que, dans les expériences de M. Barrett, la température (du moins pour certains échantillons) se relevait spontanément d'une façon appréciable à l'œil; cette différence nous paraît être sans importance et nous avons souvent aussi constaté la récalescence proprement dite; pour le même acier, on peut avoir indifféremment récalescence, station ou simple ralentissement, suivant les vitesses relatives du refroidissement et de la réaction qui dégage de la chaleur; la réaction est elle-même plus ou moins rapide selon qu'elle a été plus ou moins retardée; ces phénomènes sont analogues à ceux de la surfusion.

a été le point de départ des recherches ultérieures de MM. Barrett, Norris, Nouel. Nous reproduisons, *fig.* 4, pl. III, les intéressantes figures données par M. Norris. Ces figures représentent, convenablement amplifiés, les mouvements de l'extrémité libre d'un fil d'acier suspendu, pendant le chauffage et le refroidissement à partir des états suivants :

1. Fil du commerce, premier chauffage.
2. Fil du commerce, deuxième chauffage.
3. Fil refroidi rapidement à l'air.
4. Fil trempé à l'eau.
5. Fil recuit et abandonné à un refroidissement très lent.

Outre les crochets de Gore, les diagrammes montrent généralement, après refroidissement complet, un allongement ou un retrait permanent.

En comparant 1 et 2, on trouve que l'écart entre les phénomènes inverses, au chauffage et au refroidissement, est plus grand à la deuxième opération qu'à la première; en même temps, la dilatation totale est moindre.

Le diagramme 5 (chauffage) montre un double crochet.

M. Norris distingue, pendant le chauffage, une cause de dilatation et deux causes de contraction.

1° Dilatation dite *dynamique*, celle que présentent tous les corps chauffés;

2° Contraction permanente de chauffage, due à un phénomène de décristallisation;

3° Contraction temporaire, due à l'abaissement de température qui résulte de l'absorption de chaleur correspondant à la contraction permanente.

Le refroidissement donnerait lieu aux phénomènes inverses.

Le double crochet du diagramme 5 serait dû à la dissociation, pendant le refroidissement très lent, du fer et du carbone; de sorte que, pendant le chauffage subséquent, le premier crochet correspondrait à la décristallisation du fer et le second à la recombinaison du fer et du carbone.

On sait par les travaux de M. Brinell que la récalescence est produite, au moins en partie, par la transformation du carbone de trempe en carbone de recuit. *Comme le carbone de recuit est combiné au fer et que le carbone de trempe ne l'est probablement pas, on peut dire, si les idées que nous avons émises antérieurement sont exactes* (*), *que la récalescence est due à la chaleur dégagée par la combinaison du carbone avec le fer, et, réciproquement, le phénomène inverse* a_{c_1} *représenterait la dissociation du carbure de fer stable aux températures inférieures.*

Les expériences ci-dessus décrites nous paraissent confirmer cette manière de voir. En effet, une réaction chimique *réversible* qui dégage de la chaleur est généralement une combinaison. Si, comme le voudrait la théorie de Caron, la récalescence représentait la décomposition d'un carbure de fer stable aux températures élevées, ce carbure serait constitué avec absorption de chaleur et appartiendrait à la classe des explosifs : la perturbation a_1 ne serait pas réversible.

Mais, dira-t-on, s'il est vrai que la récalescence représente une combinaison chimique, il n'est nullement certain que cette combinaison se fasse entre le fer libre et le carbone libre plutôt qu'entre le fer et un autre carbure préexistant plus carburé. Cela est en effet possible; mais si la combinaison de ce carbure supposé avec un excès

(*) *Théorie cellulaire*, p. 61.

de fer dégage une quantité de chaleur telle que l'indique la récalescence, ce carbure lui-même, plus simple, serait vraisemblablement aussi constitué avec un fort dégagement de chaleur; il ne devrait pas se décomposer pendant le recuit dans la fabrication des fontes malléables ni se laisser attaquer à froid, comme il le fait, par les acides les plus faibles (*).

Il est à remarquer que la station a_{r1}, qui croît depuis l'acier extra-doux jusqu'à l'acier le plus dur, diminue au contraire lorsqu'on passe de l'acier dur à la fonte blanche. Il résulte de là que, dans cette dernière, la plus grande partie du carbone reste au même état avant et après la récalescence. Est-ce le carbone de trempe qui persiste dans la fonte refroidie ou le carbone de recuit qui reste combiné au rouge? C'est la première alternative qui est la vraie, comme le prouvent de récentes expériences de M. Werth. M. Werth a trouvé en effet que le résidu isolé, par la méthode de Weyl, de la même fonte blanche qui avait servi à nos essais ne contenait qu'une très faible proportion de fer et, par conséquent, de carbure de fer ou de carbone de recuit. D'ailleurs, une partie du carbone de trempe prend facilement, dans les fontes très pures et très carburées, la forme de graphite; il suffit de chauffer un peu au-dessous du point de fusion et de laisser refroidir lentement.

Même dans les aciers, le carbone ne prend jamais l'une de ses deux formes à l'exclusion *complète* de l'autre, comme l'ont montré nos recherches sur l'état du carbone par la méthode Eggertz. Cela peut tenir à ce que la vitesse du refroidissement n'est jamais infiniment grande ni infiniment lente et aussi à la nature du milieu où doit s'effectuer la réaction : dans un corps solide, les

(*) *Théorie cellulaire*, p. 17 et suiv.

atomes ne sont pas en chaque point dans les conditions voulues pour la combinaison.

La température à laquelle se fait cette combinaison, dans les conditions de nos expériences, tend à s'élever lentement à mesure que la teneur en carbone augmente. Nous avons en effet :

	Maximum de a_{r1}
1. Fer électrolytique	660°
2. Acier extra-doux	662°-655°
3. Acier doux	660° (*)
4. Acier mi-dur	661° (*)
5. Acier dur	674°
6. Fonte blanche	695°

Il est cependant probable que la température de combinaison est théoriquement une constante; mais la réaction est retardée en fait par la rareté relative du carbone.

Nous allons maintenant examiner les perturbations propres au fer.

Dans le fer électrolytique, ces perturbations sont au nombre de deux, a_{r2} et a_{r3}.

a_{r2}, entre 750 et 690 degrés, s'identifie immédiatement avec la perturbation déjà signalée par M. Pionchon entre 723 et 660 degrés, et cela d'autant mieux que l'un des deux échantillons de M. Pionchon, le fer du Berry, devait contenir un peu de carbone qui se combine justement au fer à 660 degrés.

a_{r3} (à 855 degrés) ne s'identifie pas d'une façon aussi satisfaisante avec la seconde perturbation de M. Pionchon entre 1.000 et 1.050 degrés. L'écart ne semble pas attribuable aux méthodes différentes employées pour la mesure des températures; mais il faut remarquer que les chiffres de M. Pionchon se rapportent au chauffage

(*) Les échantillons 3 et 4 étant un peu plus manganésés que les autres, les deux températures 660 degrés et 661 degrés sont relativement un peu basses.

et les nôtres au refroidissement, ce qui les rapproche déjà, comme nous le verrons plus loin; en outre, la position de a_3 varie avec la composition du métal et la vitesse du refroidissement; l'écart signalé n'a donc rien d'extraordinaire et, ce qui est l'essentiel, l'accord est complet quant à l'existence même de a_3.

L'acier extra-doux présente également les deux points critiques a_{r2} et a_{r3}; mais a_{r3}, qui était une station brusque à 855 degrés pour le fer électrolytique, devient ici un ralentissement progressif entre 845 degrés et 800; une addition, bien minime pourtant, de carbone et de manganèse, a donc suffi pour abaisser notablement a_{r3} et en modifier profondément l'allure.

Dans l'acier doux, a_{r3} descend encore et va se confondre avec a_{r2} en un ralentissement progressif unique $a_{r3.2}$. Il est facile de vérifier que la quantité de chaleur dégagée par $a_{r3.2}$ est bien sensiblement égale à la somme des quantités de chaleur dégagées par la somme des deux perturbations a_{r2} et a_{r3} de l'acier extra doux.

Dans l'acier mi-dur, nouvel abaissement de la perturbation double $a_{r3.2}$; le maximum, entre 700 et 690 degrés, est encore nettement séparé de la récalescence (661°), mais la fin va se souder à ce dernier phénomène.

Enfin, dans l'acier dur, tout se confond en une seule station $a_{r3.2.1}$.

Au résumé, si l'on appelle β *la forme moléculaire que possède le fer au-dessus de* 855 *degrés dans le fer électrolytique et* α *celle qu'il y garde à partir de* 700 *degrés environ, on voit que la présence du carbone, sous la forme de carbone de trempe, maintient le fer à l'état* β *jusqu'à une température d'autant plus basse que la teneur en carbone est plus élevée;* la température de la récalescence marchant **lentement** de son côté en sens inverse, il existe une teneur **en carbone** au-dessus de laquelle toutes **les transformations** se **réunissent et se** confondent.

Il reste à savoir si les deux ralentissements a_3 et a_2, distincts dans les métaux les moins carburés, correspondent à deux modifications du fer également distinctes ou à deux périodes d'une modification unique.

De même qu'une teneur suffisante en carbone abaisse a_{r3} en totalité, il semblerait naturel qu'une teneur plus faible (comme celle du fer électrolytique ou d'autres échantillons analogues), l'abaissât partiellement en a_{r2}; a_{r2} ne serait alors que la fin retardée de a_{r3}. D'accord avec cette hypothèse, on remarque que a_{r2} n'a pas l'allure franche des modifications moléculaires les mieux connues qui se produisent complètement à une température critique bien déterminée.

D'autre part, les expériences récentes de M. Ledeboer semblent identifier l'apparition des propriétés magnétiques avec a_{r2} et non avec a_{r3}; mais ces expériences ne sont pas concluantes, parce que la position de a_{r3} n'y a pas été déterminée à part dans les conditions de refroidissement rapide auxquelles le barreau était soumis.

La question reste donc en suspens. *Provisoirement*, nous adopterons l'hypothèse la plus simple, et nous admettrons qu'il n'existe que deux états allotropiques du fer, α et β, mais que le passage de l'un à l'autre peut être, soit brusque et total, soit progressif et discontinu selon la composition du métal.

b. *Influence de la température initiale et de la vitesse du refroidissement sur la position des points critiques. — Théorie de la trempe.* — Si on soumet le même échantillon d'acier à une série de chauffages et de refroidissements successifs en élevant progressivement la température, on trouve que la position de la récalescence s'abaisse, assez rapidement d'abord, puis très lentement, à mesure que l'on part d'une température initiale plus haute.

La position de la récalescence s'abaisse également

quand la vitesse du refroidissement augmente, comme le montrent les chiffres consignés dans le tableau ci-dessous :

Refroidissement.	ACIER MI-DUR			ACIER DUR		
	DURÉE du refroidissement entre 685-658°	RÉCALESCENCE $a_{r\,1}$		DURÉE du refroidissement entre 705-678°	RÉCALESCENCE $a_{r\,3.2.1}$	
		Arrêt à	Retour à		Arrêt à	Retour à
ralenti en tube. . . .	116^{sec},0	653°	656°	49^{sec}	671°	675°
ordinaire en tube . . .	24 ,5	648	655	20	670	680
rapide à l'air.	Non mesurée	637	640	Non mesurée	642	651
très rapide; trempe à l'eau froide	Id.	Absence		Id.	Absence	

Pendant la trempe vive, on n'aperçoit plus aucune perturbation.

Ainsi, lorsque la vitesse de refroidissement est assez grande, les transformations qui se produisaient pendant le refroidissement lent ne s'accomplissent plus, au moins intégralement; l'acier trempé est un acier où le fer et le carbone ont conservé plus ou moins complètement à froid l'état qu'ils possédaient aux températures élevées; la chaleur des transformations effectuées est restée disponible dans le métal; nous l'appellerons chaleur latente de trempe.

L'existence de la chaleur latente de trempe avait d'ailleurs été démontrée antérieurement par nos essais calorimétriques (*); elle le sera bientôt une fois de plus par le dégagement de chaleur qui se produit pendant le réchauffage de l'acier trempé.

Ce retard d'une modification moléculaire et d'une réaction chimique n'est qu'un cas particulier d'un fait général; tous ces phénomènes exigent un certain temps

(*) *Théorie cellulaire*, p. 36 et suiv.

pour s'accomplir; et ils demeurent incomplets si les conditions dans lesquelles ils sont possibles ne sont pas maintenues pendant le temps suffisant.

Recherchons maintenant quelle part est attribuable au fer et quelle part au carbone dans les propriétés de l'acier trempé.

Pour cela, prenons l'acier mi-dur où, pendant le refroidissement lent, la perturbation $a_{r\,3.2}$ se distingue encore nettement de la perturbation $a_{r\,1}$; chauffons-le à une température suffisante pour que tous les phénomènes inverses de ceux que nous avons étudiés soient accomplis et trempons-le successivement :

1° Avant $a_{r\,3.2}$, c'est-à-dire avant le commencement de la modification du fer;

2° Après le maximum de $a_{r\,3.2}$ et avant le début de $a_{r\,1}$, c'est-à-dire dans la période où, la transformation du fer étant très avancée, celle du carbone n'est pas encore commencée;

3° Immédiatement après $a_{r\,1}$, c'est-à-dire quand toutes les transformations sont effectuées.

Essayons enfin les échantillons ainsi préparés, à la lime, pour juger de leur dureté, et à la touche par l'acide azotique pour vérifier l'état du carbone.

On trouve que :

1° La trempe avant $a_{r\,3.2}$ fournit l'acier trempé normal, dur à la lime, avec son carbone à l'état de carbone de trempe;

2° Après la trempe entre $a_{r\,3.2}$ et $a_{r\,1}$, le carbone est encore à l'état de carbone de trempe, mais le métal est doux à la lime;

3° Lorsque la trempe n'a été faite qu'après $a_{r\,1}$, le métal est doux à plus forte raison et le carbone est à l'état de carbone de recuit.

C'est donc essentiellement la présence du fer β *qui donne à l'acier trempé ses propriétés caractéristiques.*

L'influence du carbone est donc de même ordre que celle de la vitesse du refroidissement. Le refroidissement n'est pas assez rapide, *dans les conditions où l'on pratique ordinairement la trempe*, pour maintenir, dans les aciers doux et les fers, une portion notable du fer à l'état β; de même, le carbone n'a qu'une action limitée pendant le refroidissement lent, à moins que sa teneur ne dépasse celle des aciers les plus durs du commerce. C'est donc en ajoutant l'action du carbone à celle du refroidissement brusque qu'on obtient pratiquement la trempe des aciers.

On s'explique facilement que la dureté de la trempe varie, pour le même acier, avec la vitesse du refroidissement. Si, en effet, on fait varier le temps pendant lequel les conditions de température permettent la transformation du carbone de trempe en carbone de recuit, on fera varier du même coup la proportion de carbone qui échappe à cette transformation et, indirectement, la proportion de fer qui gardera la forme β. En outre, pour les aciers où les perturbations $a_{r\,3.2}$ et $a_{r\,1}$ sont distinctes, il est bien évident que l'on n'obtiendra par la trempe la dureté maximum qu'à la condition de tremper avant le début de $a_{r\,3.2}$.

c. *Phénomènes observés pendant le chauffage des mêmes échantillons entre* 600 *et* 1.100 *degrés.* — Nous donnons ci-dessous un tableau comparatif des points critiques au refroidissement et au chauffage :

		a_3			a_2			a_1		
		Limite	Maximum	Limite	Limite	Maximum	Limite	Limite	Max.	Limite
Fer électrolytique.	Refroidiss^t.	855	855	855	750	pp^{al} second. 733 705	690	Douteuse.		
	Chauffage.	900	867	840	730	720	710	Manque.		
	Différ. . . .		— 12			Douteuse.				
Acier extra-doux.	Refroidiss^t.	845	822	800	755	730	710	680	658	645
	Chauffage.	920	pp^{al} second. 900 864	835	755	725	?		690?	
	Différ. . . .					5				
Acier mi-dur.	Refroidissement				750	695	Confondues.		661	645
	Chauffage							720	705	690
	Différences								— 44	
Acier dur	Refroidissement							720	674	645
	Chauffage							720	705	698
	Différences								— 31	

On voit que toutes les perturbations étudiées sont réversibles, comme on pouvait d'ailleurs le prévoir, puisque ces perturbations se reproduisaient identiques à elles-mêmes pour une série de refroidissements successifs du même échantillon.

a_2, seule, se produit au chauffage et au refroidissement dans le même intervalle de températures.

Pour tous les autres points critiques, la température au chauffage est plus élevée que la température au refroidissement. Il est vrai que la température extérieure des tiges d'acier chauffées ou refroidies n'est jamais tout à fait égale à celle de l'intérieur; d'où il résulte que les températures indiquées par le couple sont un peu inférieures à la température moyenne pendant le refroidis-

sement et un peu supérieures pendant le chauffage. Mais l'écart normal qui provient de ce fait est très inférieur à celui que l'on observe dans la plupart des cas et qui a été signalé par beaucoup d'autres auteurs (Norris, Brinell, Newall, etc.). Il est cependant probable que la température théorique des points critiques doit être la même dans les deux sens; mais comme les réactions chimiques, aussi bien que les transformations dimorphiques, n'acquièrent une certaine vitesse que lorsque le système est suffisamment éloigné de ses conditions d'équilibre, on se trouve constamment, dans la pratique, en présence de retards plus ou moins longs dus à la vitesse du chauffage ou du refroidissement. Dans le cas considéré, ces retards peuvent être exagérés, pour la combinaison du fer avec le carbone, par l'état solide du milieu, et, pour la transformation du fer, par la présence du carbone. Aussi l'écart entre $a_{c\,3}$ et $a_{r\,3}$ est-il minimum pour le fer électrolytique.

Ces expériences confirment le fait, observé par M. Brinell, que la température à laquelle il faut chauffer un acier pour qu'il puisse prendre la trempe et celle à laquelle il suffit de le plonger dans l'eau pendant le refroidissement ne sont pas identiques.

Elles montrent aussi que la décomposition du carbure de fer, en $a_{c\,1}$, n'est pas naturellement progressive, comme nous l'avions supposé antérieurement; cependant cette décomposition peut être progressive en fait, mais seulement quand la vitesse du chauffage est assez grande.

d. *Chauffages et refroidissements au-dessous de* 600 *degrés. Théorie du revenu.* — On sait que les aciers et probablement aussi les fers présentent, vers 300 degrés, un maximum de fragilité et de résistance à la rupture. Nous avons donc examiné cette région par la méthode du refroidissement, mais sans pouvoir y découvrir, non

plus que pendant le chauffage, aucune anomalie qui dépassât la limite des erreurs d'expérience.

Cela n'est vrai, bien entendu, que pour les métaux pris à l'état naturel. Car, si l'on part d'un acier trempé, la chaleur latente de trempe doit se dégager à mesure que les effets de la trempe s'atténuent, et la marche du réchauffage après trempe doit présenter des accélérations caractéristiques.

L'expérience confirme ces prévisions; nous donnons (Pl. III) les courbes qui montrent le réchauffage de l'acier dur naturel ou trempé.

Le dégagement de la chaleur de trempe commence, dans les conditions de l'essai, vers 200 degrés; il présente un maximum autour de 350 degrés et se termine vers 520 degrés. Enfin, un dernier dégagement de chaleur se produit entre 660 et 680 degrés, c'est-à-dire très près de la station connue $a_{c\,3.2.1}$ (*).

(*) Il est certain que la forme des courbes changerait avec la vitesse du chauffage. Voir, à ce sujet, les importants travaux de MM. Barus et Strouhal, dont la liste suit:

C. Barus. — *Die thermoelektrische Stellung und das elektrische Leitungsvermögen des Stahls in ihrer Abhängigkeit von der Härtung.* (Der physik.-medicin. Gesellschaft zu Würzburg am 18/1/79 in Auszuge mitgetheilt. Wied. Ann., neue Folge, t. VII, p. 338, 1879.)

V. Strouhal und **C. Barus.** — *Ueber Anlassen des Stahls und Messung seines Härtezustandes.* (Sep.-Abdr. aus den Verhandl. der phys.-med. Ges. zu Würzburg. N. F., t. XV, 1880.)

— *Ueber die Definition des Stahls auf Grundlage des elektrischen Verhaltens des Eisens bei wachsendem Kohlenstoffgehalt.* (Abhandlungen d. k. böhmischer Gesellschaft der Wiss.; 6e série, t. XII, p. 1-25, 1883-84.)

C. Barus and **V. Strouhal.** — *The electrical and magnetic Properties of the Iron-Carburets.* (Bull. of the U. S. geological Survey, n° 14, 1885.)

— *Physical Properties of the Iron-Carburets.* (Bull. of the U. S. geological Survey, n° 35, 1886.)

— *The Viscosity of Steel and its Relations to Temper* (Amer. Journal of Science, XXXII et XXXIII, dec. 1886 et jan. 1887.)

C. Barus. — *The Viscosity of Steel and its Relations to Temperature.* (Amer. Journ. of Sc., XXXIV, July 1887.)

C. Barus and **V. Strouhal.** — *The Relation between electrical Resistance and Density, when varying with the temper of Steel.* (Washington Laboratory, Bull. 27.)

Ceci nous permet d'ébaucher la théorie du *revenu*, le revenu étant, comme on le sait, le réchauffage limité que l'on fait subir à l'acier trempé pour en diminuer la fragilité.

Puisque la trempe maintient le fer à l'état β et le carbone à l'état de carbone de trempe, on peut dire que le revenu permet au fer de reprendre la forme α et au carbone de se combiner avec le fer; mais les courbes ne montrent pas si les deux transformations sont simultanées ou successives.

Or, il résulte d'anciens essais, faits avec M. Werth par la méthode de Weyl, que, après un revenu d'une demi-heure au plomb fondu vers 400 degrés, le carbone a déjà repris la forme de carbone de recuit. Mais le résidu isolé, s'il est chimiquement identique à celui qu'on extrait du même acier refroidi lentement à partir du rouge, en est physiquement différent. Le second est composé de paillettes brillantes d'un gris de fer et d'un aspect métallique; le premier est une poudre noire amorphe qui doit ce changement d'aspect à son extrême division. Le carbone, pendant le revenu, s'est bien combiné au fer, mais il s'est combiné *in situ* et n'a pu reprendre, dans un milieu solide à la température relativement basse de 400 degrés, la situation d'enveloppe qu'il occupe, dans l'acier naturel, par rapport aux granulations de fer.

Puisque la régénération du carbone de recuit est presque achevée dès 400 degrés et achevée à 520 degrés dans les expériences décrites, l'accélération au chauffage entre 660 et 680 degrés ne peut plus être attribuée qu'à la régénération du fer α.

Tous les faits s'expliquent maintenant avec facilité. En faisant revenir en acier, on détermine d'abord la combinaison du carbone de trempe avec le fer, et cela d'autant plus complètement que la température de revenu est plus élevée et maintenue pendant un temps plus long.

On reconstitue ainsi dans l'acier une substance étrangère, indépendante, mécaniquement interposée, qui change un corps quasi-vitreux, éminemment fragile, en un corps poreux hétérogène beaucoup moins fragile; en même temps, au fur et à mesure de la transformation du carbone, la proportion de fer β diminue évidemment de tout le fer qui se combine au carbone, et probablement davantage à la faveur des déplacements et arrangements moléculaires qui doivent être la conséquence de cette réaction intime. Mais comme une fraction du fer β subsiste jusqu'à 660 degrés, la dureté ne diminue pas pendant le revenu aussi rapidement que la fragilité.

On pourrait comparer l'acier trempé au maximum à un diamant massif, l'acier revenu après trempe à une composition d'égrisée agglomérée par une substance moins dure et plus plastique. En résumé, l'acier recuit au rouge est principalement constitué par le fer α dont les granulations élémentaires sont enveloppées de carbure de fer, l'acier trempé par le fer β en masse *continue* tenant le carbone en dissolution, l'acier revenu par un mélange intime du précédent avec une proportion variable de fer α et de carbure de fer infiniment divisé.

Toutes les transitions, tous les intermédiaires sont d'ailleurs possibles entre ces trois types.

Les trempes douces (trempe à l'huile ou à l'eau bouillante), le laminage prolongé au-dessous du rouge sombre, la trempe par compression, opérations qui sont à peu près équivalentes à la trempe vive suivie d'un revenu entre 400 et 500 degrés, s'expliquent de la même manière: la vitesse de refroidissement qu'elles communiquent à une pièce de dimensions convenables est assez grande pour qu'une fraction du fer soit maintenue à l'état β, à la faveur du carbone de trempe, jusqu'au-dessous de 660 degrés et assez faible pour que, entre 660 et 200 degrés, une partie

suffisante du carbone puisse revenir à l'état de carbone de recuit *intimement mélangé*.

Le fait que, pendant le revenu, la transformation du carbone est progressive, peut sembler surprenant ; il est bien cependant d'accord avec la pratique qui nous montre l'effet du revenu proportionnel à la température atteinte ; mais il paraîtrait naturel que la réaction du carbone sur le fer fût complète dès qu'elle est possible et même explosive, puisqu'aucune tendance à la réaction inverse ne la limite à la température considérée. S'il en est autrement, c'est que l'état solide du milieu, dont nous avons eu déjà à invoquer l'influence, ne permet pas à tous les atomes de carbone de trouver immédiatement à leur portée, comme dans un milieu liquide ou gazeux, le fer nécessaire à la formation de la combinaison.

e. *Influence des corps étrangers.* — Le rôle du manganèse, dont la présence est constante dans les produits Bessemer et Martin-Siemens, était particulièrement intéressant à fixer : nous avons donc étudié d'abord le refroidissement des échantillons suivants, à partir de 1.100 degrés pour les aciers et de 900 degrés pour les ferromanganèses :

	Aciers				Ferromanganèses de Saint-Louis		
	A	B	C	D			
Carbone p. 100.	0,29	0,32	0,42	0,46	»	»	»
Silicium p. 100.	0,06	0,05	$0,03_5$	0,07	»	»	»
Manganèse p. 100. . .	0,27	0,50	1,00	1,08	20,00	50,00	80,00

Les résultats d'observation sont réunis dans le tableau ci-dessous :

	TENEUR en Mn	$a_{r\,3.2}$ Début vers	$a_{r\,3.2}$ Maximum	$a_{r\,3.2}$ Fin vers	$a_{r\,1}$ Début vers	$a_{r\,1}$ Maxi-mum	$a_{r\,1}$ Fin vers
Acier A	0,27	780	720-715	690	680	660	640
Id. B	0,50	740	705-697	660	660	640	620
Id. C	1,00	725	665 ?	Confondus.		625	600
Id. D	1,08	725 ?	658 ?	Id.		620	595
Ferromanganèse. . .	20,00	Pas de perturbations notables.					
Id. . .	50,00	Id.					
Id. . .	80,00	Id.					

On voit, en comparant ces résultats entre eux et à ceux que fournissent d'autres aciers aussi peu manganésés que possible, que, pendant le refroidissement, le manganèse retarde à la fois le changement moléculaire du fer et la récalescence ; c'est-à-dire qu'il maintient le carbone à l'état dissous et le fer à l'état β, d'autant plus longtemps qu'il est en proportions plus fortes. Cette action est absolument comparable à celle que produirait un refroidissement plus rapide sur un acier non manganésé de même teneur en carbone. En un mot, elle équivaut à une trempe plus ou moins dure : conclusion d'accord avec les propriétés mécaniques connues des aciers manganésés. Dans les ferromanganèses à 20 p. 100 de Mn et au-dessus, on n'observe plus aucune perturbation, le refroidissement ayant été suivi jusqu'à 300 degrés. Le fer et le carbone y restent donc au même état depuis le rouge-cerise clair jusqu'à la température ordinaire. C'est pourquoi ces alliages ne sont pas magnétiques à froid, tout comme les aciers au-dessus de la température critique : le fer est dans les deux cas sous la même forme.

Le tungstène possède la même propriété que le manganèse et même à un degré plus marqué. Un acier dur pour aimants, contenant une assez forte proportion de tungstène et aussi de manganèse, ayant été abandonné

au refroidissement à partir de 1.100 degrés, n'a donné la récalescence qu'à la température exceptionnellement basse de 517-510 degrés. Toutefois la température initiale a ici une grande influence.

Le chrome ne paraît pas agir sur la transformation du fer, autant du moins que j'ai pu m'en assurer, n'ayant pas à ma disposition d'aciers chromés extra-doux; mais il a certainement sur la récalescence une action précisément contraire à celle du manganèse : il élève la température à laquelle se produit le changement d'état du carbone, et c'est vraisemblablement à cette circonstance que les aciers chromés doivent d'être peu fragiles eu égard à leur dureté.

Le silicium ne se rencontre guère dans les aciers sans y être accompagné d'une quantité généralement supérieure de manganèse. Dans ces conditions, il ne semble pas avoir d'influence sur les phénomènes étudiés. Ces phénomènes se sont produits, pour un échantillon contenant pour 100

Carbone, 0,35; Silicium, 0,55; Manganèse, 0,87

aux mêmes températures que pour un acier sans silicium présentant du reste la même composition. On sait d'ailleurs que le silicium ne fait pas tremper les aciers.

Le soufre neutralise, pour ainsi dire, une partie du manganèse. Un acier rouverin, pratiquement inutilisable, contenant pour 100

Carbone, 0,48; soufre, 0,28; Manganèse, 0,51;

a donné la récalescence à 671 degrés; tandis que l'acier B ci-dessus, de même teneur en manganèse, mais n'ayant que la faible teneur en soufre des aciers normaux, avait donné le même phénomène à 640 degrés. La différence entre les teneurs en carbone des deux échantillons n'expliquerait nullement un aussi grand écart.

Le phosphore, en proportions modérées, n'a pas d'influence certaine sur la modification du fer ni sur la récalescence. Son action nuisible doit être rapportée à des causes absolument différentes, c'est-à-dire à la formation dans l'acier de composés fragiles par eux-mêmes et qui facilitent, en fondant à une température relativement basse, la cristallisation du fer.

Chaque corps étranger joue donc dans les aciers un rôle distinct. L'équivalence entre proportions définies de corps différents n'aura donc généralement lieu que vis-à-vis d'une seule propriété physique, les autres propriétés étant simultanément altérées suivant des lois différentes. Le carbone paraît rester le seul corps *aciérant*, au sens classique du mot : les autres corps qui interviennent aussi dans les propriétés caractéristiques des aciers ne sont que des modificateurs; mais la métallurgie en tire souvent un parti utile pour répondre à des besoins déterminés.

Bibliographie.

TRAVAUX RELATIFS AUX POINTS CRITIQUES DU FER, DE L'ACIER ET DU NICKEL (*).

G. Gore. — *On a momentary Molecular Change in Iron Wire.* (Proceedings Roy. Soc., Jan. 28, 1869 et Philos. Mag., 4e série, t. XXXVIII, p. 59, July 1869.)

W. F. Barrett. — *On certain Molecular Changes occurring in Iron Wires at a low Red Heat.* (Philos. Mag., 4e série, t. XLVI, p. 472, 1873.)

Tait. — *First Approximation to a thermo-electric Diagram.* (Trans. roy. Soc. Edinburgh, t. XXVII, p. 125. Read Dec. 1, 1873.)

G. Forbes. — *On the After-glow of Cooling Iron at a Dull-Red Heat.* (Proc. roy. Soc. Edinb., t. VIII, p. 363. Read April 6, 1874.)

C. M. Smith, C. G. Knott and A. Macfarlane. — *On the electric Resistance of the Iron at a High Temperature.* (Proc. roy. Soc. Edinb., t. VIII, p. 629. Read 15th Febr. 1875.)

(*) Sont compris dans cette bibliographie quelques articles relatifs aux changements moléculaires du nickel, métal très analogue au fer. Comme ces changements moléculaires se produisent à une température plus basse dans le nickel que dans le fer, ils ont pu être plus facilement étudiés, et ils donnent lieu à d'intéressantes comparaisons.

Norris. — *On certain Molecular Changes which occur in Iron and Steel during the separate Acts of Heating and Cooling.* (Proc. roy. Soc., t. XXVI, p. 127, 1877.)

H. Moissan. — *Sur les oxydes métalliques de la famille du fer.* (Ann. de Chim. et de Phys., 5e série, t. XXI, 1880.)

C. Baur. — *Neue Untersuchungen über den Magnetismus.* (Wied. Ann., neue Folge, t. XI, p. 394.)

G. Chrystal. — *Experiments with the Wire Telephone, chiefly or strongly Magnetic Metals.* (Nature, t. XXII, p. 303, July 29, 1880.)

J. A. Brinell. — *Om ståls texturförändringar under uppvärmning och afkylning.* (Jernkontoret's Annaler, 1885, p. 9. Traduit en allemand par Stahl und Eisen, t. V, p. 611, nov. 1885.)

Heim. — *Untersuchungen über die Gore'schen Phänomene.* (Inaugural Dissertation. München, H. Kützner, 1885.) [D'après W. Kohlrausch.]

Berson. — *De l'influence de la température sur l'aimantation.* (Thèse pour le doctorat. Paris, Gauthier-Villars, 1886, et Ann. de chim. et de phys., 6e série, t. VIII, p. 433, 1886.)

Pionchon. — *Sur l'étude calorimétrique des métaux aux hautes températures.* (C. R., CII, p. 677, 22 mars 1886.)

H. Le Chatelier. — Bull. Soc. chim., t. XLV, p. 482, 9 avril 1886.

Pionchon. — *Étude calorimétrique du fer aux températures élevées.* (C. R., t. CII, p. 1454, 21 juin 1886.)

C. G. Knott. — *The Electrical Resistance of Nickel at High Temperatures.* (Trans. roy. Soc. Edinb., t. XXXIII, p. 187. Read 5th July 1886.)

F. Osmond. — *Sur les phénomènes qui se produisent pendant le chauffage et le refroidissement de l'acier fondu.* (C. R., t. CIII, pp. 743 et 1135, 26 oct. et 6 déc. 1886.)

Pionchon. — *Recherches calorimétriques sur les chaleurs spécifiques et les changements d'état aux températures élevées.* (C. R., t. CIII, p. 1122, 6 déc. 1886.)

W. F. Barrett. — *The physical Properties of Manganese Steel.* (Roy. Soc. Dublin, 15th Dec. 1886; d'après Journ. of the Iron and Steel Inst., 1887-2, p. 338.)

Pionchon. — *Recherches calorimétriques sur les chaleurs spécifiques et les changements d'état aux températures élevées.* (Thèse pour le doctorat. Paris, Gauthier-Villars, 1886, et Ann. de chim. et de phys., 6e série, t. XI, p. 33. 1887.)

F. Osmond. — *Rôle chimique du manganèse et de quelques autres corps dans les aciers.* (C. R., t. CIV, p. 985, 4 avril 1887.)

A. Nouel. — *Machine à étudier la dilatation des métaux.* (Génie civil, t. X, p. 405, 23 avril 1887.)

H. Tomlinson. — *Remarkable Effect on raising Iron when under Temporary Stress or Permanent Strain to a Bright-red Heat.* (Philos. Mag., 5e série, t. XXIV, p. 256. Read June 25, 1887.)

H. F. Newall. — *On Peculiarities observed in Iron and Steel at a Bright-red Heat.* (Philos. Mag., 5e série, t. XXIV, p. 435, nov. 1887.)

F. Osmond. — *Transformations du fer et du carbone dans les fers, les aciers et les fontes blanches.* (Mém. de l'Art. de la marine, t. XV, p. 573, 3e livr. de 1887.)

H. Tomlinson. — *The Effect produced on the Thermoelectrical Properties of Iron when under Stress or Strain by raising the Temperature to Bright-red.* (Philos. Mag., 5e série, t. XXV, p. 45. Read Nov. 26, 1887.)

— *The Recalescence of Iron.* (Philos. Mag., 5e série, t. XXV, p. 103. Read Dec. 10, 1887.)

Ledeboer. — *De l'influence de la température sur l'aimantation.* (C. R., t. CVI, p. 129, 9 janv. 1888, et Lumière électrique, t. XXVII, p. 61, 14 janv. 1888.)

W. Kohlrausch. — *Ueber einen Zusammenhang zwischen Magnetisirbarkeit und electrischem Leitungsvermögen bei den verschiedenen Eisensorten und Nickel.* (Wied. Ann., Neue Folge, t. XXXIII, p. 42, janv. 1888.)

H. F. Newall. — *On the Recalescence of Steel.* (Philos. Mag., 5e série, t. XXV, p. 510. Read Jan. 29, 1888.)

H. Tomlinson. — *The Temperature at which Nickel begins to lose its Magnetic Properties.* (Philos. Mag., 5e série, t. XXV, p. 372. Read February 25, 1888.)

— *A Theory concerning the sudden Loss of the Magnetic Properties of Iron and Nickel at certain Temperatures.* (Philos. Mag., 5e série, t. XXVI, p. 18, July 1888.)

II

ÉTUDE CALORIMÉTRIQUE DE L'ÉCROUISSAGE DANS UN ESSAI D'ACIER PAR TRACTION.

Il a été établi ou confirmé par l'étude précédente que le fer subit, à certaines températures critiques, au moins une modification moléculaire et que l'état β peut persister plus ou moins complètement après refroidissement rapide ou même, si la composition chimique du métal le permet, après refroidissement lent.

Nous avons admis d'autre part, dans la théorie cellulaire, que le même état moléculaire β, qui se produit spontanément au rouge, pouvait être également déterminé par le travail à froid suivi d'une déformation permanente.

Cette opinion, fondée sur le parallélisme entre les effets

de la trempe et ceux de l'écrouissage, et proposée également par plusieurs savants autorisés (*), deviendrait une certitude s'il était possible de saisir pendant l'écrouissage, comme nous l'avons fait pendant le chauffage, l'absorption de chaleur caractéristique de la transformation moléculaire.

Cela nous a conduit à mesurer les quantités de chaleur dégagées par une barrette d'acier soumise à des charges progressivement croissantes jusqu'à rupture.

Disons tout de suite que l'expérience a été négative au point de vue qui nous occupait.

Comme cependant une expérience n'est jamais inutile, nous allons donner les résultats de celle-ci.

L'éprouvette A, en acier doux Martin, est représentée (*fig.* 5, Pl. III). La partie faible, de 12 millimètres de diamètre, est immergée dans un calorimètre à eau B, en tôle mince enveloppée d'ouate; les deux extrémités filetées se vissent dans les pièces C (dont une seule est représentée). Le tout est monté sur une machine verticale à essayer les métaux à la traction.

L'épreuve a été faite avec le gracieux concours de MM. les ingénieurs Neel et Clermont, chef et sous-chef des essais de la Cᵉ P.-L.-M.

La température étant constante à moins de 0°,01 près, depuis une demi-heure, on a chargé progressivement et uniformément l'éprouvette en même temps qu'on suivait la marche du thermomètre calorimétrique.

Les résultats sont consignés dans le tableau ci-dessous et mis en courbe (*fig.* 6, Pl. III) sans aucune correction. Il est évideut, en effet, que la méthode ne permet pas de recueillir la totalité de la chaleur dégagée; une

(*) *Sur l'écrouissage et la variation de la limite élastique*, par Tresca; *C. R.*, t. XCIX, p. 351. La même idée est attribuée à M. Mangin, directeur des constructions navales, par MM. Denizeau et Lechien; *Mém. de l'art. de la marine*, 1884, p. 21.

fraction inconnue est transmise par conductibilité aux pièces de la machine et on ne saurait avoir la prétention de donner des chiffres absolus.

TEMPS	CHARGES totale	CHARGES par mill. carr. de section primitive	ÉLÉVATION de température au calorimètre	CALORIES recueillies par 100gr d'acier	OBSERVATIONS
minutes	kilog.	kilog.	°		
0	200	1,77	0,00	0,0	
1	400	3,54	0,00	0,0	*Dimensions de l'éprouvette.*
2	600	5,31	0,01	2,6	(Partie faible immergée dans le calorimètre).
3	800	7,08	0,02	5,1	
4	1.000	8,85	0,04	10,3	Longueur. 120mm
5	1.200	10,62	0,05	12,8	Diamètre 12mm
6	1.400	12,39	0,06	15,4	Section 113mm²
7	1.600	14,16	0,07	17,9	Poids 105gr,8
8	1.800	15,93	0,08	20,5	
9	2.000	17,70	0,09	23,1	*Résultats de l'essai à la traction.*
10	2.200	19,47	0,09	23,1	
11	2.400	21,24	0,10	25,6	Limite élastique, environ. . . 31kg,0
12	2.600	23,01	0,11	28,2	Charge de rupture 48kg,5
13	2.800	24,78	0,12	30,8	Allongement °/₀ sur 120mm. . 9,0
14	3.000	26,55	0,13	32,3	(Défaut au centre de la barrette).
15	3.200	28,32	0,14	35,9	
16	3.400	30,09	0,15	38,4	*Valeur en eau des constantes.*
18	3 600	31,86	0,17	43,6	gr
20	3.800	33,63	0,24	61,5	Eau. 235,0
21	4.000	35,40	0,25	64.1	Calorimètre et agitateur. { Fer, 197gr × 0,114. 22,5 / Laiton, 17 × 0,094. 1,6
22	4.200	37,17	0,27	69,0	Éprouvette, 105,8 × 0,114 . . 12,1
23	4.400	38,94	0,29	74,3	271,2
24	4.600	40,71	0,31	76,9	
Lectures interrompues.					
Rupture	5,480	48,50	»	»	
	Maximum. . . .		0,55	141,0	

On voit que la courbe ne révèle aucune absorption de chaleur. Il se produit au contraire un dégagement continu, avec un premier maximum à la limite élastique et un second maximum à la rupture : ce dernier était prévu.

L'allure générale de la courbe des calories est la même que celle de la courbe des allongements en fonction des charges; toutes deux présentent la même inflexion à la limite élastique; seulement, on sait que cette inflexion est caractéristique des fers et des aciers (les aciers durs exceptés), pour les courbes d'allongements; et l'on ne peut affirmer, à défaut d'expériences directes, qu'il en soit de même pour les courbes de calories.

Il est à peine besoin de dire que l'expérience ci-dessus ne prouve rien contre l'existence réelle d'un changement moléculaire du fer pendant l'écrouissage. Les calories recueillies sont la différence algébrique entre la quantité de chaleur dégagée par les frottements et les ruptures (partielles ou totale) et la quantité de chaleur absorbée par la modification moléculaire supposée. L'essai direct permet seulement d'affirmer que la première est constamment supérieure à la seconde pendant l'essai à la traction d'un acier doux.

La question reste donc en l'état.

Mais, s'il est admis que l'acier trempé doit ses caractères spéciaux à la présence de fer β, il nous paraît difficile de ne pas admettre également la formation du même fer β pendant l'écrouissage et d'expliquer autrement, puisque le travail à froid ne change pas l'état du carbone, les modifications similaires que la trempe et l'écrouissage apportent aux propriétés des aciers.

Assurément, certaines de ces modifications peuvent, comme nous l'avons dit ailleurs, recevoir une autre interprétation.

Mais l'accroissement de la force coercitive après écrouissage ne semble-t-il pas un phénomène bien caractéristique? L'inflexion que présentent les fers et les aciers, à l'exclusion du cuivre et de ses alliages industriels, dans les courbes de leurs allongements par rapport aux charges, ne montre-t-elle pas que les premiers se comportent, avant et après la limite élastique, comme deux métaux différents (*)?

Enfin, la présence dans les aciers écrouis d'un excédent de chaleur par rapport aux mêmes aciers recuits (**) nous paraît être un argument plus probant encore à l'appui de notre manière de voir; cet argument serait même tout à fait décisif, si l'on ne pouvait encore objecter à nos conclusions que nos échantillons ont été recuits dans l'hydrogène et que ce gaz a pu avoir une influence sur l'état du carbone.

III

SUR LES PHÉNOMÈNES QUI SE PRODUISENT PENDANT LE CHAUFFAGE ET LE REFROIDISSEMENT DES FONTES (***).

On sait que les fontes ne sont pas des corps homogènes. « C'est, disait Berzélius, un mélange de plusieurs combinaisons distinctes réunies par la fusion et qui se séparent pendant le refroidissement lent, chacune en suivant la pesanteur et la force d'agrégation qui lui est propre, se figeant et se cristallisant à des époques différentes. »

Les travaux des microscopistes modernes, M. Sorby (****), en Angleterre, et M. Martens (*****), en Allemagne, ont

(*) Comparer : *Effects of Stress and Magnetisation on the thermo-electric Quality of Iron*, par le Pr J.-A. Ewing; *Phil. trans. of the royal Soc.*, 1886, p. 361.

(**) *Théorie cellulaire*, p. 40 et suiv.

(***) Un résumé de cette partie a été présenté à l'Ac. des sciences, séance du 16 avril 1888.

(****) *On the microscopical Structure of Iron and Steel.* Journal of the Iron and Steel Institute, 1887-1, p. 255 et suiv.

(*****) *Zeits. des Ver. deuts. Ing.*, t. XXI, p. 11, 205 et 481 (1878).
Id. id. t. XXIV, p. 397 (1880).
Verhandl. des Ver. zur Beförderung des Gewerbfleisses (Sitzungsberichte), 1882, p. 233-242.

confirmé et précisé ces anciennes données. M. Sorby distingue dans les fontes six constituants différenciés par leur aspect et leur inégale résistance aux réactifs chimiques :

1° Le graphite; 2° le fer pur; 3° le constituant dit *nacré*, mélange de fer pur et de carbure de fer; 4° un composé extrêmement dur caractéristique des fontes blanches; 5° un résidu impur; 6° de petits cristaux couleur de rubis qui pourraient être du silicium.

Ces divers éléments sont d'ailleurs en proportions très irrégulières dans les différents échantillons; leur distribution et leur ordre même de cristallisation ne sont pas moins variables.

M. Martens, après avoir constaté, de son côté, l'hétérogénéité des fontes, tire de ses observations les conclusions suivantes, qui sont maintenant très généralement admises, et que nous résumons rapidement :

« La fonte est une dissolution dans le fer fondu de différents corps solides, liquides ou gazeux, qui peuvent être chimiquement combinés avec le fer ou mécaniquement dissous.

« La fonte liquide est donc analogue à une dissolution de plusieurs sels dans l'eau.

« Après la solidification, les éléments se séparent à l'intérieur de la masse; ils ont une tendance générale à s'isoler les uns des autres et à se réunir en groupements individualisés.

« On peut considérer cette séparation comme une sorte de cristallisation, à laquelle le premier branle est donné par la formation de la plus petite particule de l'un des éléments. Cette particule attire ses semblables et constitue, en croissant, les éléments de la structure qui apparaîtront ultérieurement à la surface des cassures du métal refroidi.

« Les arrangements se poursuivent après la solidification.

« La séparation des constituants demande un certain temps; un refroidissement rapide maintient relativement intacte la situation acquise à l'origine du refroidissement. »

Ces considérations nous paraissent très justes. Mais, s'il est établi que les fontes sont des mélanges fort complexes, on voit combien il reste à faire pour déterminer avec quelque certitude la nature exacte et les conditions de formation de la plupart de leurs constituants.

La méthode du refroidissement, que nous avons appliquée à l'étude des aciers dans la première partie de ce travail, semblait de nature à donner aussi sur les fontes des renseignemenis intéressants.

Nous avons donc examiné une série d'échantillons types, tels qu'on peut les trouver dans le commerce; et les résultats obtenus ont été, en réalité, si nombreux, et, pour la plupart, d'une interprétation actuellement si difficile, que nous sommes presque réduit à n'en donner qu'une sèche énumération.

L'installation des expériences a été exactement la même que pour les aciers.

Les résultats sont consignés dans une série de tableaux annexes et représentés en partie par des courbes (Pl. II et III).

Toutes les courbes sont construites en prenant pour abscisses les températures, et, pour ordonnées, les temps compris entre les passages de l'index sur deux divisions successives de l'échelle transparente.

Les essais consécutifs faits sur chaque échantillon portent des n^{os} d'ordre 1, 2, 3, etc.

Lorsqu'une nouvelle série d'expériences a été reprise sur une partie neuve du même échantillon, les numéros de cette série sont affectés de la mention *bis*, *ter*, etc.

Ci-dessous la liste et la composition chimique des matériaux étudiés.

Les analyses ont été faites sur les tiges mêmes qui ont été essayées.

NATURE.	FONTE d'hématite	FONTE de moulage	FONTE phosphoreuse	MÉTAL THOMAS au début du surcoufflage	FERRO-SILICIUM	SILICO-SPIEGEL	FERRO-MANGANÈSE à 20 p. 100	FERRO-MANGANÈSE à 50 p. 100
Forme de la baguette.	Carrée	Ronde	Carrée	Carrée	Carrée	Carrée	Carrée	Carrée
Dimensions	4mm	6mm,5	5mm	6mm	6mm,5	6mm,5	7mm	7mm
Carbone total	3,29	»	2,70	»	2,38	2,53	»	»
Carbone combiné. . .	1,04	»	1,20	C,10 (1)	»	»	4,80 (1)	5,00 (1)
Graphite.	2,25	»	1,50	0,00	»	»	»	»
Silicium	2,45	2,13	1,89	»	11,46	12,90	0,80	0,43
Soufre	0.06_1	$0,01_2$	0,03	»	»	»	»	»
Phosphore.	$0,05_4$	0,16	1,98	1,35	0,20	0,22	$0,09_8$	0,11
Manganèse	0,11	2,12	0,74	0,46	2,59	24,55	16,79 (2)	48,95 (2)
Fer (dosé).	»	»	»	»	»	»	77,51	45,51

(1) Dosé par la méthode Eggertz. — (2) Par différence.

Fonte d'hématite. — Échantillon de provenance anglaise fourni par MM. Favre et Cᵉ.

Cette fonte est très pure; elle peut être considérée comme ne renfermant que ses composants nécessaires: fer, carbone et silicium.

Les cinq premiers essais ont été faits dans l'air confiné, c'est-à-dire en isolant l'échantillon dans le tube de porcelaine par deux tampons d'amiante serrés. Dans ces conditions, l'atmosphère n'est que faiblement oxydante, et l'on peut admettre que la composition chimique ne se modifie pas d'une façon sensible. Après le cinquième essai, les tampons d'amiante ont été retirés de façon que l'air pût circuler librement dans le tube; l'affinage devient alors assez rapide; le silicium s'oxyde; nous voulions voir les conséquences de cette oxydation.

Le chauffage et le refroidissement ont présenté quatre

points singuliers, y compris le point de fusion et la récalescence $a_{1.2.3}$ que nous avons étudiée en détail à propos des aciers et que nous retrouvons naturellement dans les fontes grises. Restent deux points singuliers nouveaux que nous désignerons provisoirement par des numéros d'ordre (en chiffres romains).

Les résultats sont réunis dans le tableau ci-dessous, où les perturbations progressives sont représentées par l'intervalle de température dans lequel elles passent par leur maximum.

NUMÉROS des essais	REFROIDISSEMENTS				CHAUFFAGES			
	Solidification	Point critique II	Point critique I	$a_{r1.2.3}$	Fusion	Point critique II	Point critique I	$a_{r1.2.3}$
1	»	»	»	708	»	»	»	775-785
2	»	»	»	708	»	»	«	785-795
3	»	»	1088-1089	»	»	»	1110	
4	»	1125-1115	1089-1091	»	»	1155	1110	
5	»	1135-1125	1089	»	»	»	»	
6	»	1145-1135	1090	»	»	1135	1105	
7	»	1165-1155	1085	»	»	1135	1105	
8	1240 ?	?	1077	»	»	?	1105	

La récalescence se produit, pendant le refroidissement, à une température un peu plus élevée que dans les aciers les plus durs et les fontes blanches pures; mais la différence n'est pas très considérable. A ne considérer que cet essai, on pourrait dire que le silicium n'appartient pas à la classe des corps qui font tremper l'acier; au contraire, il se rapprocherait plutôt du chrome. Il serait cependant imprudent de tirer de l'étude des fontes des conclusions applicables aux aciers; nous verrons aussi plus loin qu'un grand excès de silicium, dans le ferro-silicium du commerce, produit un effet très différent de celui que nous venons de constater.

Les points critiques I et II semblent représenter la

fusion (ou, inversement, la solidification) de certains constituants de la fonte grise. On voit que, *dans les conditions des essais*, le point II_r tend à s'élever et le point I_r à s'abaisser progressivement. En même temps, la station I_r devient de plus en plus courte à mesure que la fonte s'affine. Au chauffage, l'importance relative de II_c par rapport à I_c va toujours en croissant.

Nous reviendrons avec plus de détails sur ces deux points critiques I et II, à propos de l'échantillon suivant, qui a été plus complètement étudié.

Nous donnons pour le point de fusion 1.240 degrés environ. Mais c'est là une approximation assez grossière. Tout ce qu'on peut dire, c'est que la fonte était à peu près complètement fondue après le huitième essai, qui s'est élevé un peu au-dessus de 1.240 degrés, et ne l'était pas après le septième, qui s'est arrêté vers 1.225 degrés. Le point de fusion n'est pas toujours facile à saisir dans nos essais; en effet, lorsque la fonte commence à fondre, les parties liquides viennent se surchauffer au contact du tube où elles forment un pied de bain; lorsque des fragments solides s'écroulent dans ce bain, la température s'abaisse brusquement; de là des oscillations rapides. En outre, les fils peuvent se déranger, si même la fonte liquide ne les coupe pas. Malgré ces difficultés, on reconnaît très bien encore le point de fusion pour les corps qui fondent d'un seul coup en absorbant une notable quantité de chaleur; mais tel n'est pas le cas de la fonte grise; sa fusion définitive n'est en réalité que celle de l'un de ses constituants et, probablement, du moins abondant d'entre eux; elle n'absorbe qu'une quantité de chaleur insignifiante et qui est de l'ordre des erreurs d'expérience : il est même très possible que cette fusion du constituant le plus réfractaire ne soit qu'une dissolution dans les parties antérieurement fondues, auquel cas les fontes grises n'auraient pas de point de fusion fixe.

Nous ne donnons donc le chiffre de 1.240 degrés que sous toutes réserves; c'est en réalité la température à laquelle commencent les oscillations du thermomètre, oscillations qui sont un indice certain de la fusion, mais qui peuvent être quelque peu postérieures.

Fonte de moulage. — Nous avons fait sur cette fonte trois séries d'essais : la première, en atmosphère oxydante, et les deux autres dans l'hydrogène. Dans la première série, les essais 1 à 5 inclusivement ont été faits dans l'air confiné, et les essais 6 à 8 dans l'air libre, absolument comme pour la fonte d'hématite.

	NUMÉROS des essais	REFROIDISSEMENTS				CHAUFFAGES			
		Solidification	Point critique II	Point critique I	$a_{r\,1.2.3}$	fusion	Point critique II	Point critique I	$a_{c\,1.2.3}$
dans l'air confiné.	1	»	»	»	660 et 620	»	»	»	735
	2	»	»	»	650 et 620	»	»	»	760 et 725
	3	»	»	1075-1083	»	»	»	1090-1100 et 1070-80	
	4	»	1110-1100	1069-1073	»	»	?	1090	
	5	»	1115-1105	1068	»	»	1135-1145	1080-1090	
dans l'air libre.	6	»	1125-1115	1070-1060	»	»	1125-1135	1080-1090	
	7	»	1125-1115	1066-1069	»	»	1135-1145	1080-1090	
	8	1230 ?	?	1060-1050	»	1230 ?	1155-1165	»	
Série *bis* dans l'hydrogène.	1	»	?	1088-1092	»	Non atteinte.	?	1090-1100	
	2	»	?	1085-1090	»		?	1100	
	3	»	?	1083-1089	»		?	1100	
	4	»	?	1082-1087	»		?	1100	
	6	»	1110-1100	1084-1089	»		?	1100	
	7	»	1110-1100	1087-1089	»		?	»	
	8	»	1120-1110	1089	»		?	1100-1110	
	9	»	1130-1120	1089	»		?	1110	
Série *ter* dans l'hydrogène.	1	?	?	1074-1076	»	?	?	1085-95 et 1115-25	
	2	?	?	1070-1072	»	?	?	1095-1105	
	3	?	1095-1085	1065-1067	»	?	?	1095-1105	
	4	?	1095-1085	1062-1066	»	?	?	1095-1105	
	5	?	1095-1085	1059-1064	»	?	?	1095-1105	

Après le cinquième essai, la fonte a été maintenue, pendant un quart d'heure, à 1125-1145.

La composition chimique de cette fonte est un peu plus complexe que celle de la fonte d'hématite ; la teneur en phosphore, tout en restant assez faible (0,16 p. 100), n'est plus négligeable ; la teneur en manganèse atteint 2,12 p. 100.

Malgré ces différences de composition, les résultats des chauffages et des refroidissements sont très analogues à ceux qu'avait fournis la fonte d'hématite. Le nombre des points singuliers est le même et leur position comparable. Toutefois, les modifications progressives d'amplitude en atmosphère oxydante sont ici plus limitées, ce qui peut être attribué aux dimensions plus fortes de l'échantillon.

Les résultats sont réunis dans les tableaux ci-dessus, avec les mêmes notations que pour la fonte d'hématite.

La récalescence $a_{r\,1.2.3}$ se produit à une température plus basse que pour la fonte d'hématite ; nous retrouvons là la même influence du manganèse qui a été déjà signalée à propos des aciers.

Les points critiques I et II, caractéristiques des fontes grises, et que M. H. Le Chatelier a également observés sur d'autres échantillons de fonte de moulage, à l'époque où nous travaillions dans son laboratoire, sont les plus curieux à étudier.

Le point I_e est souvent double pendant le premier chauffage, mais il devient toujours simple dès le second, et reste ensuite simple et d'allures très régulières.

Le point II_e est toujours assez peu distinct pendant le chauffage en atmosphère oxydante et semble disparaître complètement dans l'hydrogène, alors même qu'il est parfaitement net pendant le refroidissement subséquent ; le ralentissement correspondant se confond donc alors avec le ralentissement principal dû au point I.

Pendant le refroidissement, le point II_r n'est pas non plus distinct tant que le chauffage n'a pas été poussé

au delà de 1.140 degrés (série *bis*, essais 1 à 5) ; il commence à apparaître, mais peu net encore, si l'on a atteint 1.160 degrés (série *bis*, essais 6 à 9) ; mais il ne devient tout à fait net que si la fonte a été fondue et surtout fondue plusieurs fois de suite (série *ter*). La position de ce point II_r n'est pas très fixe.

Le point I_r est extrêmement saillant et correspond à un dégagement de chaleur considérable. Son amplitude et sa position restent constantes dans l'hydrogène, si la température initiale ne dépasse pas 1.160 degrés. Si on a poussé jusqu'à fusion, toujours dans l'hydrogène, son amplitude ne change pas, mais la température à laquelle il se produit tend à s'abaisser progressivement ; il semble que les deux phénomènes I et II, quels qu'ils soient, confondus d'abord, tendent à s'isoler de plus en plus à mesure qu'on répète les fusions et à prendre chacun sa forme et sa position définitives. En atmosphère oxydante, le point I_r diminue progressivement d'amplitude et sa température s'abaisse assez rapidement.

A propos de la fusion définitive de cette fonte, que nous indiquons vers 1.230 degrés dans l'air, nous ne pouvons que répéter ce que nous avons dit à propos de la fonte d'hématite. Ce point n'est défini que par le commencement des oscillations du thermomètre, la fusion finale ne donnant lieu qu'à un dégagement de chaleur insignifiant et inférieur aux erreurs d'expériences dans la région considérée.

En réalité, les principaux constituants de la fonte fondent aux points I et II, comme il est facile de le montrer : l'échantillon a été examiné après le cinquième essai de la série *bis*, c'est-à-dire après que la température n'avait pas dépassé 1.140 degrés dans l'hydrogène. Cet échantillon étant, comme on le sait, composé de deux baguettes ficelées ensemble, la baguette supérieure était intacte, mais la baguette inférieure avait commencé à se ramollir

et à se déformer. Après le neuvième essai de la même série, la température n'ayant pas dépassé 1.160 degrés, les deux baguettes étaient également très déformées ; il est certain que la fonte était devenue très molle, mais elle n'était pas fondue et n'adhérait pas aux fils de fer qui ficelaient le paquet. Enfin, après la série *ter*, pendant laquelle la température maxima avait été de 1.200 degrés, la fonte était complètement fondue et avait mouillé les fils de fer. Malgré cela, les refroidissements de cette série n'accusent aucun dégagement de chaleur bien net que l'on puisse attribuer à la solidification. La fusion définitive semble donc n'être, comme nous l'avons déjà dit, qu'une dissolution progressive du constituant le plus réfractaire dans les constituants antérieurement fondus; ou bien nous n'avons affaire, dans la série *ter*, qu'à une fusion apparente, c'est-à-dire à un tassement d'une matière pâteuse; ou bien, enfin, le point de fusion définitif est plus bas dans l'hydrogène que dans l'air, ce qui n'a rien non plus d'impossible. M. H. Le Chatelier a trouvé le même fait pour l'argent dont l'oxygène élève le point de fusion ; et, sans même sortir de la métallurgie du fer, n'a-t-on pas annoncé récemment que l'addition d'une faible quantité d'aluminium abaissait beaucoup le point de fusion de ce métal; or, nous croyons, complètement d'accord avec M. Ledebur (*), que le rôle de l'aluminium n'est autre en ceci que de détruire l'oxyde de fer dissous : la présence d'oxyde élèverait donc le point de fusion du fer.

Après avoir décrit les points critiques observés pendant le chauffage et le refroidissement de la fonte grise et étudié leurs changements d'allures dans certaines circonstances déterminées, il nous resterait à donner la cause des points I et II. Malheureusement, la question

(*) *Stahl und Eisen*, VIII, p. 85 (février 1888).

est complexe, et nous avons le regret de ne pas en apporter encore la solution.

L'expérience suivante fournira toutefois une nouvelle donnée.

Nous avons chauffé au four Leclerq et Forquignon à la température uniforme de 1.155 degrés, six bâtonnets de notre même fonte de moulage entourés de graphite pour éviter l'oxydation. Puis on a éteint le feu et trempé successivement les bâtonnets dans l'eau froide à des températures déterminées. Le graphite a été dosé dans chaque essai.

NUMÉRO de l'essai	TEMPÉRATURE de trempe	ASPECT ET QUALITÉ DE LA FONTE	TENEUR en graphite p. 100
1	1.120	Blanche rayonnante; très fragile.	0,18
2	1.075	Intérieur gris à grain mi-fin; liseré blanc	2,02
3	1.000	à la surface; résistante et dure; casse	1,96
4	900	sans plier; ne se mate pas	2,06
5	750	Grise à grain très serré; dure; ne se mate pas.	2,64
6	610	Grise à grain mi-fin; très malléable	2,65

On voit que les deux premières trempes ont été faites, l'une un peu avant le point critique I_r, l'autre immédiatement après. Dans l'intervalle, le graphite est passé de la teneur 0,18 à la teneur 2,02 qui ne s'accroîtra plus guère pendant le refroidissement ultérieur; l'apparition du graphite est donc brusque : elle ne se fait que dans la fonte solide et coïncide avec le point I_r (du moins pour l'échantillon considéré).

En tenant compte de tous les faits exposés, nous sommes porté à en proposer l'interprétation suivante :

La fonte grise liquide est une dissolution de siliciure de fer et de carbone dans le fer.

Si on l'abandonne au refroidissement lent, il se dépose successivement :

1° A une température mal déterminée et d'une façon peut-être progressive, du fer, soit pur, soit faiblement carburé;

2° Au point II_r, un siliciure défini de fer Fe^4Si;

3° Au point I_r, de la fonte blanche, c'est-à-dire une solution sursaturée de carbone dans le fer dont le carbone se sépare au même moment sous forme de graphite.

Ceci dans le cas d'une faible teneur en phosphore.

Cette explication, d'ailleurs provisoire, et à laquelle nous n'attachons qu'une médiocre importance, est la seule qui nous paraisse actuellement rendre compte, d'une façon à peu près satisfaisante, des faits d'observation.

Nous avons été conduit à l'*hypothèse* du siliciure défini Fe^4Si par cette remarque que le ferro-silicium du commerce se rapproche souvent de cette formule. D'ailleurs, ce ferro-silicium se solidifie, comme nous le verrons plus loin, à 1.130 degrés, température qui concorde bien avec la position du point II_r, étant donné que la présence de quantités variables de phosphore ou de manganèse peut déplacer notablement les points de fusion.

La portion de la fonte demeurée liquide après la solidification du siliciure serait une dissolution sursaturée de carbone dans le fer; si on trempe avant I_r, la fonte reste blanche, comme le montre l'expérience. Si, au contraire, le refroidissement est lent, cette dissolution se solidifie à son tour en I_r dont la température coïncide bien avec celle de la solidification de la fonte blanche. Mais le carbone en excès, ne pouvant rester dissous après solidification, se précipite sous forme de graphite, et la transformation plus ou moins complète en graphite du carbone qui pourrait rester dissous s'effectue et se poursuit par entraînement.

L'abaissement progressif de I_r, lorsque la fonte est refondue plusieurs fois de suite, s'expliquerait par une liquation de plus en plus parfaite des deux constituants.

Le rôle du silicium dans les fontes grises serait alors, non pas de déplacer le carbone, comme on l'a souvent cru jusqu'à présent (opinion que nous avons partagée), mais de le concentrer dans une quantité de fer insuffisante pour le garder dissous à l'état solide.

Le manganèse, en augmentant la solubilité du carbone, annulerait ou diminuerait l'action du silicium.

Quelle que soit la valeur, très contestable, nous le répétons, de cette interprétation, l'existence des points critiques I et II reste établie et appellera de nouvelles recherches, intéressantes pour la fonderie.

C'est évidemment à ces points critiques qu'il faudra rattacher certaines particularités encore très obscures qui ont été signalées dans l'étude des fontes grises.

C'est ainsi que, d'après M. Wrightson (*), la fonte liquide se dilaterait, pendant et après la solidification, jusqu'à un certain maximum, pour se contracter ensuite. Ce fait, d'ailleurs contesté, paraît cependant très vraisemblable si l'on songe que le point I_r donne lieu fréquemment, non seulement à un arrêt du refroidissement, mais encore à une élévation de température tout à fait analogue à la récalescence de Barrett pour les aciers.

Fonte phosphoreuse, truitée. (Type des fontes de la Moselle.) — Tous les essais ont été faits dans l'air confiné.

Le chauffage et le refroidissement présentent quatre points singuliers, non compris le point de fusion que nous n'avons pu déterminer, même approximativement,

(*) *On some physical changes occurring in Iron and Steel at high temperatures.* Journal of the Iron and Steel Inst., 1879, p. 418 et suiv., et 1880, p. 11 et suiv.

comme celui des fontes pures, la fonte phosphoreuse attaquant et coupant les fils du couple à une température inférieure.

Ci-dessous le tableau des résultats :

N°s des ESSAIS	REFROIDISSEMENTS				CHAUFFAGES		
	Point critique III	Point critique II	Point critique I	$a_{r1.2.3}$	Points critiques III - II	Point critique I	$a_{c1.2.3}$
1	»	»	»	700-695	»	»	815-825
2	»	»	900	698	»	917	785-795
3	»	1.030	894	698	1.040-1.050	910	»
4	1.070-1.060	1.018	891	»	1.042	900-910	»

Les points critiques II et III correspondent respectivement aux points I et II des fontes pures et nous n'avons rien de nouveau à en dire, sinon que ces points sont tous deux abaissés par la présence du phosphore et que les points II et III, distincts au refroidissement, se confondent au chauffage en un seul point de position intermédiaire; mais ce dernier fait peut aussi se produire pour les fontes pures.

Le phénomène qui correspond à la récalescence des aciers ne mérite pas non plus de mention spéciale; sa position est sensiblement normale, c'est-à-dire la même que pour une fonte blanche pure : le phosphore n'a pas eu d'influence.

Mais, en dehors de ces points critiques communs à d'autres échantillons, la fonte phosphoreuse en présente un, le point I, qui lui est spécial et apparaît vers 900 degrés.

La cause de cette perturbation est connue, grâce à une curieuse expérience de M. Lencauchez (*).

*) *Mém. de la Soc. des Ing. civils*, mai 1887.

M. Lencauchez a chauffé 100 kilogrammes environ de fonte de Longwy, en morceaux de $0^{kg},500$ à 1 kilogramme, au rouge vif (fusion de l'argent) dans un mélange de gaz réducteurs dont la composition à l'entrée était la suivante :

H.	63,18
CO	5,54
CO^2.	22,22
Az	9,06

Après cent heures de recuit, les morceaux de fonte avaient conservé leur forme primitive, mais ils avaient sué une multitude de petits grains sphériques, depuis la grosseur du plomb de chasse n°s 8 à 10 jusqu'à celle des chevrotines, et une partie de ces grains s'était réunie en coulée dans le fond de la cornue en fonte sans y adhérer.

M. Lencauchez a bien voulu nous donner un échantillon de ces exsudations dont voici plusieurs analyses :

	Petits grains sphériques.		Gros grains informes.	
	1er échant.	2e échant.	1er échant.	2e échant.
C. dissous, p. 100. . .	1,24	»	0,90	»
Graphite, — . . .	0,75	trace	1,50	1,50
Silicium, — . . .	0,82	0,63	1,41	2,17
Phosphore, — . . .	5,45	6,00	4,48	4,40

La fonte chargée contenait environ 3,50 de carbone total, 2,60 de silicium et 1,90 de phosphore p. 100.

La composition des exsudations est celle d'une fonte appauvrie en carbone et en silicium, mais considérablement enrichie en phosphore. Le point critique I est évidemment dû à la fusion (ou à la solidification) de cette fonte qui semble former un constituant indépendant dans le mélange complexe dont est formée la fonte essayée.

Il est cependant douteux que les gouttelettes recueillies soient le constituant même qui fond à 900 degrés; la

fixité (approximative) du point de fusion semble indiquer un composé défini qui peut d'ailleurs, une fois fondu, dissoudre une partie des constituants mélangés.

A la température maxima de 1.100 degrés qui a été atteinte dans ces essais, la fonte essayée était très déformée et avait été, par conséquent, très ramollie; mais on reconnaissait encore les bâtonnets; il n'y avait pas eu fusion proprement dite.

Métal Thomas au début du sursoufflage. — Notre but, en examinant ce métal, était de comparer à la fonte précédente un produit ayant à peu près la même teneur en phosphore, mais dépourvu de carbone et de silicium.

Les résultats (Tabl. IX) ont été absolument différents.

Entre 1.350 degrés, température à laquelle la fusion n'était pas atteinte, et 530 degrés, on n'observe qu'un seul (*) ralentissement très peu accentué dont le maximum a lieu vers 680 degrés et qui correspond probablement à la modification moléculaire du fer.

Il résulte de cet essai que le point critique I de la fonte phosphoreuse n'est pas dû au phosphore seul, mais à la présence simultanée du phosphore et du carbone; ce qui nous ramène à cette conclusion, déjà tirée antérieurement d'expériences tout à fait différentes, que le phosphore peut exister, exclusivement ou simultanément, sous les deux formes différentes de phosphure et de phospho-carbure dans les produits de la sidérurgie. D'ailleurs, par ces termes de phosphure et de phospho-carbure, nous n'entendons pas dire qu'il s'agisse de composés définis plutôt que de dissolutions : nous ne sommes nullement fixé à cet égard.

(*) Nous avons bien encore observé, dans le 9e refroidissement, un ralentissement entre 970 degrés et 940 degrés; mais comme ce ralentissement ne s'était pas produit dans les autres refroidissements, nous pensons qu'il n'appartient pas au métal et nous lui attribuons la cause suivante : le tube s'étant fêlé au cours des essais et le 9e chauffage jusqu'à 1.350 degrés ayant été pénible, le métal a été longtemps exposé, pendant ce 9e chauffage, à une atmosphère très oxydante; d'où la formation, aux dépens du métal et du tube en porcelaine, d'une scorie assez abondante et dont la solidification a pu donner lieu au ralentissement anormal du 9e refroidissement.

On remarquera combien le refroidissement du métal Thomas à 1,35 de phosphore diffère de celui du fer de Closmortier à 0,38, antérieurement étudié. Les deux ralentissements classiques a_{r3} et a_{r2}, dus au changement moléculaire du fer, ne sont plus représentés que par une seule perturbation non équivalente vers 680 degrés. Il est vrai que, sur le percentage de 0,38 de phosphore que contient le fer en question, une fraction indéterminée et peut-être importante est sous la forme inactive de phosphate de fer dans la scorie interposée. Il n'en résulte pas moins que l'action du phosphore sur les transformations du fer demanderait à être étudiée sur une série d'échantillons de composition convenable et graduellement modifiée.

Ferro-silicium (Tableau IV et Pl. II). — Le chauffage et le refroidissement de ce produit sont très réguliers. On n'y aperçoit d'autre anomalie qu'un ralentissement très peu marqué entre 530 et 520 degrés et qui correspond probablement à la récalescence des aciers; le phénomène manque de netteté parce que la teneur du ferro-silicium en carbone combiné est très faible.

La solidification se produit vers 1.130 degrés et la fusion vers 1.110 degrés, en une seule fois; elles sont, par conséquent, très faciles à déterminer. Il est à remarquer que la température de la fusion est un peu plus basse que celle de la solidification. Ordinairement, le thermomètre, qui donne la température moyenne des points où les fils quittent le métal, fournit des chiffres un peu forts pendant

le chauffage et un peu faibles pendant le refroidissement, d'où il résulte que, si la fusion et la solidification se font, ce qui est la règle, à la même température, le pyromètre indique le point de solidification un peu au-dessous du point de fusion, le point commun étant approximativement la moyenne entre les deux indications. Pour le ferro-silicium, l'écart entre les deux chiffres est inverse de ce qu'il devrait être; c'est là une anomalie qui permet de supposer que la fusion se complique de quelque phénomène étranger.

Ferro-manganèse à 80 *p.* 100 (Tableau VIII et Pl. III). — Nous savons déjà que les ferro-manganèses ne présentent aucun phénomène qui corresponde à la récalescence des aciers. Nous n'avons à les examiner ici qu'au-dessus de 900 degrés.

Entre cette température et la fusion, le ferro-manganèse à 80 p. 100 montre trois points singuliers dont ci-dessous le tableau :

NUMÉROS des essais	REFROIDISSEMENTS				CHAUFFAGES			
	Solidification	Point critique III	Point critique II	Point critique I	Fusion	Point critique III	Point critique II	Point critique I
1	»	?	1.100-1.090	975	»	?	?	995
2	»	1.160	1.090	975	1.210	?	?	
3	1.210	1.150	1.090-1.080	975				

Le point I seul est net, soit au refroidissement soit au chauffage.

Le point II se reproduit régulièrement à chaque refroidissement, mais il dépasse à peine les erreurs d'expérience. On ne l'aperçoit plus du tout pendant le chauffage. Les courbes de chauffage, en effet, se prêtent moins bien que les courbes de refroidissement à la recherche

des faibles perturbations, parce que la pression du vent à la soufflerie n'est jamais parfaitement régulière.

Le point III n'est pas constant, il paraît s'accentuer progressivement dans les essais successifs.

Le point de fusion est assez net.

Ferro-manganèse à 50 *p.* 100 (Tableau VII et Pl. III). — On a fait deux séries d'essais sur deux baguettes du même lot et ces deux séries ne concordent pas absolument entre elles; la composition chimique des deux baguettes était probablement quelque peu différente. La position des points singuliers reste cependant la même; c'est leur amplitude qui diffère.

Le nombre des points critiques est encore de 3, non compris le point de fusion; mais le point I est très peu accentué et ne se voit même plus du tout sur les courbes de chauffage :

NUMÉROS des essais	REFROIDISSEMENTS				CHAUFFAGES			
	Solidification	Point critique III	Point critique II	Point critique I	Fusion	Point critique III	Point critique II	Point critique I
2	»	1.110-1.100	1.030-1.020	920 ?	»	1.100-1.110	1.030-1.040	?
3	»	1.100	1.030-1.020	920 ?	»	1.105-1.115	1.040-1.050	?
4	»	1.110-1.100	1.030	910-900	»	1.130	1 050	?
1 *bis*	»	»	1.025-1.015	910-900	»	1.110-1.120	1.030-1.040	?
2 *bis*	1.145	»	»	»	»	1.110	1.030-1.040	?
3 *bis*	»	1.110-1.100	1.030-1.020	910	»	1.110	1.025	?

Ferro-manganèse à 20 *p.* 100 (Tableau VI et Pl. III). — Ce métal ne présente plus qu'un seul point critique, très voisin de la fusion et donnant lieu à un dégagement (ou à une absorption) de chaleur à peu près égal :

NUMÉROS des essais	REFROIDISSEMENTS		CHAUFFAGES	
	Solidification	Point critique	Fusion	Point critique
1	»	1.040-1.030	1.090-1.100	1.050-1.060
2	»	1.052	1.088	1.050-1.060
3	1.083	1.051	1.088	1.050
1 *bis*	»	1.060-1.063	1.080	1.050

Si, comme il paraît résulter des travaux de MM. Troost et Hautefeuille, le ferro-manganèse qui contient le fer et le manganèse en proportions égales est un composé défini, on pourrait considérer le ferro-manganèse à 20 p. 100 comme un mélange de ce composé fondant vers 1050 degrés et de fonte blanche ordinaire non manganésée fondant vers 1085 degrés.

Silico-Spiegel (Tableau V et Pl. III). — Ci-dessous le tableau résumant les essais :

NUMÉROS des essais	REFROIDISSEMENTS				CHAUFFAGES				
	Solidification	Points critiques IV-III	Point critique II	Point critique I	Fusion	Point critique IV	Point critique III	Point critique II	Point critique I
1	»	1.055-1.045	985-975	950-940	»	»	1.030-40	1.015-25	955-965
2	»	1.055-1.045	985-975	950-940	»	»	1.040-50	1.015-25	945-955
3	»	»	»	»	1.220?	1.110-1.120	1.045-55	1.015-25	»

On voit qu'il se produit pendant le chauffage et le refroidissement de cet alliage des phénomènes extrêmement complexes.

Cette étude sur les fontes ne peut être considérée que comme un premier inventaire de faits ; mais l'interprétation de ces faits est actuellement à peu près impossible pour les produits les plus compliqués et douteuse dans le cas le plus simple de la fonte grise pure. Cependant, la méthode d'investigation que nous avons suivie est loin

d'être épuisée ; il faudrait maintenant examiner des séries continues à une seule variable, par exemple des fontes pures de manganèse et de phosphore où le silicium augmenterait progressivement, etc... Si quelqu'un de nos lecteurs peut nous procurer de pareilles séries, nous les examinerons avec intérêt : la solution des questions soulevées n'a pas seulement une importance théorique.

IV

RECHERCHES SUR LE POINT *b* DE TCHERNOFF.

Définition du point b. — Le point *b*, d'après la traduction qu'a donnée du célèbre mémoire de Tchernoff la *Revue universelle des mines et de la métallurgie* (*), est « une température telle que l'acier chauffé au-dessous de *b* ne change pas de structure, qu'il soit refroidi brusquement ou lentement. »

Si cette traduction est exacte et qu'on la prenne au pied de la lettre, on comprend difficilement ce qui distingue le point *b* du point *a*. En effet, un acier chauffé, si peu que ce soit, au-dessus de *a*, prendra la trempe, par définition, si on le refroidit brusquement et n'aura plus alors la même structure que s'il eût été refroidi lentement.

Ailleurs, pour régénérer l'acier brûlé (l'acier qui a été chauffé a une température assez élevée pour prendre la structure cristalline), Tchernoff propose de le laisser refroidir complètement, puis de le réchauffer un peu au-dessus du point *b* pour lui rendre sa texture amorphe ; c'est là encore un caractère du point *a*, ou, plus exactement, du plus élevé des points a_c, si le point *a* est multiple (**).

(*) 2e série, t. VII, p. 396 (2e sem. de 1877).
(**) Comp. Brinell, *loc. cit.*

Cependant Tchernoff dit expressément que la température b, d'ailleurs variable avec la dureté des aciers, est supérieure à la température a; elle atteint le rouge vif pour l'acier à canons qui est de moyenne dureté et le blanc pour le fer doux (*).

Si cette dictinction est réelle, il faut que le point b ait des propriétés personnelles qui ne puissent pas se confondre avec celles du point a. En fait, ces propriétés existent et Tchernoff nous les indique en disant :

« Au-dessus de b, l'acier devient d'autant plus mou et ses particules ont d'autant plus de facilités pour se grouper en cristaux (si le repos de la masse n'est pas troublé par des moyens extérieurs), qu'il a été chauffé davantage; en outre, ses particules mettent d'autant plus de temps pour se grouper que la température à laquelle elles sont soumises avant de descendre à b est plus basse. Aux températures inférieures à b, la structure de la masse ne s'altère pas.

« La propriété de l'acier de devenir grenu peut se représenter graphiquement comme suit : sur notre échelle des températures (Pl. III, *fig.* 7), nous élevons une courbe à partir de b et les ordonnées y, y', y'' de cette courbe représentent le degré de développement des grains pour les températures correspondantes x, x', x'', les conditions de refroidissement à partir des diverses températures x, x', x'' jusqu'à b restant nécessairement identiques. A une certaine température X inférieure au point de fusion, Y devient infini et la courbe asymptotique. »

C'est, croyons-nous, dans ces dernières explications qu'il faut prendre la définition du point b.

Si nous avons pu relever dans le texte de Tchernoff, entre les propriétés du point b et celles du point a, une

(*) Comp. *Dict.* de Würtz, supplément, article *Fer* (*Métallurgie du*), par M. Deshayes.

certaine confusion qui s'accentue encore chez les commentateurs, cette confusion s'explique fort aisément :

1° Par les relations naturelles qui existent réellement, comme nous le verrons plus tard, entre les points a et b;

2° Par la segmentation, pour certains aciers, du point multiple a en points simples a_1, a_2, a_3;

3° Par le fait que les points a_1, a_2, a_3 n'occupent pas, sur l'échelle des températures, la même position pendant le chauffage et pendant le refroidissement;

4° Par cet autre fait que les points a ne sont pas toujours des points mathématiques et peuvent correspondre à des phénomènes progressifs entre des limites de température assez éloignées.

Maintenant que les points a ont été définis dans la première partie, nous pouvons leur restituer ce qui leur appartient, et il nous restera, pour le point b, la définition suivante, restreinte, mais précisée et ne convenant plus qu'à ce point :

Le point b *d'un acier est une température telle que l'acier, quel que soit son état initial,*

s'il est chauffé au-dessus de a *et au-dessous de* b *et refroidi lentement, reste ou devient à grain fin, quelle que soit la lenteur du refroidissement.*	*s'il est chauffé au-dessus de* b, *prend, quelle que soit la vitesse du refroidissement, un grain d'autant plus gros que la température a été portée plus au-dessus de* b.

Telle est la signification que nous paraît prendre le point b, quand on interprète le mémoire de Tchernoff à la faveur des travaux récents.

Mais cette définition, qui n'est autre chose que l'expression d'un fait connu, n'apprend rien sur la position exacte du point b, ni sur les causes ou les lois du changement de grain.

C'est dans l'espoir de préciser un peu les connais-

sances acquises sur une question théoriquement et pratiquement importante que nous avons entrepris quelques expériences nouvelles.

Expériences. — Le programme en est d'une extrême simplicité : nous avons chauffé des aciers d'une composition connue à une température mesurée, abandonné les échantillons au refroidissement dans des conditions déterminées et examiné les modifications survenues dans la texture par la méthode des attaques sur section polie.

Les échantillons choisis ont été les suivants :

	Acier		
	Martin extra-doux.	Martin mi-dur.	au creuset dur.
Carbone.	0,14	0,45	1,24
Silicium.	0,045	0,07	0,35
Soufre.	0,018	0,016	0,012
Phosphore	0,01	0,036	0,017
Manganèse	0,19	0,35	fortes traces.

Ces échantillons ont été forgés en ronds de 13 millimètres de diamètre et le forgeage a été terminé, autant que possible, un peu au-dessus de a_r, de façon à fournir un grain très fin sans écrouissage.

Chaque barre a été découpée en rondelles de 7 millimètres d'épaisseur.

Pour le chauffage, on s'est servi du four Leclerq et Forquignon traversé par un tube de porcelaine de 23 millimètres de diamètre extérieur.

4 rondelles, une de chaque acier type et la quatrième (au centre de laquelle était serré le couple thermo-électrique) en acier extra-doux, étaient placées très près l'une de l'autre au centre du four, entre deux tampons d'amiante serré.

La température était élevée graduellement jusqu'au maximum que l'on s'était proposé d'atteindre ; ces chauffages ont demandé de 25 à 35 minutes ; il faut, en effet, pour ne pas casser le tube, pousser le feu avec précautions, surtout au voisinage du rouge naissant.

Le maximum atteint, on éteignait simplement le feu en fermant ensemble les deux robinets de gaz et de vent et on abandonnait le four à lui-même jusqu'à refroidissement au-dessous de 100 degrés.

On a fait deux séries d'essais, identiques d'ailleurs, l'une dans l'hydrogène pur (incomplètement desséché), l'autre dans l'air isolé entre les deux tampons d'amiante, c'est-à-dire en atmosphère légèrement oxydante.

Les chauffages ont été respectivement arrêtés aux températures de :

700, 750, 800, 860, 920, 1015, 1115, 1225, 1330, 1390.

En outre, trois rondelles ont été maintenues pendant deux heures dans l'hydrogène entre 1.105 et 1.125 degrés et trois autres soumises, dans l'intervalle d'une heure, à quarante chauffages et refroidissements alternatifs entre 1.130 et 1.060 degrés.

Les températures indiquées sont, en réalité, celles de la face extérieure de l'une des rondelles extrêmes et doivent être, par conséquent, un peu inférieures aux températures réellement atteintes.

Toutes les rondelles chauffées dans l'hydrogène avaient été polies sur une face, avant chauffage, au papier d'émeri le plus fin.

Rôle de l'atmosphère. — Nous avions eu l'occasion de remarquer, il y a quelques années, qu'un barreau *tourné* d'acier mi-dur, recuit dans l'hydrogène à une température de 1.000 degrés environ, avait pris une peau grenue et *chagrinée*. Nous pensions, bien que la température atteinte parût insuffisante, avoir brûlé ce barreau, et nous espérions, en commençant ces nouveaux essais, que la transformation dans l'hydrogène de la surface po-

lie et plane des rondelles en surface rugueuse nous donnerait des indications sur le point *b* de chaque échantillon.

En réalité, le phénomène attendu ne se produisit en aucune façon; toutes les surfaces primitivement planes restèrent planes après chauffage : d'où l'on peut conclure que, dans l'ancienne expérience citée, nous avions transformé, non pas un acier à grain fin en acier brûlé, mais, au contraire, un acier quelque peu brûlé en acier à grain fin; la rugosité de la peau était due au rapprochement des grains primitivement déchaussés et au retour d'un métal peu homogène vers une homogénéité relative.

Une autre conséquence, plus générale et plus importante, résulte de la persistance après chauffage d'une section plane initiale : c'est que la transformation du grain ne met en jeu, *du moins pour les molécules de fer*, que des phénomènes d'orientation, sans translation à de notables distances dans l'intérieur de la masse.

Cependant, la transformation du grain s'accuse sur les faces polies par l'apparition de figures planes caractéristiques, à partir d'une certaine température qui a été à peu près la même pour les trois aciers considérés.

Les rondelles chauffées à 1.115 degrés montrent au microscope, sur la face polie *non attaquée*, un réseau vaguement polygonal formé de points brillants grossièrement alignés sur une petite longueur et de tronçons interrompus de lignes brillantes. Le réseau prend une grande netteté sur les rondelles chauffées à 1.225 degrés et au-dessus; les côtés des polygones deviennent franchement continus et sensiblement rectilignes.

En même temps que le réseau polygonal se forme, on voit les surfaces polies acquérir un aspect moiré, déjà très sensible, pour les aciers dur et mi-dur, sur les rondelles chauffées à 1.115 degrés. Si l'on passe aux rondelles chauffées à 1.225 degrés, le moiré apparait

sur l'acier extra-doux, se développe sur l'acier mi-dur et acquiert, sur l'acier dur, un complet et très beau développement; chaque polygone est alors caractérisé par l'orientation de ses molécules et prend un éclat différent suivant l'incidence de la lumière par rapport à cette orientation. Enfin, les rondelles chauffées à 1.330 degrés ne diffèrent pas notablement des précédentes, sauf pour l'acier dur : ce dernier métal s'est approché de sa température de fusion; les polygones, toujours aussi nettement délimités, ont perdu leur aspect moiré pour prendre un beau poli uniforme; on dirait une mosaïque de miroirs.

Il ne faut pas oublier que le chauffage dans l'hydrogène peut modifier superficiellement la composition chimique du métal. Si, au lieu d'examiner une face primitive, on attaque par l'acide azotique une section polie plus profonde, l'action de l'hydrogène s'accuse à la périphérie par un liseré clair et brillant, comme si la surface du métal avait été décarburée; ce liseré est très étroit sur les rondelles qui n'ont pas été maintenues pendant longtemps aux températures élevées; mais il atteint 1 à 2 millimètres au bout d'une heure de chauffage entre 1.130 et 1.060 degrés et pénètre jusqu'au cœur des rondelles après deux heures de chauffage entre 1.105 et 1.125 degrés. Cette action de l'hydrogène n'est pas un fait nouveau : on connaît les expériences de M. Forquignon et les essais d'application industrielle qui en ont été la suite; nous avons constaté nous-même que la décarburation par l'hydrogène était d'autant plus rapide que la température était plus élevée. Mais le phénomène est vraisemblablement complexe; on sait que la teneur en carbone, indiquée par la méthode colorimétrique d'Eggertz, diminue, après chauffage dans l'hydrogène, beaucoup plus vite que la teneur réelle (*). Le départ du

(*) *Théorie cellulaire*, p. 24 à 26.

carbone est donc précédé d'une modification encore mal connue et qu'il serait très intéressant d'étudier à fond.

La conséquence pratique de ces observations est qu'il faut laisser de côté, pour le moment, les rondelles qui ont fait dans l'hydrogène un séjour prolongé. Quant aux rondelles qui ont été simplement chauffées dans ce gaz et abandonnées au refroidissement dès que la température maxima était atteinte, il conviendra d'enlever leur surface à la lime et d'aller chercher leur véritable structure sur une section plus profonde.

Si on en fait autant pour les échantillons chauffés en atmosphère oxydante dont la peau est toujours un peu décarburée et que l'on compare, après l'attaque de la section polie par l'acide azotique, les rondelles du même métal ayant subi le même traitement respectivement dans l'hydrogène et dans l'air, on ne trouve entre ces rondelles prises deux à deux que des différences insignifiantes et qui n'ont rien de systématique (*).

Il nous suffira donc d'examiner une seule série, par exemple celle des aciers chauffés en atmosphère oxydante.

Transformation du grain en fonction de la température. — Comme nous l'avons déjà dit, nous avons jugé de la structure de chaque rondelle après son traitement par l'aspect d'une section attaquée.

Le polissage à sec, au moyen de papiers d'émeri de plus en plus fins, jusqu'au numéro le plus fin du commerce, nous a paru suffisant. Il est vrai que le poli ainsi obtenu n'est pas parfait; mais, après attaque, nous n'avons trouvé aucune différence entre quelques rondelles

(*) Notons cependant que, à partir d'une température comprise entre 1.115 et 1.225 degrés, la transformation du grain, pour tous les aciers examinés, est un peu plus active dans l'air que dans l'hydrogène.

préparées à l'émeri et les mêmes parfaitement terminées au rouge à polir.

L'acide employé pour l'attaque a toujours été l'acide azotique à 36° Baumé. Le métal y devient, en général, très rapidement passif; si une seule immersion n'est pas jugée suffisante, on en fait une seconde dans les mêmes conditions, après avoir passé une éponge humide sur la surface devenue passive; on lave ensuite à l'eau et à l'alcool et on fait sécher rapidement sous un jet de vent soufflé.

La collection que nous avons ainsi préparée nous a fourni naturellement bon nombre de renseignements sur la structure de l'acier. Mais, pour permettre au lecteur de suivre utilement nos observations, il faudrait le secours de photographies microscopiques que nous ne pouvions faire en temps utile. Nous nous réservons donc de revenir ultérieurement sur les questions les plus délicates que soulèvent nos recherches, et nous ne parlerons aujourd'hui que des transformations les plus grossières et les mieux connues déjà, celles que l'on peut faire suivre, sans l'aide de figures, avec une clarté suffisante.

1. **Acier extra doux.** — Les transformations de grain que subit ce métal, à mesure qu'on l'abandonne au refroidissement à partir d'une température plus élevée, se traduisent à la loupe et même à l'œil nu, par la formation d'un moiré de plus en plus accusé. Ce sont d'abord des points miroitants isolés qui se développent progressi-

(*) Tous les aciers présentent ce caractère commun que la surface attaquée par l'acide azotique est, toutes choses égales d'ailleurs, d'autant plus foncée que le grain est devenu plus gros, absolument comme si l'acier était devenu plus dur. Un acier refroidi lentement semble donc contenir d'autant plus de carbone de trempe qu'il a été porté à une température plus élevée. Ce fait paradoxal est peut être dû à la répartition de plus en plus irrégulière du carbone et à l'isolement de grains très carburés au milieu de parties très adoucies.

vement jusqu'à occuper toute la surface. Chacun des îlots, caractérisé par une même orientation moléculaire et par un système d'axes unique, est ce que nous avons appelé dans la *théorie cellulaire* une cellule composée de 1er ordre, et les arrangements ne vont pas au delà pour l'acier extra doux. A la température la plus élevée que nous ayons atteinte, ce métal ne nous a pas montré de cellules composées de 2e ordre, c'est-à-dire les gros polyèdres à faces grossièrement planes qui se forment dans les aciers plus durs.

Les embryons de cellules composées apparaissent dès que la température du chauffage a atteint 750 degrés, mais ils ne se développent que d'une façon insensible jusqu'à 920 degrés. Le développement s'accélère franchement entre 920 et 1.015 degrés, et beaucoup plus entre 1.115 et 1.230 degrés. Pour l'acier chauffé à 1.230 degrés et au-dessus, les cellules deviennent jointives et de dimensions relativement grandes; l'aspect de la préparation est, à échelle très réduite, celui d'un beau fer galvanisé; c'est dire que les îlots contigus n'ont pas de formes franchement polygonales; leurs limites mutuelles, qui semblent nettes à l'œil nu, se fondent au microscope sous un grossissement d'une cinquantaine de diamètres; les grains sont soudés entre eux. Sur les deux caractères qui définissent généralement l'acier brûlé, à savoir la grosseur et l'indépendance des grains, le premier seul est bien accusé.

Si l'on représente graphiquement ces transformations en élevant, normalement à l'échelle des températures, des ordonnées approximativement proportionnelles à la grosseur du grain, on obtient (*fig.* 7, Pl. III) une courbe qui a été superposée à la courbe similaire de Tchernoff et qui en diffère notablement. Au lieu de partir du point *b* pour s'élever d'une façon continue jusqu'à l'infini, notre courbe part de a_{c2} et présente deux inflexions.

2. **Acier mi-dur.** — La transformation du grain est ici marquée par le développement progressif d'un double système de cellules composées de 1er et de 2e ordre; mais ce sont ces dernières qui attirent et fixent l'attention. A l'œil nu et sous un faible grossissement, chaque cellule composée de 2e ordre se présente, après attaque, sous la forme d'un polygone relativement terne et sombre entouré d'une zone claire et brillante de métal doux. A mesure que la température atteinte par le chauffage est plus élevée, les polygones sombres deviennent plus grands et prennent une forme plus exactement géométrique; en même temps, le réseau brillant devient plus fin, plus tranché, et se relie à des systèmes de lignes brillantes parallèles qui recoupent les polygones ternes intérieurs. Cette transformation n'est pas une fonction simple de la température de chauffage. Elle semble avoir le point *a* pour origine, mais reste d'abord très lente et très faible; elle devient visible à l'œil nu sur l'échantillon chauffé à 860 degrés et s'annonce par l'apparition de points sombres entourés d'un réseau brillant. Les cellules composées continuent à s'organiser et à grandir assez régulièrement de 860 à 1.115 degrés, puis, entre 1.115 et 1.230 degrés, elles prennent brusquement un accroissement considérable et une individualité tout à fait définie : l'acier est brûlé. La courbe qui représente les dimensions du grain en fonction de la température atteinte par le chauffage (*fig.* 7, Pl. III) présente donc encore, tout comme la courbe correspondante de l'acier extra doux, deux montées plus rapides, d'ailleurs très inégales, la première entre 800 et 860 degrés, la seconde entre 1.115 et 1.230 degrés.

3. **Acier dur.** — L'examen des attaques est moins facile pour cet acier que pour les échantillons plus doux, à cause de la teinte noire générale que prennent les surfaces attaquées; on est même obligé de frotter ces sur-

faces avec une éponge mouillée pour faire apparaître la structure.

La tranformation du grain est marquée d'abord par le développement des cellules composées de 1er ordre qui forment une mosaïque moirée, à teintes variables selon l'incidence de la lumière par rapport aux alignements moléculaires. Cette transformation semble toujours avoir le point *a* pour origine; elle prend une certaine accélération entre 750 et 860 degrés, et l'acier chauffé à 860 degrés présente déjà un beau moiré continu qui ne change pas sensiblement d'aspect ni de dimensions jusqu'à 1.115 degrés. Entre 1.115 et 1.230 degrés, le réseau polygonal à larges mailles de l'acier brûlé apparaît brusquement et vient recouper la mosaïque des cellules composées de 1er ordre.

La courbe représentant la transformation du grain en fonction de la température (courbe qui n'a pas été figurée) serait encore analogue à celles que nous avons obtenues pour les autres échantillons; elle présenterait aussi, d'abord entre 750 et 860 degrés, puis entre 1.115 et 1.230 degrés, deux montées rapides très inégales reliant des portions très faiblement inclinées sur l'axe des températures.

Conclusions générales. — On voit que, dans les conditions définies où nous nous sommes placé, la transformation du grain des aciers n'est pas un phénomène aussi simple que l'avait pensé Tchernoff.

Le point a_{c2} semble être partout le point de départ de cette transformation. En d'autres termes, le fer possède, dès qu'il a pris l'état β, une tendance à la cristallisation; mais son organisation reste d'abord très lente, très pénible et très rudimentaire.

Quand l'acier a été porté à une certaine température, variable avec la teneur en carbone, mais toujours plus

élevée que a_{c2},

Soit entre 920 et 1015° pour l'acier extra-doux.
— 800 et 860° — mi-dur.
— 750 et 860° — dur.

puis abandonné, à l'abri de tout travail mécanique, au refroidissement lent, la transformation du grain prend une certaine accélération et se révèle à la simple inspection, à l'œil nu, d'une cassure ou d'une attaque.

Cette température qui, par la nature même du phénomène considéré, n'est pas susceptible d'être déterminée avec précision, est le point *b* de Tchernoff, selon la définition que nous avons donnée en commençant.

Enfin, quand l'acier a été porté à une température comprise entre 1.115 et 1.230 degrés, les conditions du refroidissement étant telles qu'il a été dit ci-dessus, le grain prend brusquement un développement rapide, quelle que soit la dureté du métal; mais les grains ne deviennent franchement polyédriques et incohérents qu'à partir d'une certaine teneur en carbone. C'est là le point que Tchernoff définit par les coordonnées X et Y; nous l'appellerons B, et nous remarquerons que ce point B est placé beaucoup trop près de la fusion *c* sur le diagramme de Tchernoff. En réalité, il n'y a que fort peu de différence entre les rondelles chauffées respectivement à 1.230 et à 1.390 degrés.

Considérations théoriques. — Les faits qui précèdent sont indépendants de toute théorie. Mais ne peuvent-ils pas fournir aussi quelques indications sur les causes de la transformation du grain?

D'après Tchernoff, le point *b* pourrait être la température à laquelle le fer commence à se dissoudre dans le carbone, de même qu'un sel chauffé se dissout dans son eau de cristallisation. Nous avons émis avec M. Werth, dans la *théorie cellulaire*, une hypothèse à peu près équi-

valente sous une forme un peu différente, quand nous avons dit : « Le point *b* est la température de fusion du ciment. »

Cette hypothèse supposait que le carbure de fer, constituant le ciment de l'acier lentement refroidi, se dissociait d'une façon progressive à partir de *a* et n'était pas complètement décomposé en *b*.

Or, les expériences ultérieures ont bien confirmé la dissociation en a_{c1} (voir la 1re partie), mais elles nous ont appris en même temps que cette dissociation n'était pas progressive et se produisait entièrement à une température bien déterminée, pourvu que le chauffage ne fût pas très rapide.

Dès lors il est, sinon certain, du moins probable, qu'il n'y a plus de carbure de fer au-dessus de a_{c1}, donc plus de ciment, si l'acier est supposé pur de tout élément étranger; donc ce ciment, qui n'existe plus, ne peut pas fondre en *b*.

Cette objection nous a été faite par M. le docteur Fr. Müller (*); elle nous paraît bien fondée et nous nous l'étions déjà posée à la suite de nos recherches sur les transformations du carbone.

Cependant, si notre hypothèse ne peut être conservée sous sa forme initiale, d'autant plus qu'elle faisait une certaine confusion entre les points *b* et B, l'idée même d'une substance particulière se liquéfiant dans la masse de l'acier solide n'était pas mauvaise en soi; nous en avons trouvé, dans le cas des fontes, une confirmation expérimentale concluante; tellement que, pour certains échantillons impurs, on n'a plus que l'embarras du choix entre les divers ciments plus fusibles que la fonte elle-même.

(*) *Grundzüge einer Theorie des Stahls.* Stahl und Eisen, VIII, p. 291 (mai 1888).

Ne se passe-t-il pas quelque chose d'analogue pour les aciers?

L'expérience, à la vérité, ne le confirme pas. Si on suit en effet depuis 1.400 degrés, température tout à fait voisine de la fusion, le refroidissement d'un acier dur très peu phosphoreux, on trouve que ce refroidissement ne présente aucun ralentissement notable qui dépasse les erreurs d'expérience et qu'il soit permis d'attribuer à la solidification d'une substance restée liquide dans l'acier solide.

Mais la seule conclusion légitime que l'on puisse tirer de la régularité du refroidissement, c'est que l'échantillon considéré ne garde, après solidification, aucune substance liquide *à point de fusion défini et en proportion notable.*

Rien ne s'oppose à la solidification *progressive* de *petites* quantités de fer maintenues liquides par la présence du carbone dissous en proportions *variables.*

Ces idées ne nous sont pas d'ailleurs exclusivement personnelles : elles ont été émises notamment par M. Ledebur (*) et il nous paraît bien difficile d'expliquer autrement la structure hétérogène de l'acier fondu et la concentration du carbone dans la région centrale supérieure des lingots : ces faits de liquation sont aujourd'hui connus de tous les métallurgistes.

En tenant compte à la fois des données de l'expérience, des considérations théoriques qui précèdent et des observations très utiles qu'on a bien voulu nous adresser, voici comment nous croyons pouvoir, actuellement, concevoir les phénomènes qui se produisent dans les aciers au-dessus du point *a*.

Il y a lieu de considérer séparément

1° Le refroidissement après fusion;

(*) *Stahl und Eisen*, VI, p. 379 (juin 1886).

2° Le chauffage;

3° Le refroidissement après chauffage au-dessous du point de fusion.

1. **Refroidissement après fusion.** — Nous comprenons toujours de la même manière la formation, pendant la solidification, de ce que nous avons appelé les cellules simples et les cellules composées (*). Seulement, au lieu d'un partage immédiat et définitif en deux constituants, ciment liquide et fer solide, nous sommes conduit maintenant à admettre une solidification progressive du fer doux d'abord, puis d'alliages de plus en plus carburés de fer et de carbone. Une telle solidification progressive ne se traduira naturellement, pendant le refroidissement, par aucun arrêt prolongé du thermomètre; elle sera complète, pour les aciers les plus purs du commerce, au point B, c'est-à-dire entre 1.200 et 1.100 degrés, température à partir de laquelle apparaissent, pendant le chauffage, les caractères de l'acier brûlé.

Il est certain que l'acier fondu prend, pendant cette première période entre *c* et B, et même dès le début, les traits essentiels de sa structure définitive, car on obtient le gros grain brûlé, quelle que soit la vitesse du refroidissement, pourvu que l'on parte d'une température supérieure à B. C'est que, au-dessous de B, l'organisation du fer devient d'autant plus lente que la température est plus basse; aussi, bien que le travail d'agrégation puisse se poursuivre et se poursuive réellement de B à a_{r2}, l'effet produit sur la texture pendant une certaine chute de température est toujours faible et généralement négligeable par rapport à l'effet déjà produit pendant la chute égale de température immédiatement précédente.

On peut donc admettre que l'acier garde, pendant

(*) *Théorie cellulaire*, p. 66 et suiv.

toute la durée du refoidissement, la texture qu'il avait prise pendant et peu après la solidification. Seulement, quand on arrive aux points *a*, le changement moléculaire du fer et la combinaison du fer avec le carbone interviennent, simultanément ou séparément, pourvu que le refroidissement ne soit pas très rapide. Mais comme les mouvements moléculaires d'une certaine amplitude ne sont plus possibles à la température considérée, ces transformations n'affectent pas la texture apparente; le changement d'état du carbone entraîne bien la formation d'un nouveau constituant, le carbure de fer, dont la situation par rapport aux globulites de fer libre n'est pas la même que celle du carbone sous sa forme antérieure; mais le transport du carbure de fer ne paraît pas dépasser le rayon de la cellule simple. Quant au fer, tout en prenant, avec le nouvel état α, une structure finement grenue, il conserve, *par pseudomorphisme*, les formes générales acquises sous l'état β.

2. **Chauffage.** — Un acier, quel que soit son état initial, qu'il ait été trempé, écroui, brûlé ou non, retrouve, après avoir été réchauffé jusqu'au plus élevé des points *a*, un état physico-chimique constant; la *distribution* seule de ses constituants peut garder la trace de ce qu'elle a été et ne reprendre qu'au bout d'un temps plus ou moins long son équilibre normal à la température considérée (*).

A partir de a_{c1}, le composé de fer et de carbone, qui existait interposé dans l'acier froid, se décompose, et l'on a, comme nous l'avons vu, d'assez bonnes raisons de croire que la décomposition est totale. On admet

(*) Il n'est pas cependant impossible que l'acier garde indéfiniment quelque chose des états antérieurement traversés. Les travaux de M. Gernez sur le soufre (*Ann. de chim. et de phys.*, 6e série, t. VII, p. 233) font entrevoir de mystérieux faits de cet ordre.

assez généralement que le carbone mis en liberté se dissout dans le fer solide et cette opinion a en effet quelque vraisemblance : elle n'est pas cependant à l'abri de toute critique. On ne comprend pas très bien que dans une dissolution qui est, par définition, quelque chose d'homogène, le fer tende à s'individualiser et à rejeter le carbone hors de ses arrangements cristallins. Il est donc permis d'envisager une autre hypothèse que nous avons déjà indiquée, celle de la combinaison du carbone devenu libre avec l'hydrogène occlus. On sait, par les recherches de M. Forquignon, que cette combinaison est possible et, par celles de M. le docteur Müller, que l'hydrogène est toujours présent dans les aciers. L'hypothèse offre donc certaines probabilités. Le carbone hydrogéné des aciers serait alors un produit interposé, analogue aux carbures condensés qui constituent le goudron, le brai, le charbon de sucre ; il serait fusible au rouge ce qui rendrait plus faciles les arrangements moléculaires du fer, et le terme ultime de sa condensation serait le graphite qui contient encore un peu d'hydrogène.

D'autre part, le fer, à partir de a_{c2}, prend la forme β et la transformation est complète au-dessus de a_{c3}. La période de passage entre les deux états α et β correspond vraisemblablement à la texture relativement amorphe que l'on cherche à fixer par la trempe à juste température. Mais cette texture amorphe n'est que transitoire : dès que le fer est, même partiellement, à l'état β, il tend vers la cristallisation. Le point a_{c2}, considéré comme origine de la transformation du grain, pourrait donc s'appeler aussi b_0 ; mais cette transformation est d'abord pénible et reste peu sensible à l'œil nu, quelle que soit la durée du chauffage, si la température ne s'élève pas au-dessus du point b, tel que nous l'avons défini par expérience.

Puisque ce point b de Tchernoff représente la température à laquelle la transformation du grain, déjà commencée antérieurement, prend une accélération notable, il conviendra de le désigner à l'avenir par b_1, pour le distinguer de son origine théorique b_0. b_1 s'élève, comme nous l'avons vu, à mesure que la teneur en carbone est plus faible : en d'autres termes, le carbone, quel que soit son état actuel (carbone dissous ou carbure d'hydrogène), donne de la mobilité aux molécules de fer et leur permet de s'orienter en formant des agrégats d'un certain volume. Remarquons, en passant, que b_1, par sa nature même, ne doit pas avoir de position bien précise sur l'échelle des températures. Il serait donc à souhaiter que l'on remplaçât, quand on parle du travail d'un acier, le terme vague de point b par l'indication exacte de la température qu'on veut désigner ; la mesure de ces hautes températures est aujourd'hui relativement facile et l'usage de chiffres comparables permettra seul aux métallurgistes de bien s'entendre.

Si l'on poursuit le chauffage au-dessus de b_1, on arrive au point B qui correspond à l'abcisse X de Tchernoff, à la grande inflexion de nos courbes de transformation du grain et à l'apparition de l'état dit brûlé. Nous avons déjà, à propos du refroidissement après fusion, défini ce point B comme le terme probable de la solidification progressive de l'acier. Inversement, pendant le chauffage, ce sera l'origine de la fusion progressive, fusion qui s'étend successivement, à mesure que la température s'élève, des points de la masse où le carbone est le plus concentré à ceux où le carbone est le plus rare. On conçoit d'ailleurs, sans qu'il soit besoin d'insister, combien la présence d'une matière liquide dans le métal solide, matière susceptible de dissoudre le fer en un point pour le précipiter ailleurs, doit favoriser les arrangements du métal ; ce sont là précisément les conditions que l'on cherche à réaliser artificiellement pour la repro-

duction synthétique de nombreuses espèces cristallines. Dans l'hypothèse de la combinaison du carbone avec l'hydrogène en a_{c1}, l'hydrogène doit redevenir libre à partir de B, au fur et à mesure de la fusion progressive: c'est là une conséquence théorique que l'on pourrait peut-être vérifier expérimentalement.

3. **Refroidissement après chauffage.** — Tout ce que nous avons dit du refroidissement après fusion peut être répété ici, avec cette différence que l'état initial de la structure est différent. Dans notre manière de voir, appuyée sur les expériences de M. Brinell, la transformation du grain ne se fait pas uniquement pendant le refroidissement, comme l'a pensé Tchernoff, tandis que l'acier deviendrait amorphe pendant le chauffage. Cette transformation se fait à la fois pendant le chauffage, pendant le refroidissement et pendant la station intermédiaire. C'est ainsi que l'acier de cémentation présente la même cassure, que le refroidissement ait eu lieu rapidement à l'air ou très lentement dans les caisses (*). En résumé, la transformation du grain n'est fonction que de la température maxima atteinte pendant le chauffage et, probablement, du temps pendant lequel cette température a été maintenue.

Si le métal est soumis pendant le refoidissement à un travail mécanique de forge assez énergique pour détruire les arrangements cristallins édifiés pendant le chauffage et en empêcher la formation pendant le corroyage, *la température maxima qui détermine la structure de la pièce finie sera celle à laquelle on a terminé le travail.* Cette considération a une importance pratique capitale: Dans un grand nombre de cas, le travail est arrêté à une température trop élevée, soit par suite de mauvaises habitudes, soit que l'outillage manque de puissance.

(*) Communication de M. Brustlein.

Tout ce qui précède ne s'applique qu'à l'acier théoriquement pur ne contenant que du fer et du carbone; on voit facilement, dans ce cas, ce qui distingue notre conception actuelle de notre conception première et rudimentaire du point b de Tchernoff: c'est que le ciment, au lieu de subsister en partie de a_{c1} à la fusion sous forme de carbure de fer, prendrait en réalité deux formes différentes discontinues : carbure de fer solide au-dessous de a_1, dissolution liquide de carbone dans le fer au-dessus et à partir de B. Et, dans l'intervalle, se placerait la troisième forme du carbone dissous dans le fer *solide* ou combiné à l'hydrogène; de sorte que, pendant cette période, on aura encore un ciment ou l'on n'en aura plus, selon que l'une ou l'autre des deux hypothèses sera la vraie.

Ce que nous avons dit des fers carburés sans phosphore pourrait se répéter en partie des fers phosphorés sans carbone. Le phosphore, sans former avec le fer des composés définis à point de fusion fixe, comme le prouve le refroidissement à partir de 1.360 degrés du métal Thomas avant sursoufflage, pourra donner une série d'alliages de fer et de phosphore en proportions variables, et la présence de ces alliages, liquides à partir d'une température inférieure à la fusion du métal, facilitera l'organisation cristalline du fer; on sait que le métal Thomas avant sursoufflage prend de belles formes spéculaires.

Si le carbone et le phosphore sont réunis dans un même échantillon, l'existence d'un phospho-carbure défini, ou, tout au moins, d'un alliage triple de fer, de carbone et de phosphore, prend quelque apparence de probabilité, puisque le refroidissement de la fonte phosphoreuse nous a donné, vers 900 degrés, un point singulier de position fixe. Plusieurs des aciers que nous avons

examinés présentent aussi, dans la même région, de petits ralentissements qui ne dépassent guère les erreurs d'expérience, mais s'en distinguent par une certaine régularité. Ainsi la solidification totale pourra être abaissée, pour les aciers phosphorés, jusqu'aux environs de 900 degrés et déterminer soit un nouveau point critique indépendant b_2, soit un déplacement des points B et b_1; la question reste à étudier par expérience d'une façon plus précise, mais on sait déjà que les aciers phosphorés prennent l'état brûlé avec une facilité particulière et à une température relativement basse. En outre, le phosphore, qui ne fait jamais complètement défaut dans les aciers, établirait pratiquement la continuité théoriquement interrompue entre le ciment solide au-dessous de a_1 et le ciment liquide au-dessus de B.

La présence d'autres impuretés, silicium, soufre, arsenic, etc..., rendront également possibles l'existence de points critiques spéciaux ou le déplacement des points critiques déjà connus, selon la nature et la fusibilité des alliages ou des composés formés.

Dans les recherches expérimentales qui font l'objet de cette note, nous n'avons considéré que deux variables indépendantes, la teneur en carbone et la température maxima du chauffage. Il faudrait faire varier aussi la vitesse du chauffage et du refroidissement et la proportion des impuretés, faire intervenir le travail mécanique et joindre à l'étude de la structure celle des propriétés mécaniques de l'acier. Mais un pareil programme excède de beaucoup nos moyens d'action : c'est plutôt aux usines qu'il appartient de le réaliser pour les aciers qu'elles fabriquent; les résultats obtenus leur permettraient certainement de guider leur travail et d'assurer la régularité de leurs produits.

Tableau I. — FONTE D'HÉMATITE.

TEMPÉRATURES	DANS L'AIR CONFINÉ							EN TUBE OUVERT					
	ESSAIS 1 et 2		ESSAI 3		ESSAI 4		ESSAI 5	ESSAI 6		ESSAI 7		ESSAI 8	
	Chge	Refrt	Chge	Refrt	Chge	Refrt	Refrt	Chge	Refrt	Chge	Refrt	Chge	Refrt
	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.
1.239,7	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	6,8	2,7
1.230,2	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	5,6	3,2
1.220,8	»	»	»	»	»	»	»	»	»	6,1	»	4,4	2,1
1.211,4	»	»	»	»	»	»	»	»	»	4,7	»	4,4	3,5
1.201,9	»	»	»	»	»	»	»	»	»	4,4	»	4,0	2,7
1.192,5	»	»	»	»	»	»	»	»	»	3,2	»	3,7	2,7
1.183,1	»	»	»	»	»	»	4,1	»	»	3,1	3,0	4,3	2,7
1.173,6	»	»	»	»	7.3	3,9	3,5	5,8	3,3	4,0	3 3	4,0	2,9
1.164,2	»	»	»	»	16,5	4,3	3,6	6,7	3,9	4,1	3,5	4,1	2 5
1.154,8	»	»	»	»	12,3	3,5	3,6	6,7	4,1	4,3	2,9	4,4	3,0
1.145,4	»	»	»	»	8,7	4,2	4,3	12,5	4,2	13,0	2,9	4,4	2,6
1.135,9	»	»	5,1	7.2	7,6	4,6	4,7	13,3	3,8	8,9	3,0	5,4	2,6
1.126,5	»	»	4,0	5,9	6,7	5,1	4,1	9,7	3,3	8,5	3,2	5,7	2,8
1.117,1	»	»	18,0	6,6	25,7	4,2	3,9	9,1	3,5	6,3	2,8	6,8	3,4
1.107,6	»	»	17,7	6,5	16,6	6,5	3,6	12,2	3,8	8,3	2,9	7,7	3.3
1.098,2	»	»	10,0	4,0	9,0	8,0	11,6	9,4	10,6	7,4	6,6	4,8	2,7
1.088,8	»	»	»	»	»	11,5							
1.088,8	»	»	6,9	11,9	6,7	8,8	19,0	6,3	13,1	5,0	11,5	3,7	3,1
1.079,3	»	»	4,8	10,8	6,0	4,1	3,4	5,3	3,2	4,3	3,7	2,8	9,5
1.069,9	»	»	4,6	2,9	4,2	3,1	2,9	4,7	2,4	4,1	2,8	2,8	4,2
1.060,5	»	»	4,3	2,8	4,4	3,0	2,5	4,1	2,4	»	2,6	2,7	3,3
1.051,0	»	»	4,1	2,7	4,4	2,7	2,5	4 2	2,5	»	2,8	2,3	2,9
1.041,6	»	»	3,8	2,4	3,5	2,0	2,3	3,6	2,7	»	2,5	2,3	2,3
1.032 2	»	»	4,1	1,9	3,4	2,1	2,5	3,6	2,2	»	2.6	2,3	2,7
1.022,7	»	»	3,7	2,0	3,0	2,1	2,4	3.7	2,2	»	2,3	2,3	2,7
1.013,3	»	»	3,9	2,3	2,8	2,1	2,3	2,9	2,1	»	2,3	2,1	2,4
1.003,9	»	»	3,5	2,1	2,6	2,2	2,4	3,3	2,2	»	2,3	2,0	2,5
994,4	»	»	4,1	2,4	2,5	2,1	2,1	2,7	2,3	»	2,6	2,2	2,7
985,0	»	»	3,9	2,7	2,7	2,7							
975,6	»	»	4,0	2,8	2,1	2,3							
966,1	»	»	3.9	2,6	2,2	2,9							
956,7	»	»	3,6	2,9	2,2	2,7							
947,3	»	»	3,5	3,1	1,7	2,9							
937,8	8,6	6,2	3,6	3,2	2,0	3,2							
928,4	9,0	5,7	3,1	2,7	1,8	3,1							
919,0	8,0	5,2	3,1	3,3	2,0	3,5							
909,5	7,2	5,0	3,0	3,4	1,8	3,5							
900,1													

Tableau I (*suite*).

TEMPÉRATURES	DANS L'AIR CONFINÉ							EN TUBE OUVERT					
	ESSAIS 1 et 2		ESSAI 3		ESSAI 4		ESSAI 5	ESSAI 6		ESSAI 7		ESSAI 8	
	Chge	Refrt	Chge	Refrt	Chge	Refrt	Refrt	Chge	Refrt	Chge	Refrt	Chge	Refrt
	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.							
900,1	7,0	5,1	2,9	3,8	2,1	3,4							
890,7	6,3	5,2	»	3,6									
881,2	5,7	4,9	»	4,1									
871,8	5,5	4,9	»	4,3									
862,4	5,2	5,3	»	4,3									
853,0	4,7	5,2	»	4,5									
843,5	4,4	5,3	»	4,9									
834,1	4,7	5,4	»	4,8									
824,7	5,0	5,5	»	5,3									
815,2	5,2	5,7	»	5,2									
805,8	4,1	5,5	»	5,5									
796,4	6,3	5,9											
786,9	9,6	6,2											
777,5	6,0	6,4											
768,1	6,8	6,3											
758,6	6,4	6,7											
749,2	4,6	6,8											
739,8	4,0	7,0											
730,3	4,6	7,5											
720,9	4,9	10,3											
711,5	4,5	46,1											
702,0	4,4	12,0											
692,6	4,3	8,3											
683,2	4,5	7,4											
673,7	4,1	7,9											
664,3	4,3	8,0											
654,9	3,9	7,8											
645,4	4,1	8,4											
636,0	3,9	8,5											
626,6	3,9	9,2											
617,1	3,8	9,6											
607,7	»	9,4											
598,3	»	10,0											
588,8	»	10,6											
579,4	Station à 708°.		Le thermomètre s'arrête à 1.088 et remonte à 1.089.		Le thermomètre s'arrête à 1.089 et remonte à 1.091.		Station à 1.089.	Le thermomètre commence à osciller légèrement à partir de 1.230 et violemment à partir de 1.240 (point de fusion approximatif).				Station à 1.077.	

Tableau II. — FONTE DE MOULAGE.

TEMPÉRATURES	DANS L'AIR CONFINÉ								EN TUBE OUVERT					
	ESSAIS 1 et 2		ESSAI 3		ESSAI 4		ESSAI 5		ESSAI 6		ESSAI 7		ESSAI 8	
	Chge	Refrt	Chge	Refrt	Chge	Refrt	Chge	Refrt	Chge	Refrt	Chge	Refrt	Chge	Refrt
	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.
1.268,0	»	»	»		»		»		»	»				2,0
1.258,5	»	»	»		»		»		»	»				1,9
1.249,1	»	»	»		»		»		»	»	Oscillations à partir de 1.210			2,2
1.239,7	»	»	»		»		»		»	»		10,4		2,7
1.230,2	»	»	»		»		»		»	»		12,2		3,1
1.220,8	»	»	»		»		»		»	»		6,4		6,1
1.211,4	»	»	»		»		»		»	»		9,8		3,5
1.201,9	»	»	»		»		»		»	»		10,8		8,5
1.192,5	»	»	»		»		»		»	»		8,6		3,9
1.183,1	»	»	»		»		»		»	»		6,5		5,2
1.173,6	»	»	»		9,1	3,8	5,8	3,9	4,6	3,5	5,2	2,5	7,5	2,1
1.164,2	»	»	»		8,7	4,8	5,9	3,2	4,6	3,6	5,4	2,7	9,0	3,9
1.154,8	»	»	»		6,8	4,2	6,6	3,6	5,0	3,9	5,4	2,8	7,2	3,0
1.145,4	»	»	»		4,9	3,9	5,7	3,7	5,0	3,9	5,5	3,5	6,1	3,6
1.135,9	»	»	»		5,1	4,4	6,2	3,9	5,4	4,5	5,4	3,6	4,8	3,4
1.126,5	»	»	8,1	5,8	5,1	4,6	5,1	5,2	5,0	5,1	4,2	7,6	3,5	3,3
1.117,1	»	»	9,5	5,6	5,1	5,2	4,3	5,7	4,9	4,6	3,9	3,1	2,6	3,0
1.107,6	»	»	8,4	5,4	9,5	6,2	2,7	3,4	3,0	3,9	2,7	3,4	2,3	3,2
1.098,2	»	»	22,6	6,8	15,3	4,2	12,1	4,5	13,4	3,8	4,9	4,2	2,8	2,8
1.088,8	»	»	17,7	6,2	15,2	4,6	31,2	3,1	21,6	3,9	33,5	3,6	13,7	3,0
1.079,3	»	»	»	6,2										
1.079,3	»	»	»	13,1										
1.079,3	»	»	25,3	12,0	10,6	5,2	11,9	4,6	8,4	6,6	11,6	4,4	»	3,4
1.069,9	»	»	»	»	»	6,8								
1.069,9	»	»	»	»	»	16,6								
1.060,5	»	»	21,8	5,6	6,8	13,1	8,6	35,0	6,2	27,6	7,4	15,8	»	8,5
1.051,0	»	»	17,8	3,1	5,8	3,6	5,9	5,6	4,6	7,0	5,9	10,0	»	17,1
1.041,6	»	»	12,2	2,5	4,8	2,5	5,1	2,9	3,6	4,0	4,5	11,3	»	4,7
1.032,2	»	»	10,2	2,3	4,3	2,3	4,3	2,5	3,5	3,0	4,8	4,1	»	3,3
1.022,7	»	»	9,3	2,4	3,9	2,1	4,3	2,2	3,1	2,7	4,0	3,4	»	2,7
1.013,3	»	»	9,2	2,1	3,7	2,2	3,7	2,3	2,7	2,7	4,1	3,0	»	2,6
1.003,9	»	»	8,4	2,1	3,7	2,4	3,7	2,4	2,9	2,6	3,9	3,2	»	2,6
994,4	»	»	8,3	2,4	3,5	2,2	3,1	2,4	2,3	2,9	3,6	3,2	»	2,7
985,0	»	»	7,8	2,7	3,3	2,5	3,3	2,7	2,5	2,6	3,6	3,0	»	2,7
975,6	»	»	7,1	2,7	3,1	2,8								
966,1	»	»	7,1	2,7	3,4	2,8								
956,7	»	»	7,0	2,9	3,3	3,1								
947,3	»	»	6,3	3,1	2,8	3,2								
937,8	»	»	6,2	3,3	3,1	2,9								

Le thermomètre s'arrête à 1.073 et remonte à 1.083.

Le thermomètre s'arrête à 1.069 et remonte à 1.073.

Station à 1.068.

Le thermomètre s'arrête à 1.066 et remonte à 1.069.

Oscillations à partir de 1.200.

Tableau II (*suite*).

TEMPÉRATURES	DANS L'AIR CONFINÉ.								EN TUBE OUVERT					
	ESSAIS 1 et 2		ESSAI 3		ESSAI 4		ESSAI 5		ESSAI 6		ESSAI 7		ESSAI 8	
	Chge	Refrt	Chge	Refrt	Chge	Refrt	Chge	Refrt	Chge	Refrt	Chge	Refrt	Chge	Refrt
	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.
937,8	»	»	5,8	3,6	2,6	3,6								
928,4	»	»	5,8	3,6	2,8	3,8								
919,0	»	»	5,6	4,0	3,0	3,9								
909,5	»	7,8	5,4	4,2	»	4,3								
900,1	»	6,7	5,1	4,2	»	4,1								
890,7	5,1	6,3	»	4,6										
881,2	4,8	6 3	»	4,8										
871,8	4,5	6,3	»	4,9										
862,4	4,5	6,3	»	5,4										
853,0	4,2	5,7	»	5,6										
843,5	3,9	6,3	»	5,9										
834,1	3,8	6,4	»	6,1										
824,7	3,9	6,3	»	6,3										
815,2	3,8	6,3	»	6,6										
805,8	3,9	6,5	»	6,3										
796,4	3,8	6,7												
786,9	4,0	6,8												
777,5	5,1	6,6												
768,1	5,3	7,1												
758,6	4,7	6,8												
749,2	4,0	7,3												
739,8	4,1	7,5												
730,3	4,5	8,2												
720,9	3,8	8.0												
711,5	3,4	8,6												
702,0	3,4	8,4												
692,6	3,5	9,6												
683,2	3,5	10,1												
673,7	3,6	14,0												
664,3	3,7	20,5												
654,9	3,4	24,1												
645,4	3,3	18,7												
636,0	3,5	19,4												
626,6	3,3	22,1												
617,1	3,7	14,5												
607,7	»	11,1												
598,3	»	10,4												
588,8	»	11,0												
579,4														

Tableau IIbis.

FONTE DE MOULAGE.

TEMPÉRATURES	DANS L'HYDROGÈNE													
	ESSAI 1bis		ESSAI 2bis		ESSAI 3bis		ESSAI 4bis		ESSAI 6bis		ESSAI 7bis	ESSAI 8bis		ESSAI 9bis	
	Chauffage	Refroidissement	Chauffage	Refroidissement	Chauffage	Refroidissement	Chauffage	Refroidissement	Chauffage	Refroidissement	Refroidissement	Chauffage	Refroidissement	Chauffage	Refroidissement
	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.
1.139,5	»	»	»	»	»	»	»	»	5,0	4,6	»	3,5	7,6	4,0	5,9
1.129,6	»	»	»	5,3	»	5,4	»	5,4	4,9	4,7	5,8	8,4	6,4	7,4	6,9
1.119,6	3,5	3,8	5,7	4,8	6,1	5,5	8,2	5,8	6,8	5.1	6,7	14,6	6,7	15,3	5,6
1.109,7	18,6	4,7	24,1	6,3	22,7	6,9	22,6	7,7	23,8	6,9	7,7	20,5	6,4	14,4	6,7
1.099,7	23,2	6,1	14,7	7,8	13,1	8,6	14,5	7,9	22,2	5,9	6,9	11,6	7,2	10,1	6,7
1.089,8	13,5	31,7	10,0	32,4	8,9	33,6	8,8	32,8	11,8	25,9	31,1	8,9	33,2	7,6	33,3
1.079,9	8,9	5,2	7,1	5,0	5,7	5,5	6,0	5,7	8,7	4,4	5,2	6,9	7,7	6,0	7,6
1.069,9	8,0	2,9	4,9	2,6	5,0	3,2	4,9	3,4	7,9	3,0	3,2	6,2	4,5	5,0	5,1
1.060,0	6,8	2,5	4,8	2,6	4,4	2,8	3,9	3,1	6,0	2,6	3,0	5,2	3,9	4,8	4,4
1.050,0	5,9	2,2	4,1	2,6	3,4	2,7	3,5	3,0	5,9	2,4	3,0	4,9	3,5	4,0	3,7
1.040,1	5,1	2,3	3,6	2.6											
1.030,2	4,0	2,5	3,8	2,9											
1.020,2	4,8	2,4	3,3	3,1											
1.010,3	4,1	2,7	3,4	3,1											
1.000,3	3,8	2,9	2,7	3,4											
990,4															
Arrêt à. . . .	»	1088	»	1085	»	1083	»	1082	»	1084	1087				
Rebrouss^{t} à. .	»	1092	»	1090	»	1089	»	1087	»	1089	1089				
Station à . . .	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	1089	»	1089

Tableau II[ter].

FONTE DE MOULAGE.

TEMPÉRATURES	DANS L'HYDROGÈNE									
	ESSAI 1ter		ESSAI 2ter		ESSAI 3ter		ESSAI 4ter		ESSAI 5ter	
	Chauffage	Refroidissement	Chauffage	Refroidissement	Chauffage	Refroidissement	Chauffage	Refroidissement	Chauffage	Refroidissement
	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.
1.184,3	Oscillations suivies d'une ascension rapide à 1190.	»	»	»	5,2	4,2				
1.174,5		4,5	»	5,9	4,2	4,1	3,9	4,2	4,5	4,5
1.164,6		4,6	3,7	3,9	3,5	3,9	3.8	4,4	4.2	4,2
1.154,8		4,0	2,8	4,3	3,0	4,3	3,9	4.1	4,4	3,6
1.145,0		4,1	3,1	4,0	3,1	4,1	3,8	3,9	3,5	4,5
1.135,2		4,2	2,6	4,0	2,6	3,7	5,8	4,6	5,7	3,6
1.125,3	15,7	4,0	4,0	4,2	3,9	4,4	5,4	4,0	5,7	3,6
1.115,5	12,1	4,9	15,4	4,0	17,0	4,5	12,2	4,3	10,9	4,7
1.105,7	8,6	4,8	21,8	4,8	19,1	4,9	16,0	4,4	16,5	4,6
1.095.8	26 6	6.9	13,9	7,5	12,9	8,5	11,9	9,9	11,5	9,7
1.086,0	17,3	10,2	9,9	8,1	7,5	6,4	8,0	4,9	8,0	5,2
1.076,2	11,1	31,1	6,7	28,7	5,9	9,2	5,8	6,9	5,6	5,0
1.066,3	8,1	8,0	6,1	9,8	4,6	13,4 13,8	4,7	29.8	4,5	28,7
1.056,5	6,6	5,5	5,1	5,6	4,2	7,2	4,2	7,6	4,5	8,2
1.046,7	5,9	5,0	4,5	4,8	3,7	5,6	3,8	6,1	3,7	6,6
1 036,9	5,1	4,6	3,9	3,9	3,4	4,9	3.7	4,8	3,5	5,3
1.027,0										
Arrêt à. . .	»	1074	»	1070	»	1065	»	1062	»	1059
Rebrouss[t] à.	»	1076	»	1072	»	1067	»	1066	»	1061

Tableau III. — FONTE PHOSPHOREUSE.

TEMPÉRATURES	DANS L'AIR CONFINÉ							
	ESSAI 1		ESSAI 2		ESSAI 3		ESSAI 4	
	Chge	Refrt	Chge	Refrt	Chge	Refrt	Chge	Refrt
	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.
1.107,6								
1.098,2	»	»	»	»	»	»	4,0	4,5
1.088,8	»	»	»	»	»	»	4,0	4,7
1.079,3	»	»	»	»	»	»	4,5	4,7
1.069,9	»	»	»	»	3,6	7,2	4,1	5,7
1.060,5	»	»	»	»	6,0	6,2	5,0	5,9
1.051,0	»	»	»	»	7,5	5,0	6,5	4,3
1.041,6	»	»	»	»	8,7	4,4	7,8	4,1
1.032,2	»	»	»	»	7,4	4,5	7,4	4,6
1.022,7	»	»	»	»	7,2	17,3	6,6	4,6
1.013,3	»	»	»	»	6,2	6,4	6,2	15,1
1.003,9	»	»	»	»	5,8	5,5	5,6	6,5
994,4	»	»	»	»	5,3	4,6	4,6	5,8
985,0	»	»	»	»	5,0	4,2	4,6	5,1
975,6	»	»	9,3	6,5	4,3	3,8	4,4	4,2
966,1	»	»	6,9	6,4	4,0	3,9	3,8	4,1
956,7	»	»	6,1	5,5	4,2	4,1	3,5	4,1
947,3	»	»	6,0	5,5	3,8	3,9	3.4	3,6
937,8	»	»	5,7	5,0	4,4	4,1	3,1	3,9
928,4	»	»	6,5	4,9	3,5	3,8	3,1	4,0
919,0	»	»	6,1	5,2	3,9	4,3	3,2	4,1
909,5	»	»	16,3	5,5	7,3	4,4	4,9	4,1
900,1	»	»	8,0	6,0	7,7	4,7	9,6	4,6
900,1	»	»	»	15,6				
890,7	»	»	4,4	7,7	4,0	4.9	3,2	4,8
890,7	»	»	»	»	»	17,2	»	4,5
890,7	»	»	»	»	»	»	»	9,1
881,2	6,9	4,7	4,7	3,7	2,9	4,6	2,6	7,4
871,8	4,6	4,1	4,3	2,6	3,1	3,7	2,1	4,0
862,4	4,2	4,3	4,6	3,3	2,8	3.4	2,3	3,9
853,0	4,9	4,6	4,6	3,4	2,9	3,7	2,3	3,6
843,5	4,2	5,2	4,5	3,9	2,7	3,7	»	3,6
834,1	4,2	5,2	4,0	4,4	2,9	4,1		
824,7	4.6	5,7	4,2	4,7	3,1	4,4		
815,2	5,0	5,8	3,6	4,8	3,2	4,5		
805,8	4 6	Accident du chronographe	3,6	5,6	3,4	5,1		
796,4	4,6		4,6	5,7	3,9	5,5		
786,9	4,3		6,1	5,7				

Tableau III (*suite*).

TEMPÉRATURES	DANS L'AIR CONFINÉ — ESSAI 1 Chge	ESSAI 1 Refrt	ESSAI 2 Chge	ESSAI 2 Refrt	ESSAI 3 Chge	ESSAI 3 Refr.	ESSAI 4 Chge	ESSAI 4 Refrt
	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.
786,9	3,8	6,6	4,5	6,2				
777,5	3,5	7,1	3,7	6,7				
768,1	3,3	7,1	3,2	6,7				
758,6	3,3	8,1	3,0	7,2				
749,2	3,4	8,7	3,0	7,2				
739,8	3,1	10,5	3,1	8,2				
730,3	3,2	12,1	3,1	8,9				
720,9	3,2	12,5	3,1	9,1				
711,5	3,4	13,2	3,1	9,9				
702,0	3,3	20,6	3,2	46,4				
692,6	3,5	11,3	3,5	10,3				
683,2	3,1	7,3	3,2	8,4				
673,7	3,4	7,6	3,4	8,3				
664,3	3,4	7,8	3,4	9,0				
654,9	3,0	8,8						
645,4	3,1	8,8						
636,0	3,0	9,3						
626,6	3,0	10,0						
617,1	3,0	11,0						
607,7								

Station à 917° — Station à 900° — Station à 698° : Station à 910°. L'ascension du thermomètre est un peu saccadée à partir de 1000°.

Station à 1.030°. Le thermomètre s'arrête de nouveau à 891° et remonte à 896°. — 3e station à 698°.

Station à 1.018°. Le thermomètre s'arrête de nouveau à 890° et remonte à 892°.

Tableau IV. — FERRO-SILICIUM.

TEMPÉRATURES	DANS L'AIR CONFINÉ — ESSAI 1 Chge	ESSAI 1 Refrt	ESSAI 2 Chge	ESSAI 2 Refrt	ESSAI 3 Chge	ESSAI 3 Refrt
	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.
1.154,8	»	»	»	9,3		
1.145,4	»	»		6,9	»	7,0
1.135,9	»	»	36,0	44,0	3,5	32,7
1.126,5	28,3	43,7		6,6	5,2	6,3
1.117,1	31,5	3,9	34,2	4,4	15,3	4,2
1.107,6	27,4	2,8	25,5	3,7	19,1	2,7
1.098,2	20,2	2,3	19,2	2,8	16,1	2,6
1.088,8						

TEMPÉRATURES	DANS L'AIR CONFINÉ — ESSAI 1 Chge	ESSAI 1 Refrt	ESSAI 2 Chge	ESSAI 2 Refrt	ESSAI 3 Chge	ESSAI 3 Refrt
	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.
1.088 8	16,0	2,3	10,9	2,2	10,7	2,3
1.079,3	13,7	2,2	9,6	2,1	7,2	2,5
1.069,9	12,1	1,9	7,9	2,0	6,0	1,9
1.060,5	10.3	2,3	6,3	2,0	5,0	2,2
1.051,0	9,5	2,0	5,0	2,1	4,3	1,9
1.041,6	7,9	2,2	5,1	2,1	4,2	2,3
1.032,2	8,6	2,3	5,3	2,1	4,0	2,2
1.022,7						

Tableau IV (*suite*).

TEMPÉRATURES	DANS L'AIR CONFINÉ — ESSAI 1 Chge	ESSAI 1 Refrt	ESSAI 2 Chge	ESSAI 2 Refrt	ESSAI 3 Chge	ESSAI 3 Refrt
	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.
1.022,7	7,3	2,2	4,6	2,3	4,2	2,4
1.013,3	6,6	2,6	4,3	2,4	3,8	2,3
1.003,9	6,7	2,7	4,2	2,5	3,8	2,4
994,4	6,4	2,7	3,7	2,3	4,0	2,7
985,0	5,7	2,9	3,9	3,0		
975,6	6,3	3,0	3,6	2,7		
966,1	6,7	3,1	3,6	3,0		
956,7	5,8	3,3	4,0	3,2		
947,3	5,8	3,5	3,3	3,2		
937,8	5,6	3,6	3,8	3,3		
928,4	5,2	3,5	3,4	3,7		
919,0	5,4	4,1	3,3	3,8		
909,5	5,3	4,1	2,6	3,7		
900,1	4,7	4,3	2,9	4,2		
890,7	4,9	4,5	2,8	4,1		
881,2	4,8	4,6	3,0	4,7		
871,8	5,1	4,6	3,0	4,2		
862,4	4,8	4,5	3,0	4,9		
853,0	5,3	5,6	2,7	4,7		
843,5	4,8	»	2,9	5,2		
834,1	5,4	»	2,6	4,8		
824,7	5,6	»	2,9	5,1		
815,2	5,7	»	2,5	6,1		
805,8	»	2,8	2,6	5,1		
796,4	»	2,2	2,7			
786,9	»	2,4	2,8			
777,5	»	2,3	2,5			
768,1	»	2,5				
758,6	»	2,4				
749,2	10,4	2,8				
739,8	10,4	2,5				
730,3	9,6	3,2				
720,9	9,0	2,9				
711,5	8,7	3,2				
702,0	8,3	3,3				
692,6	8,4	3,3				
683,2	7,7	3,3				
673,7						

Le thermomètre s'arrête à 1.129° et remonte à 1.134°.

Le thermomètre s'arrête à 1.133° et remonte à 1.135°.

TEMPÉRATURES	DANS L'AIR CONFINÉ — ESSAI 1 Chge	ESSAI 1 Refrt	ESSAI 2 Chge	ESSAI 2 Refrt	ESSAI 3 Chge	ESSAI 3 Refrt
	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.
673,7	8,0	3,5				
664,3	7,0	3,9				
654,9	6,8	3,8				
645,4	6,7	4,2				
636,0	6,8	4,1				
626,6	6,7	4,3				
617.1	5,7	4,5				
607,7	6,3	4,5				
598,3	6,1	4,8				
588,8	5,8	4,8				
579,4	6,1	5,4				
570,0	5,4	5,6				
560,5	6,6	5,8				
550,9	6,1	6,4				
541,2	6,4	6,8				
531,4	6,1	8,4				
521,6	6,0	7,6				
511,7	6,3	7,9				
501,7	5,8	7,9				
491,7	6,0	7,9				
481,5	5,7	7,8				
471,3	5,6	8,3				
461,0	5,7	8,7				
450,6	5,7	9,7				
440,1		9,4				
429,5		9,5				
418,8						

Le thermomètre s'arrête à 1.120° et remonte à 1.126°.

Tableau V. — SILICO-SPIEGEL.

TEMPÉRATURES	DANS L'AIR CONFINÉ				
	ESSAI 1		ESSAI 2		ESSAI 3
	Chge	Refrt	Chge	Refrt	Chge
	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.
1.211,4					fils coupés
1.201,9	»	»	»	»	17,0
1.192,5	»	»	»	»	16,4
1.183,1	»	»	»	»	13,5
1.173,6	»	»	»	»	12,8
1.164,2	»	»	»	»	11,0
1.154,8	»	»	»	»	11,3
1.145,4	»	»	»	»	10,3
1.135,9	»	»	»	»	9,4
1.126,5	»	»	»	»	8,7
1.117,1	»	»	8,8	4,8	10.5
1.107,6	»	»	8,3	4,4	11,5
1.098,2	»	»	7,3	4,8	10,7
1.088,8	»	»	7,4	4,3	9,1
1.079,3	»	»	5,9	4,6	6,6
1.069,9	6,7	9,7	5,3	4,8	7,6
1.060,5	5,6	9,4	6,5	6.8	8,8
1.051,0	8,0	18,8	13,4	19,6	18,8
1.041,6	14,0	19,6	17,7	19,2	18,3
1.032,2	16,2	10,5	12,2	9,3	14,0
1 022,7	10,7	6,8	8,2	5,5	10,9
1.013,3	15,4	7,5	11,0	4,9	13.5
1.003,9	7,8	5,9	8,1	4,3	9,9
994,4	7,3	4,8	7,8	5,3	7,7
985 0	6,1	4,3	5,4	4.7	5,5
975,6	4,4	8,1	4,7	7,2	
966,1	4.8	2,6	4,3	2,4	
956,7	5,3	2,5	4,2	2,4	
947,3	4,5	2,5	5,0	2,5	
937.8	4,3	3,7	3,9	3,2	
928,4	4,2	3,0	3,5	2,9	
919 0	4,3	3,2	3,7	3,1	
909,5	4,2	3,7	3,7	3,2	
900,1	4,2	3,9	3,8	3,5	
890,7	4,0	3,9	3,2	3,5	
881,2	4,0	4,3			
871,8	4,1	4,7			
862,4	4,0	4,9			
853,0	4,2	5,2			
843,5	4,2	5,4			

TEMPÉRATURES	DANS L'AIR CONFINÉ	
	ESSAI 1	
	Chge	Refrt
	sec.	sec.
843,5	4,2	5,7
834,1	4,0	5,6
824,7	4,0	5,8
815,2	4,1	6,9
805,8	4,2	6,6
796,4	4,0	
786 9	3,7	
777,5	3,9	
768,1	4,0	
758,6	3,6	
749,2	4,4	4,1
739,8	4,2	4,2
730,3	4,3	4,2
720,9	4,6	4,6
711,5	4,9	4,4
702,0	»	4,2
692,6	»	4,5
683,2	»	4,5
673,7	»	4,6
664,3	»	4,8
654,9	»	4,5
645,4	»	5,3
636,0	»	5,2
626,6	»	5,2
617,1	»	5,5
607,7	»	6,1
598,3	»	5,6
588,8	»	6,6
579 4	»	6,1
570,0	»	7,0
560,5	»	6,8
550,9	»	7,0
541,2	»	7,4
531,4	»	7,6
521,6	»	8,2
511,7	»	8,3
501,7	»	8,3
491,7	»	9,2
481,5	»	9,4
471,3	»	9,9
461,0	»	

Refroidissement hâté

Tableau VI. — FERRO-MANGANÈSE A 20 P. 100.

TEMPÉRATURES	DANS L'AIR CONFINÉ							
	ESSAI 1	ESSAI 2		ESSAI 3		ESSAI 1bis		
	Chauffage	Chauffe	Refroidt	Chauffe	Refroidt	Chauffe	Refroidt	
	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.		
1.126,5	Commt de perturbations et ascension brusque à 1170.	»	»	»	»	Ascension brusque à 1130		
1.117,1		»	»	»	»			
1.107,6	2,5	»	»	8,2	4,6			
1.098,2	15,6	»	»	10,8	4,3	4,3		
1.088,8	14,1	10.7	11,0	13,9	19,7	11,9		
1.079,3	11,1	8,8	7,3	9,1	7,8	11,0		
1.069,9	21,8	10,3	7,4	11,1	5,4	9,2		
1.060,5	22,8	16,5	23,8	15,8	22,0	14,3		
1.051,0	13,2	13,2	8,6	17,9	10,2	13,8		
1.041,6	9,4	9,3	4,3	11,2	4,7	10,7		
1.032,2	7,7	7,7	3,0	8,7	2,8	7,5		
1.022,7	6,5	6,4	3,1	7,7	2,8	6,1		
1.013,3	5,9	5,2	2,9	6,6	2,7	5,4		
1.003,9	5,3	4,8	3,0	5,4	2,7	5,1		
994,4	4,7	4,6	2,9	5,5	3,0	4,8		
985,0	4,8	4,2	3,0	5,1	3,1	4,6		
975,6	4,2	3,7	3,2	4,9	3,2	4,0		
966,1	4 1	3,8	3,7	4,5	3,4	4,0		
956,7	4,3	3,7	3,2	4,2	3,6	4 0		
947,3	4,0	3,7	4,1	4,1	3,7	4,0		
937,8	3,8	3,5	3,7	4,3	3,7	3,5		
928,4	4,1	3,3	4,2	4,0	3,6	3,5		
919,0	3,9	3,7	4,2	3,8	4,3	3.4		
909,5	4,1	3,5	4,3	4,0	4,7	3,4		
900,1	3,8	3,4	4,6	3,1	4,5	3 4		
890,7	»	»	5,4	»	»	3,6		
881,2			Station à 1052		Station à 1083 et à 1051			

Essai manqué par suite d'un accident du chronographe. — Le thermomètre s'est arrêté à 1060 et est remonté à 1063

Tableau VII. — FERRO-MANGANÈSE A 50 P. 100.

TEMPÉRATURES	DANS L'AIR CONFINÉ											
	ESSAI 2		ESSAI 3		ESSAI 4		ESSAI 1bis		ESSAI 2bis		ESSAI 3bis	
	Chauffage	Refroidissemt	Chauffage	Refroidissemt	Chauffage	Refroidissemt	Chauffage	Refroidissemt	Chauffage	Refroidissemt	Chauffage	Refroidissemt
	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.
1.192,5	»	»	»	»	»	6,7						
1.183,1	»	»	»	»	»	4,8						
1.173,6	»	»	7,2	3,5	»	6,9	»	»	»	10,7		
1.164,2	»	»	6,3	7,1	7,9	2,9	»	»	»	11,1	»	8,1
1.154,8	»	»	7,1	4,8	7,6	4,8	»	»	6,0	14,6	»	11,6
1.145,4	»	»	6,8	7,6	7,9	5.3	»	»	8.8	10,2	6,5	11,0
1.135,9	»	»	6,9	4,6	8,0	5,1	»	»	7,9	6,7	6,7	6,1
1.126,5	7,5	8,7	7,4	5,9	7,8	5,0	12,0	»	8,3	5,8	8,3	5,1
1.117,1	7,4	7,3	8,1	5,5	7,1	6,0	13,1	»	15,4	»	8,9	6,1
1.107,6	8,3	11,2	7,0	8,0	6,9	7,3	10,6	»	12,0	»	12,8	18,6
1.098,2	7,9	6,6	5,8	8,6	5,9	6,8	9,3	»	9.4	»	12,2	7,6
1.088,8	6,1	4,3	5,3	5,0	5,2	4,7	10,1	»	8,0	»	7,7	4,9
1.079,3	5,4	4,1	4,2	4,1	5,3	4,2	8,4	»	6,7	»	8,1	3,7
1.069.9	4,9	4,1	4,4	3,5	5,2	4,5	7,8	4,9	6,3	»	7,2	3,6
1.060,5	5,1	4,1	4,9	3,8	5,6	4,3	6,6	4,8	5,8	»	6,5	3,4
1.051,0	5,7	4,0	6,1	3,6	5,7	4,5	6,9	4,1	6,7	»	6,2	3,1
1.041,6	7,4	4,2	4,7	4,2	4,9	6,3	7,0	4,3	7,0	»	6,9	4,4
1.032,2	6,0	7,4	4,7	6,6	4,1	6,2	6,1	6,0	5,4	»	7,6	8,6
1.022,7	4,4	4,2	3,9	5,3	4.2	4,1	6,1	6,4	5,4	»	7,5	4,8
1.013,3	4,2	3,4	3,8	3,3	3,4	3,8	6,4	5,2	4,9	»	6,6	3,5
1.003,9	3,6	3,3	3,5	3,2	3,0	3,8	5,3	4 5	4,9	»	6,4	3,4
994,4	3,6	3,4	3,4	3,1	2,9	3,6	5,6	4.0	4,6	»	5,9	3,0
985,0	3,4	3,6	3,0	3,1	3,2	3,2	5,3	4,2	4,3	»	»	3,4
975,6	3,2	3,5	3,1	3,3	2,7	3,5	5,0	3,8	3,9	»	»	2,7
966,1	3,6	3,3	3,1	3,4	3,1	3,2	4,6	3,9	4,0	»	»	3,2
956,7	3,2	3,7	2 9	3,2	2,5	3,7	4,9	4,2	3,6	»	»	3,4
947,3	2,7	3,7	2,7	3,6	2.8	3,2	4,2	3,9	3,6	»	»	3,2
937,8	2,7	3,4	2,7	3,3	2,8	3,1	4,2	4,2	3,4	»	»	3,7
928,4	2,7	4,3	2,8	4,4	2.4	3,9	4,2	4,3	3,4	»	»	3,7
919,0	2,7	4,1	2,5	4,4	2,4	3,8	4,2	5,1	3,2	»	»	4,5
909,5	2,9	4,2	»	4,0	2,4	4,7	4,0	5,8	3,4	»	»	4,5
900,1	»	4,3	»	5,0	2,5	4,3	3,8	4,5	3,5	»	»	3,9
890,7												

Tableau VIII. — FERRO-MANGANÈSE A 80 P. 100.

TEMPÉRATURES	DANS L'AIR CONFINÉ				
	ESSAI 1		ESSAI 2		ESSAI 3
	Chauffage	Refroidiss.	Chauffage	Refroidiss.	Refroidiss.
	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.
1.249,1	»	»	»	»	3,7
1.239,7	»	»	»	»	3,8
1.230,2	»	»	»	»	3,9
1.220,8	»	»	»	15,1	7,3
1.211,4	»	»	18,2	8,2	8,0
1.201,9	»	»	14,2	6,1	6,6
1.192,5	»	8,2	12.4	5,8	4,6
1.183,1	»	7,0	12,9	5,8	5,8
1.173,6	12,2	5,5	11,3	5,1	6,0
1.164,2	12,2	5,8	9,7	5,4	6,0
1.154,8	10,6	4,8	10,1	4,0	7,0
1.145,4	11,5	4,2	9,0	4,1	5,2
1.135,9	10,9	3,7	7,8	3,6	5,0
1.126,5	8,5	3,8	7,9	3,8	4,4
1.117,1	9,5	3,7	7,8	2,9	4,6
1.107,6	7,8	3,5	6,8	3,0	4,2
1.098,2	8,7	4,0	6,3	3,9	3,9
1.088,8	7,1	3,5	5,2	4,1	4,5
1.079,3	6,8	3,7	5,2	2,9	3,2
1.069,9	6,7	3,8	4,7	3,9	4,1
1.060,5	6,2	3,6	4,7	3,3	3,8
1.051,0	5,9	3,7	4,7	3,8	3,6
1 041,6	6,2	3,7	4,2	3,8	3,3
1.032,2	5,2	3,8	4,5	3,9	3,9
1.022,7	5,7	4,2	4,2	4,7	3,8
1.013,3	5,4	4,1	4,2	4,5	4,0
1.003,9	7,3	5,3	4,2	5,1	4,3
994,4	6,2	5,0	3,9	5,0	4,0
985,0	6,8	5,9	4,3	6,5	6,6
975,6	6,7	6,5	3,8	5,4	7,5
966,1	6,7	4,1	4,7	4,4	5,8
956,7	6,2	4,2	3,7	4,3	5,2
947,3	6,0	4,0	3,9	4,1	4,3
937,8	5,9	4,2	3,7	4,5	4,2
928,4	5,6	4,3	3,5	4,3	4,7
919,0	5,6	4.5	»	4,6	5,1
909,5	5,5	4,4	»	4,5	4,6
900,1	5,8	4,8	»	5,1	5,3
890,7					

Tableau IX. — MÉTAL THOMAS AU DÉBUT DU SURSOUFFLAGE.

TEMPÉRATURES	DANS L'AIR CONFINÉ — MOYENNE DES REFROIDISSEMENTS 1 et 2	3 et 4	5 et 6	7 et 8	Refr[t] 9
	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.
1.359,9	»	»	»	»	6,3
1.350,1	»	»	»	»	5,7
1.340,4	»	»	»	»	5,4
1.330,6	»	»	»	»	4,3
1.320,8	»	»	»	»	4,4
1.311,1	»	»	»	5,95	4,4
1.301,3	»	»	»	4,85	4,5
1.291,5	»	»	»	4,85	4,0
1.281,8	»	»	»	4,85	4,5
1.271,9	»	»	»	4,00	3,8
1.262,2	»	»	»	4,05	4,3
1.252,5	»	»	»	4,10	4,2
1.242,7	»	»	»	3,60	4,2
1.232,9	»	»	»	3,60	4,1
1.223,1	»	»	»	3,80	4,4
1.213,4	»	»	5,05	3,75	4,2
1.203,6	»	»	5,05	3,85	4,4
1.193,8	»	»	3,95	3,65	4,8
1.184,1	»	»	4,10	3,95	4,3
1.174,3	»	»	3,60	3,65	4,9
1.164,5	»	»	3,40	4 05	5,1
1.154,8	»	»	3,75	3,95	5,2
1.145,0	»	»	3,60	3,90	4,5
1.135,2	»	»	3,70	4,55	5,7
1.125,5	»	»	3,75	4,10	5,0
1.115,7	»	»	3,85	»	5,6
1.105,9	»	4,65	4,20	»	6,4
1.096 1	»	3,75	4,10	»	5,8
1.086,4	»	3,55	4,50	»	6,2
1.076,6	»	3.40	4,20	»	6,3
1.066,8	»	3.40	4,85	»	6,3
1.057.1	»	3,40	4,95	»	7,3
1.047,3	»	3,25	4,55	»	6,6
1.037,5	»	3,45	5,35	»	7,5
1.027.7	»	3,35	5,05	»	7,4
1.018,0	»	3 35	»	»	7,7
1.008,2	»	3,55	»	»	7,3
998,4	»	3,55	»	»	8,7
988,7	»	3,65	»	»	8,8
978,9	»	3,65	»	»	9,4
969,2	6,60	3,75	»	»	15,5
959,4	5,50	3,85	»	»	10,9
949,6	5,20	3,95	»	»	11,3
939,8					

TEMPÉRATURES	DANS L'AIR CONFINÉ — MOYENNE DES REFROIDISSEMENTS 1 et 2	3 et 4	5 et 6	7 et 8	Refr[t] 9
	sec.	sec.	sec.	sec.	sec.
939,8	4,50	4,20	»	»	10,5
930,1	4,90	4,25	»	»	9,6
920,3	4,30	4,25	»	»	Refroidissement.
910,5	4,45	4,45	»	»	
900,8	4,60	4,80	»	»	3,3
891,0	4,85	4,75	»	»	3,9
881,2	4,85	5,10	»	»	2,9
871,5	5,00	»	»	»	2,7
861,7	4,90	»	»	»	2,7
851,9	5,35	»	»	»	2,8
842,2	5,60	»	»	»	2,8
832,4	5,30	»	»	»	2,6
822,6	5,75	»	»	»	3,0
812,9	5,70	»	»	»	2,6
803,1	5,85	»	»	»	2,8
793,3	6,55	»	»	»	3,0
783,5	6,75	»	»	»	2,9
773,8	6,80	»	»	»	3,2
764,0	6,90	»	»	»	3,2
754,2	7,80	»	»	»	3,6
744,5	7,75	»	»	»	3,7
734,7	8,25	»	»	»	3,5
724,9	9,05	»	»	»	3,9
715.2	8,70	»	»	»	3,8
705,4	9,85	»	»	»	4,8
695.6	10,70	»	»	»	4,7
685,9	11.65	»	»	»	5,3
676,1	10,95	»	»	»	4,8
666,3	11,30	»	»	»	4,5
656,5	10,50	»	»	»	4,9
648,8	11,05	»	»	»	4,9
637,0	11,80	»	»	»	4,8
627,2	»	»	»	»	4,5
617,5	»	»	»	»	4,6
607,7	»	»	»	»	5,0
597,9	»	»	»	»	4,9
588,2	»	»	»	»	5,7
578,4	»	»	»	»	5,1
568,7	»	»	»	»	5,4
558.8	»	»	»	»	5,6
548,9	»	»	»	»	5,6
538,8	»	»	»	»	6,0
528,6					

NOTE

SUR LES GITES DE MERCURE

DU MONTE AMIATA (TOSCANE)

Par M. PRIMAT, ingénieur des mines.

Pour trouver des renseignements sur les mines de mercure de la Toscane, on peut consulter le mémoire sur la mine de Siele, publié en 1879, par M. Petiton, dans les *Annales des mines*, quelques études de géologie générale sur la région du Monte Amiata, notamment celle de M. Lotti, et les statistiques du ministère de l'agriculture.

Ayant visité en 1886 les mines de Siele et du Cornacchino, nous pouvons donner ici d'autres documents que nous devons à l'extrême bienveillance de M. Jasinski, directeur de la mine de Cornacchino et ancien élève de l'École des mines de Paris.

I. — DESCRIPTION DES GÎTES.

Situation géographique.

Le district minier de Monte Amiata est situé dans la province de Grosseto et desservi par la station du Monte Amiata, sur la ligne de Grosseto à Siena. Pour aller de la station du Monte Amiata à Santa Fiora, qui est le centre administratif de toutes les mines, on a à faire en voiture un trajet de 27 kilomètres, en traversant les communes de Castel del Piano et d'Arcidosso.

Sur la route on rencontre des charrettes qui servent à transporter le mercure. Le métal est renfermé dans des bouteilles en fer contenant 34k,50. On met environ trente bouteilles sur chaque charrette, et, comme un tel chargement est peu encombrant, on combine le transport du mercure avec celui de matières légères, telles que la laine ou le charbon de bois. On voit aussi transporter des tonneaux contenant l'ocre jaune et l'ocre rouge, que l'on exploite à Castel del Piano et à Arcidosso.

C'est à Santa Fiora que l'on doit s'établir, pour aller de là visiter les diverses mines. Cette petite ville (2.000 habitants), célèbre comme berceau de l'illustre famille des Sforza, se trouve sur un des contreforts de l'Amiata dans une position pittoresque au milieu de forêts de châtaigniers séculaires.

Zone cinabrifère. — Depuis 1873, on a fait de nombreuses recherches de minerai de mercure dans les terrains éocènes et crétacés qui entourent le Monte Amiata, et surtout dans les localités où l'on avait retrouvé quelques traces d'anciennes exploitations. Les divers points où l'on a trouvé le minerai sont les suivants (Pl. IV, *fig.* 1):

L'Abbadia San Salvador, la Casa di Paolo, la propriété Paradisi dans la vallée de la Senna et sur le territoire de Pian Castanio; Siele, sur le territoire de Castellazare, le pic de la Volpe, les Solfarate, près du torrent Scabbia, affluent de la Fiora, le Morone et Selvena dans la vallée de la Fiora, le Cornacchino sur le flanc de la montagne de la Penna et dans la petite vallée du Fiume, affluent de la Paglia.

Tous ces points se répartissent sur une zone d'une longueur de 20 kilomètres, partant de l'Abbadia San Salvador, au nord, pour aboutir à Selvena del Morone, au sud.

En fait, bien que les recherches n'aient pas été abandonnées partout et puissent avoir un bon succès, il n'y a que deux mines qui soient exploitées : la mine de Siele et la mine du Cornacchino. La première appartient à MM. Rosselli, de Livourne (directeur à Santa Fiora : M. Bani); la seconde appartient à la comtesse Sforza et a été affermée au docteur Schwarzemberg (directeur à Santa Fiora : M. Jasinski).

Une bonne route, longue de 13 kilomètres, conduit de Santa Fiora à Siele. La mine a pris le nom du torrent Siele, qui se jette dans la Paglia, affluent du Tibre.

La mine du Cornacchino, qui est séparée de la mine de Siele par la montagne de la Penna, est à 20 kilomètres de Santa Fiora. Comme il y a environ 6 kilomètres hors de la route carrossable et dans de mauvais sentiers, il est bon de se procurer des chevaux à Santa Fiora. On peut aussi se rendre en voiture jusqu'à Castellazare, petit village distant de Siele de 5 kilomètres, et gagner de pied la mine du Cornacchino.

Géologie générale de la région.

Description sommaire du Monte Amiata. — Le Monte Amiata (*fig.* 2) s'élève au-dessus d'une vaste région légèrement ondulée et ne présentant que des élévations peu importantes. Ces quelques montagnes, constituées par des roches liasiques et triasiques, appartiennent au système de la chaîne métallifère (*Catena metallifera*). Ce sont notamment le Monte Orsaio, le Monte Argentario, le Monte di Cetona, l'Uccellino, les monts de Rocca Strada et de Montieri et la Montagnola Senese (de Siene).

Le sommet de l'Amiata, à la cote de 1.732 mètres au-dessus du niveau de la mer, n'a pour rivaux dans le voisinage que le Monte Labbro, haut de 1.183 mètres, le Montieri, haut de 1.050 mètres, et la montagne basaltique de Radicofani, haute de 897 mètres.

Le Monte Labbro, constitué exclusivement de roches

sédimentaires, se détache du Monte Amiata vers le sud-ouest, et son sommet est distant de celui de l'Amiata de 12 kilomètres environ. Il est le point culminant d'une série d'élévations alignées sensiblement du nord-ouest au sud-est, et parmi lesquelles sont les montagnes Faggia, Madonina et Buceto.

Entre cette chaîne et le Monte Amiata coule le torrent Zancona, qui envoie ses eaux dans l'Ente. L'Ente se jette dans l'Orcia et l'Orcia dans l'Ombrone.

La base du Monte Amiata est formée de grès et de calcaires. Vers le haut, à l'altitude moyenne de 700 mètres, se trouve une masse de roches trachytiques comprises dans le pays sous la désignation commune de *peperino*.

Le haut de la montagne se partage en plusieurs cimes qui portent les noms des diverses communes qui les possèdent, Arcidosso, Santa Fiora, l'Abbadia. C'est la dernière de ces cimes qui est la plus élevée, et qui devient par suite le but des excursions des touristes.

Abstraction faite de quelques accidents produits probablement par les érosions, la masse trachytique présente dans son ensemble la forme d'un vaste cône ayant une base presque exactement circulaire, d'un diamètre de 15 kilomètres, cône tronqué au sommet et présentant, du côté du midi, un éventrement appelé *Val d'Enfer*.

Hydrologie. — Le massif du Monte Amiata et du Monte Labbro est baigné à sa base par le fleuve Orcia, qui prend sa source entre les monts de Cetone et la coupole basaltique de Radicofani. L'Orcia contourne l'Amiata de l'est au nord et au nord-ouest par un vaste demi-cercle, recevant à sa gauche de nombreux torrents, Formone, Vellora, Onfola, Reciola, Ansedomia, Ente. Vers l'ouest et le midi coulent le Melace et la Trasubie, affluents de l'Ombrone, les fleuves Albegna et Fiora et la Paglia, affluent du Tibre.

Végétation. — Toute la montagne est revêtue d'une riche végétation, que l'on peut diviser en trois zones : la zone inférieure (jusqu'à 600 mètres), produisant la vigne et l'olivier; la zone moyenne (jusqu'à 950 mètres), couverte de châtaigniers, et la zone supérieure, où l'on ne voit guère que des hêtres. En général, les forêts de châtaigniers suivent les contours du trachyte, car le châtaignier aime les terres fraîches et légères qui résultent de la décomposition de cette roche.

Sources à la limite des trachytes. — Les villages Amiata, Castel del Piano, Arcidosso, Santa Fiora, Pian Castanio, Abbadia San Salvador, Campiglia, Seggiano, tous très pittoresques, sont situés à une altitude moyenne de 600 à 800 mètres, et se trouvent tous à la limite des trachytes. Tout le long de cette limite, en effet, on a des sources d'une eau excellente et d'un débit constant, la masse poreuse des trachytes formant régulateur. Les eaux qui traversent facilement le trachyte ne pénètrent pas dans les grès et les marnes qui lui sont subordonnés et reparaissent à la surface.

La force motrice que pourraient fournir ces sources, dont le débit est parfois considérable, n'a guère servi jusqu'à présent qu'à faire mouvoir quelques moulins à blé ou à olives. Elle sera sans doute mieux utilisée quand de nouveaux chemins de fer permettront d'exporter les bois et autres produits du pays.

Trachyte. — Von Rath a distingué deux variétés de trachytes du Monte Amiata : la ryolithe et le trachyte proprement dit à oligoclase et sanidine.

La ryolithe est un mélange de petits grains de sanidine, de grains gris non cristallins, de biotite, d'oligoclase et d'un peu d'augite. Les grains gris non cristallins ressemblent à du quartz et ont, d'après Von Rath, la

composition suivante :

Silice	76,82
Alumine	14,01
Chaux	1,76
Eau	0,40
Alcalis	7,00

La densité de ces grains à 22 degrés est de 2,35. Même au microscope polarisant, ils paraissent constitués d'une matière amorphe ; mais avec un grossissement de 400 diamètres, on peut observer une infinité de lignes parallèles correspondant sans doute à des tubes creux.

Le trachyte proprement dit peut aussi être considéré comme un porphyre à pâte de sanidine, d'oligoclase et de biotite avec de gros cristaux de sanidine épars dans la masse.

Dans toute la masse du trachyte, on trouve, réparties à des distances variables, mais toujours faibles, des inclusions ou fragments de roches diverses, et comprises sous le terme général d'*anime di sasso* (âmes de pierre). Ces anime di sasso n'ont pas d'adhérence à la masse qui les entoure et consistent tantôt en un agrégat de mica magnésien, tantôt en trachyte poreux sombre avec des grains de sanidine, tantôt en graphite plus ou moins pur. Nous reviendrons sur la composition de ces inclusions.

Roches serpentineuses. — Vers l'est, sur les flancs du Monte Amiata et à la limite de la formation trachytique, apparaît une roche ophiolithique, consistant surtout en euphotide, et que l'on retrouve en plusieurs points.

Age des trachytes. — Le trachyte repose, comme nous le verrons, sur les couches de l'éocène supérieur. D'après Verri et Stefani, il aurait été amené au jour par une éruption postpliocénique. C'est ce qu'une étude détaillée nous permettra de vérifier.

Si l'on fait abstraction du pliocène qui entoure le Monte Amiata de tous côtés, mais d'assez loin, on ne trouve, comme terrains sédimentaires, que des terrains éocéniques et crétacés. L'éocène se trouve surtout à l'est, et supporte presque seul la coupole trachytique. Le crétacé, au contraire, se trouve surtout à l'ouest et au sud-ouest, formant les montagnes de Buceto et d'Aquilaja.

En supposant qu'on enlève tout le trachyte, le point le plus élevé du massif serait le sommet du Monte Labbro, ce qui montre que l'éruption ne s'est pas faite à un sommet, mais plutôt sur le flanc oriental de la montagne.

Le pliocène qui affleure plus loin atteint sa plus grande hauteur vers l'est, à Radicofani. A l'ouest et au nord, il ne dépasse pas l'altitude de 400 mètres.

L'éocène est formé principalement de grès, de schistes gréseux micacés, de calcaire albérèse, de marnes, de calcaires à fragmentation spathique (c'est-à-dire sillonnés de fissures remplies de calcite) et de pouddingues nummulitiques.

Les nummulites sont toujours à la base de l'éocène, formant ainsi un niveau de repère ; mais il est très difficile de classer tous les autres terrains, car nulle part on ne trouve de fossiles.

Le trachyte lui-même ne donne aucune indication à cet égard, car il repose aux divers points où on l'a étudié sur des terrains de nature bien différente : calcaire albérèse à Pian Castanio, grès azurés à Santa Fiora, et schistes gréseux à Arcidosso.

Quoi qu'il en soit, on peut distinguer dans l'éocène, en allant de bas en haut, les strates suivantes :

1° Le calcaire nummulitique, dont le maximum de développement est au Monte Labbro. Cette montagne dénudée est entièrement constituée de nummulites. Ces nummulites, qui ont parfois 1 centimètre de diamètre, sont associées à des débris de foraminifères et de crinoïdes,

association qui a fait supposer qu'en certains points on avait affaire à de véritables atolls. Près de Castellazare notamment, au sommet de la montagne de la Penna, on a un écueil de roches nummulitiques et madréporiques, sur lequel on retrouve tous les détails de forme qui caractérisent les atolls. Là, les nummulites étant très petites, on ne les distingue pas à première vue et on ne voit qu'une roche grise compacte. Mais en polissant cette roche et en l'observant à la loupe, on reconnaît sa véritable nature.

Dans leur partie inférieure, les calcaires nummulitiques alternent avec des schistes argileux rougeâtres pleins de beaux fucoïdes et avec des calcaires gris compacts à cassure conchoïdale.

2° L'éocène moyen formé de grès macigno à nummulites.

3° L'éocène supérieur ou ligurien, qui se subdivise lui-même en trois étages :

A. Le calcaire marneux à fucoïdes ;

B. Les argiles écailleuses et les roches ophiolitiques ;

C. Le calcaire albérèse et les grès à fucoïdes.

Près de Vallerone, on observe dans le calcaire albérèse des euphotides et des serpentines diallagiques avec de petites masses stéatiteuses, des dendrites de carbonate de cuivre et de la pyrite de fer. En recherchant le minerai de cuivre, on a trouvé un peu d'oligiste, comme dans les serpentines du Monte Ruffoli, près de Salines (Toscane). L'oligiste se trouve sous forme de lamelles minces disséminées ou groupées dans une gangue de calcite et de stéatite.

A l'est, près de la Triana, on retrouve les mêmes circonstances. En plusieurs autres points du Monte Amiata et toujours dans l'éocène, on a de pareils gisements ophiolitiques, par exemple dans la vallée de la Reciola et

près de Pian Castaniao. A Pian Castaniao, les lames brillantes du diallage ont un tel éclat qu'elles ont fait donner à l'endroit le nom de Vena dell' Argento (la veine d'argent).

Au-dessous des couches à nummulites, on a des terrains qui, malgré l'absence de fossiles, ont été rapportés au crétacé. Ces terrains sont constitués par des calcaires gris clairs pleins de foraminifères microscopiques ou par des schistes et calcaires rouges très argileux.

En allant de haut en bas, on distingue les couches suivantes :

1° Schistes rougeâtres à fucoïdes alternant avec des calcaires siliceux d'un gris clair. Dans ces calcaires, on trouve au microscope des foraminifères.

2° Schistes rouges argileux et calcaires rouges marneux.

3° Formation puissante de schistes rouges marneux en partie manganésifères et en partie jaspeux. A Terra Rossa, le manganèse formait de petites lentilles intercalées dans les schistes et a donné lieu à une exploitation à ciel ouvert.

Avec le manganèse on trouve aussi dans les schistes crétacés de minces lames interstratifiées d'un sulfure de cuivre noir avec du cuivre natif et du carbonate de cuivre résultant de l'oxydation du sulfure.

La *fig.* 3, Pl. IV, montre quelles sont les positions respectives des divers terrains de Stribugliano à Arcidosso.

La présence de lambeaux nummulitiques en écueils au-dessus du crétacé montre que toute la masse sédimentaire du Monte Amiata était submergée au commencement de la période éocène.

Pendant cette période ou à peu près, le terrain participa au soulèvement des Apennins, car le pliocène arrive en discordance de stratification sur les flancs de l'Amiata s'élevant à 800 mètres à l'est et à 600 mètres au plus à l'ouest.

Ainsi, le terrain, complètement émergé pendant la pé-

riode miocène, s'était affaissé pendant la période pliocène et a subi un nouveau soulèvement qui l'a amené à la hauteur actuelle. On trouve, d'ailleurs, en beaucoup de points de l'Italie la trace d'un tel soulèvement postpliocénique ; mais c'est probablement au Monte Amiata qu'il a atteint son maximum d'amplitude.

Quant à l'éruption trachytique, Savi, Meneghini et Pareto ont jugé qu'elle était postpliocénique, se fondant sur ce fait que le pliocène qui entoure le trachyte n'en contient aucun fragment. De plus, à Radicofani, on a une éruption nettement postpliocénique, puisque le basalte recouvre le pliocène. Ajoutons que l'éruption a dû se faire un terrain émergé, car nulle part le pliocène ne dépasse l'altitude de 800 mètres.

Éruption trachytique. — Nous avons dit que les trachytes forment une énorme masse conique couvrant les roches sédimentaires et sur laquelle il ne s'est déposé aucun terrain.

La *fig.* 4 donne le profil du Monte Amiata, vu de Siene, et montre bien la forme de la coupole trachytique. Cette coupole a une superficie d'environ 130 kilomètres carrés et présente en plusieurs points, notamment à Viso, à Seggiano et à Santa Fiora, des lambeaux allongés rappelant par leur forme les coulées de lave des volcans.

En général, la masse présente à sa surface un amas de gros blocs plus ou moins arrondis et quelquefois une grossière division prismatique.

Près de Santa Fiora, au contraire, on a des strates d'épaisseur constante avec des plis et contours comme en présentent les couches sédimentaires. On peut affirmer qu'il n'y a pas là une formation tufacée due au remaniement par les eaux de détritus volcaniques, car la texture cristalline est la même qu'ailleurs, c'est-à-dire nullement détritique.

Le trachyte du Monte Amiata ne présente, comme nous avons vu, que peu de variétés. Celle qui domine est la ryolithe de von Rath, composée d'une pâte felspathique d'un gris clair paraissant amorphe et quelquefois bulleuse avec de petits cristaux disséminés de sanidine, d'oligoclose, de mica noir, et plus rarement des cristaux verts d'augite de 2 millimètres de longueur en moyenne et sur lesquels sont plantés de petits octaèdres de magnétite.

Ces dernières circonstances caractérisent la variété que l'on trouve à la base de la formation.

Une autre variété assez répandue et formant à elle seule presque toute la partie occidentale de la montagne jusqu'à la cime est un trachyte porphyroïde analogue au précédent, mais d'un gris plus foncé avec de gros cristaux de sanidine. L'augite y abonde et s'y rassemble en certains points.

Les cristaux de sanidine ne semblent pas avoir d'orientation dominante et sont généralement associés deux à deux. A l'intérieur de ces cristaux, on retrouve le mica, l'augite et les petits grains vitreux que nous avons signalés dans la pâte. Tout le long de la route qui va d'Arcidosso au sommet de la montagne, on trouve à terre de ces cristaux isolés par la décomposition de la roche.

Près du sommet, on a une pâte rougeâtre avec des cristaux blancs de sanidine. Cette variété semble se rapprocher beaucoup de la précédente, dont elle ne diffère que par la couleur rougeâtre du mica et du felspath. On pourrait la comparer à une pouzzolane.

A Pian Castaniao, on a trouvé dans le trachyte même des traces de cinabre et l'on peut voir de curieux échantillons de ce trachyte au musée de Massa Marittima. Nous reviendrons sur ce fait intéressant pour la détermination de l'âge des émanations cinabrifères.

Il est à noter que les diverses variétés que nous avons

signalées ne forment pas des coulées distinctes. En réalité il y a passage graduel d'une variété à l'autre.

Inclusions dans le trachyte. — Nous avons parlé des *anime di sasso* (âmes de pierre), c'est-à-dire de ces fragments d'un trachyte bulleux et scoriacé que l'on trouve englobés dans les autres variétés de trachyte.

Généralement, ce sont des galets d'une roche éruptive celluleuse et de couleur sombre ou des fragments plus ou moins anguleux de graphite compact.

Les galets celluleux ont une forme ellipsoïdale avec un diamètre variant de 20 à 60 centimètres. Les fragments de graphite se rencontrent surtout à la base de la masse trachytique, et leur longueur ne dépasse pas 15 centimètres.

Voici les résultats de l'étude faite sur quelques échantillons, par M. Lotti :

1. Trachyte ordinaire avec un fragment ellipsoïdal formé de felspath blanc, de graphite et de mica noir. A la surface de contact, le trachyte est ponceux et les cristaux de sanidine sont très gros.

2. Trachyte avec un fragment formé des mêmes éléments que la masse elle-même, mais avec prédominance du mica et présence d'un peu de graphite. Autour du fragment on a de gros cristaux de sanidine, la pâte du trachyte devient ponceuse et prend une couleur rouge orangée. On observe, en outre, dans l'inclusion des grains d'oxyde de fer aussi rouges que du cinabre.

3. Trachyte avec un fragment ellipsoïdal constitué superficiellement de graphite compact et à l'intérieur de mica, de felspath blanc et de parcelles de graphite. Le graphite superficiel brûlé dans l'oxygène a perdu 30 p. 100 de son poids.

4. Inclusion sphéroïdale celluleuse de pâte grise foncée, formée de felspath, de mica dominant et d'augite en

petits cristaux. Les cellules n'ont pas plus de 1 centimètre de diamètre. Parmi elles, quelques-unes sont remplies de sanidine jaunâtre cristallisée et d'autres d'une zéolithe fusible; d'autres enfin sont tapissées de cristaux verdâtres d'apatite. Détail à noter, le fragment ne paraît avoir subi aucune altération de la part du trachyte.

5. Inclusion ellipsoïdale semblable à la précédente, mais à pâte plus claire. Les cellules étant toutes pleines d'un silicate blanc, on a là une véritable roche amygdaloïde. Des cristaux d'augite longs de 1 centimètre environ sont distribués porphyriquement dans la masse.

6. Fragment arrondi, violet sombre, formé de mica et de felspath rougeâtre en petits cristaux. La jonction à la masse du trachyte se fait par une pâte pétrosiliceuse compacte.

7. Inclusion celluleuse amygdaloïde et de couleur cendrée, formée de mica, de felspath et d'augite. Les cellules contiennent du felspath rougeâtre ou du felspath blanc avec un peu de mica noir.

8. Inclusion doléritique noire, non amygdaloïde, à cellules fines, rude au toucher. Elle est formée d'augite, de felspath et de biotite. La teneur en silice est de 46,47 p. 100.

9. Fragment gros comme un œuf, irrégulier, noir, compact, à cassure conchoïdale et qu'on pourrait prendre pour un calcaire albérèse très argileux. C'est un basalte compact fondant au chalumeau et dans lequel le microscope révèle la présence de l'olivine.

Si l'on compare les inclusions celluleuses aux basaltes à péridot de la montagne voisine de Radicofani, on trouve une grande analogie, mais les inclusions sont généralement plus pauvres en olivine.

Nous avons dit que le trachyte n'a généralement pas altéré les fragments qu'il englobait. On ne trouve pas non

plus d'altération ou seulement une altération très légère au contact du trachyte et des sédiments.

Terre bolaire et farine fossile. — Au trachyte se rattachent deux matières intéressantes, la *terre bolaire* et la *farine fossile.*

La terre bolaire ou ocre jaune est exploitée à Castel del Piano, à Arcidosso, à Pian Castanaio et en divers autres lieux de l'Amiata. Elle se trouve aux points où le trachyte forme des dépressions qui ont pu recevoir des eaux ferrugineuses.

Le gisement des Mazzarelle, au-dessous de Castel del Piana, est le plus activement exploité. Près d'Arcidosso, le dépôt semble s'être fait sur des végétaux. Il est très léger et contient des concrétions de limonite.

La découverte de flèches en pierre dans quelques-uns de ces gisements a donné à croire que ces dépôts étaient postérieurs à l'apparition de l'homme et, bien que le fait ne semble pas absolument prouvé, il n'a rien d'invraisemblable.

C'est dans des conditions analogues que l'on trouve la farine fossile formée de dépouilles siliceuses de diatomées. Elle contient environ 80 p. 100 de silice, 8 p. 100 d'alumine et d'oxyde de fer, et 12 p. 100 d'eau. Il y a un gisement près de la fontaine publique de Castel del Piano et un autre près de Santa Fiora. Avec cette farine fossile, on fait des briques plus légères que l'eau. On a aussi vérifié que, pour la fabrication de la dynamite, le kieselgur du Hanovre et de la Bohême pouvait être remplacé par la farine fossile de l'Amiata.

Il doit y avoir une certaine relation entre ces dépôts de silice pulvérulente et les stalactites siliceuses appelées perles de Santa Fiora, qu'on trouve dans certaines fentes du trachyte. Ce sont également les traces de l'action d'eaux thermales siliceuses.

Eaux minérales.— Nous devons parler maintenant des innombrables sources thermales du Monte Amiata. Ces sources sont les derniers signes de l'activité volcanique dans cette région.

La plus célèbre est la source sulfureuse de San Filippo, dont les eaux à la température de 43° sortent d'une puissante formation de travertins à laquelle elles ont donné naissance.

Près du torrent Rondinaio sort une eau ferrugineuse et carbonique dite l'Eau sainte.

A l'Abbadia, on a une source sulfureuse.

A la base méridionale de la montagne, à Polleraia, est une source ferrugineuse et sulfureuse intermittente.

A 6 kilomètres de Santa Fiora, on trouve la source saline de Bagnole, source très fréquentée par les habitants de la Maremme de Grosseto, pour la guérison des maladies du foie, si fréquentes sous ce climat insalubre.

Ces sources carboniques et sulfureuses se trouvent dans un périmètre assez restreint tout autour des trachytes, et leur relation avec les trachytes est évidente.

Conclusion. — De ce qui précède, on peut conclure que le Monte Amiata a été un volcan comme l'entrevit Micheli, en 1734. Mais ce fut un volcan, d'un genre spécial, analogue aux volcans qui ont donné les dômes du centre de la France, c'est-à-dire un volcan à éruption relativement tranquille. Beaucoup de caractères rapprochent les deux régions et la domite est assez analogue aux trachytes de l'Amiata, dont elle diffère cependant par l'absence d'inclusions.

La présence de ces inclusions est assez difficile à expliquer.

Ce ne sont pas des bombes volcaniques, car elles n'en ont ni les caractères ni la forme. Ce ne sont pas non plus des morceaux arrachés à la surface, car on ne s'ex-

pliquerait pas leur forme arrondie, ni la présence du graphite. Il est probable que ces fragments ont été pris à de grandes profondeurs, mais il serait difficile de préciser dans quelles conditions.

Gîtes de mercure.

Nous rappelons ici les noms des mines qui ont donné lieu à des travaux de recherche ou d'exploitation. Ce sont :

L'Abbadia San Salvador, où l'on a trouvé un peu de cinabre dans le trachyte (recherches).

Pian Castanaio (recherches).

Le pic de la Volpe (recherches).

Les Solfarate, près du torrent Scabbia, affluent de la Fiora (recherches).

Le Siele (en exploitation).

Le Cornacchino (en exploitation).

Ces deux dernières mines sont séparées par la montagne de la Penna, et la *fig.* 5, Pl. IV, est une coupe de cette montagne passant par les deux mines. Le mode de gisement du mercure et la forme des amas y sont grossièrement représentés.

La montagne de la Penna est constituée de haut en bas des terrains suivants :

1° Atoll de calcaire nummulitique et madréporique appartenant sans doute à l'étage éocénique.

2° Schistes et calcaires marneux manganésifères à grain très fin et à nombreuses fissures remplies de calcite.

3° Calcaires marneux non manganésifères. C'est dans ces calcaires que se trouvent les principales masses de cinabre sous forme d'amas irrégulièrement répartis et de forme irrégulière.

4° Au Cornacchino, on trouve au-dessous des calcaires

marneux cinabrifères des couches de silex madréporiques et de couleur grisâtre. Ces couches, très dures à abattre, se délitent rapidement à l'air, les actions atmosphériques donnant lieu à une fissuration assez régulière en parallélipipèdes rectangles à base horizontale.

De petits filons remplis d'un cinabre très pur forment un réseau irrégulier dans ces couches siliceuses, et ces filons furent exploités avant les amas une première fois par les anciens et une seconde fois lors de la reprise des travaux.

5° Marnes et calcaires rappelant très exactement le calcaire albérèse et présentant tout un réseau de fissures remplies de calcite.

Le minerai se présente sous deux formes différentes, en filons ou en couches.

Filons. — Ce qui caractérise les filons dans lesquels on a d'abord exploité le cinabre, tant au Cornacchino qu'à Siele, c'est leur extrême irrégularité due sans doute à ce qu'ils se sont produits dans des couches déjà très fissurées.

A Siele, on a exploité d'abord en descendant de petits filons très irréguliers dont quelques-uns presque horizontaux ont été qualifiés de filons couches par M. Petiton. Autant qu'on en peut juger aujourd'hui, ces filons traversaient des couches d'un calcaire assez pur ou même de calcaire spathique. L'équivalent de ces couches n'a pas été retrouvé au Cornacchino. A 110 mètres de profondeur, on trouva les calcaires marneux dans lesquels le cinabre s'est déposé sous forme d'amas, et l'on vit bientôt que cette partie de la mine était la plus importante.

Au Cornacchino on a suivi une marche inverse, et c'est en allant de bas en haut qu'on est arrivé à trouver le minerai en amas dans les marnes. Au début, on suivit les filons qui traversent les couches de silex, et c'est dans

cette partie de la mine qu'on trouva des travaux anciens. Aux épontes de ces filons, le silex a subi une altération notable due probablement à l'influence des eaux acides qui ont amené le cinabre. Il est très blanc et se réduit facilement en une fine farine.

Amas. — Le plus souvent, le cinabre imprègne des argiles qui remplissent des cavités irrégulières dans les calcaires marneux. A Siele, toutefois, il n'est pas rare de trouver des blocs de cinabre pur ayant plus de 1 mètre cube de volume.

L'imprégnation des argiles est quelquefois si faible que sur une cassure fraîche on ne distingue rien. Vient-on à écraser et polir la surface de l'argile au moyen d'un coup de pioche, par exemple, on broie les petits cristaux de cinabre et l'on obtient une teinte générale rouge.

L'intensité de cette teinte et le poids des échantillons permettent aux personnes expérimentées d'apprécier avec assez de précision la richesse du minerai.

Au point de vue de l'origine du gîte, il est intéressant de noter les faits suivants :

1° Les argiles plus ou moins cinabrifères ou même absolument pauvres remplissent des cavités irrégulières dans la roche en place.

2° Ces cavités ont toujours des formes arrondies et, quand on enlève toute l'argile d'une cavité, le calcaire en place ne présente jamais d'angles vifs.

3° Toutes les cavités communiquent entre elles, bien que l'exploitation ne fasse pas toujours découvrir le boyau qui réunit deux cavités.

4° Parfois, et surtout dans les plus grandes cavités, on trouve une brèche formée de calcaire intact et d'argile.

5° Dans certaines parties de l'argile on voit très nettement tout un réseau de petites fissures remplies de cinabre.

Composition des minerais. — Outre le cinabre, on a trouvé en certains points de la mine de Siele des sous-sulfures de mercure pouvant être représentés par la formule Hg^2S et qu'à cause de leur apparence assez semblable à celle de la suie, on désigne sous le nom de *neri* (noirs) Ces neri se réduisant très facilement, on a toujours trouvé avec eux un peu de mercure natif.

La pyrite de fer est associée au cinabre dans les argiles et les filons en sont généralement exempts. La pyrite est très abondante au Cornacchino.

La présence de la pyrite semble devoir expliquer la présence du gypse, car on trouve le gypse surtout là où il y a beaucoup de pyrite. Au Cornacchino, on trouve dans toute la masse argileuse de beaux cristaux de gypse ayant en moyenne de 4 à 5 centimètres de longueur. Il est possible aussi que le gypse résulte de l'attaque directe des calcaires et des marnes par des eaux filoniennes sulfuriques.

Quant à la calcite, sa présence est due probablement à un phénomène secondaire, car les eaux d'infiltration en déposent encore aujourd'hui dans toutes les fissures qu'elles traversent.

Association de l'antimoine au mercure. — L'association de la stibine au cinabre et l'analogie qui existe entre les gîtes de ces deux substances est un fait assez remarquable et plusieurs fois constaté, en Toscane du moins.

Ainsi, longtemps après qu'à Selvena del Morone on eut renoncé à trouver du cinabre en quantité exploitable, on continuait des recherches, en se proposant pour but l'exploitation de l'antimoine, que l'on trouve là associé à une gangue quartzeuse, mais dans des conditions de gisement tout à fait analogues à celles du mercure. Aujourd'hui encore les paysans retirent de Selvena un peu de stibine qu'ils fondent pour en faire une sorte de plomb de

chasse. Ils désignent même vulgairement la stibine sous le nom de plomb.

A la mine d'antimoine de Cetine di Cotormano, près de Siene, mine qui, bien qu'étant dans des terrains triasiques, offre beaucoup d'analogie avec les mines du Monte Amiata par son irrégularité et par l'association du minerai à des argiles, on a trouvé aussi un peu de mercure, très peu, à la vérité.

Enfin, dans la vallée même de la Fiora, on a étudié une mine où l'antimoine se présente associé au mercure dans des conditions dignes d'être notées : c'est la mine de Monticchio, dans la colline de Monticchio, qui s'élève à une altitude de 150 mètres, sur la rive droite de la Fiora. Cette colline est constituée exclusivemet de terrains éocènes, dans lesquels on distingue du calcaire albérèse, des schistes marneux, du macigno et du calcaire nummulitique.

Au-dessus du calcaire nummulitique on a trouvé de l'antimoine associé à du calcaire cristallin et sans quartz. Le calcaire cristallin est à grain saccharoïde et a une couleur très variable, rose, jaune, rouge ou d'un gris bleuâtre. Quelquefois aussi le calcaire a un aspect bréchiforme. C'est dans cette masse calcaire qu'à Fonte Rossa les travaux ont fait trouver des veines et nodules de stibine généralement bien cristallisée, mais toujours en petite quantité.

Plus bas, dans le calcaire nummulitique, on trouve la stibine en petits filons et associée à de la pyrite de fer. Ces filons forment un réseau très irrégulier, et, aux points de rencontre des filons, on a parfois des concentrations de stibine ayant plus de 1 mètre cube de volume. Ce sont les *stelle* (étoiles). Quelquefois aussi, des cristaux incolores de fluorine sont comme enfilés sur les aiguilles de stibine.

Une galerie de recherche a rencontré, entre le calcaire

et les schistes argileux, un filet de cinabre avec de la limonite. La présence d'une source d'eau chaude, appelée Bucca del Vento (bouche du vent), complète la ressemblance entre ce gîte et celui du Cornacchino.

Age et origine des gîtes. — Tous les caractères que nous avons signalés pour les parties argileuses des gîtes montrent assez que les argiles proviennent de l'attaque en place des roches encaissantes par des eaux acides. Ainsi s'expliquent les formes arrondies des masses argileuses, leur jonction par d'étroits boyaux et aussi leur couleur, qui est à peu près la même, en général, que celle de la roche. L'existence de brèches argileuses, où l'on trouve des fragments de calcaire intact empâtés dans l'argile, peut aussi s'expliquer par des effondrements partiels qui ont dû se produire à la suite des dissolutions locales. Il serait sans doute difficile de présumer quelle était la nature de ces eaux acides, mais on peut affirmer que leur venue a accompagné ou même précédé la venue du cinabre. Si en effet ces eaux résultaient du lavage des pyrites par les infiltrations, on ne trouverait pas le cinabre en petits filons dans l'argile et dans les fragments où l'on observe ce phénomène; il est bien évident que le mercure est arrivé après la formation de l'argile. On aurait de plus quelque peine à admettre que des eaux légèrement acides, et ne lavant que des quantités très minimes en somme de pyrite, aient pu donner lieu à un phénomène de dissolution aussi puissant que celui qu'on observe.

A Cetine di Cotorniano, près de Siene, on trouve des argiles associées à l'antimoine dans les mêmes conditions, et là, la présence de quantités notables de soufre natif donne une indication sur la nature du dissolvant de l'antimoine. On a trouvé aussi du soufre, mais en très faible quantité, à la mine du Cornacchino.

Pour le cinabre qui s'est déposé dans les filons, on peut expliquer sa présence de deux façons différentes : ou bien il est dû à des infiltrations lentes venant du haut et qui l'auraient amené à l'état de fines poussières ou en dissolution ; ou bien il a été apporté directement du fond par les eaux filoniennes. La première hypothèse semble justifiée par ce fait que le minerai des filons n'a pas la même composition que celui des argiles, étant généralement très pur, exempt de pyrite et presque pulvérulent. Il est bien entendu, d'ailleurs, que cette hypothèse ne s'applique qu'aux filons que l'on a exploités, et qu'il doit exister un ou plusieurs filons véritables dont le remplissage s'est effectué de bas en haut.

Quelle est l'époque de la venue du mercure ? Cette époque est évidemment très récente, puisque l'on a trouvé du cinabre dans le trachyte à l'Abbadia San Salvador, et que le trachyte est postpliocénique. Même en admettant qu'en ce point la présence du cinabre soit due à un phénomène de dissolution secondaire, il n'en reste pas moins certain que le cinabre est au plus d'âge tertiaire. Nous ne citons que pour mémoire le fait que dans la mine du Cornacchino on a trouvé un crâne humain minéralisé, car bien que le cinabre soit insoluble dans l'eau, on peut admettre qu'il y a eu là une dissolution secondaire. Toutefois la présence de sources sulfureuses dans le voisinage montre que, dans la région, il y a toujours une certaine activité filonienne, et les nombreux restes animaux que l'on trouve aux solfarate prouvent que là les dégagements sulfureux sont encore très abondants.

II. — EXPLOITATION DES GÎTES.

Historique. — Les mines de mercure du Monte Amiata ont été exploitées dès la plus haute antiquité. Le cinabre devait être employé au début uniquement comme couleur. Nous avons pu voir, chez M. Jaczinski, divers objets qui attestent l'antiquité de l'exploitation : pointes de flèches en silex trouvées dans la mine, marteaux en grès ou en serpentine, plats en terre d'une forme grossière. Dans la mine même, on voit encore aujourd'hui de vieux boisages, généralement très petits, mais bien conservés.

Une découverte des plus curieuses fut celle que fit M. Jaczinski d'une pièce de monnaie en or à l'effigie de Philippe, roi de Macédoine. La présence de cette pièce, dans la mine du Cornacchino, prouverait que des marchands grecs sont venus acheter le cinabre aux mineurs de la Toscane.

Les Romains continuèrent l'exploitation des mines. On sait que leurs couleurs favorites pour la décoration des maisons étaient le rouge et le jaune. Ils obtenaient la couleur jaune avec de l'ocre et la couleur rouge avec du cinabre. En examinant à la loupe les peintures de Pompéi, on trouve quelquefois des cristaux microscopiques de cinabre. Plusieurs noms de mines ont d'ailleurs une origine latine. Ainsi Selvena vient, par abréviation, de *Silva venarum* (forêt des veines métalliques), qui rappelle à la fois la culture du châtaignier et l'exploitation des mines, c'est-à-dire les deux industries principales du pays.

Travaux actuels. — La mine de Siele a été réouverte en 1846, et bien qu'elle ait déjà produit une grande quantité de mercure dans d'excellentes conditions, on peut dire qu'on n'y a fait jusqu'à présent que des travaux de recherche, poussant toujours de nouvelles galeries en profondeur, sans procéder à l'abatage des parties riches déjà reconnues. Ce mode de travail a eu l'avantage de faire connaître la grande richesse de la mine. Il eût sans doute été imprudent, pour un gîte où le minerai se mon-

trait d'abord irrégulièrement réparti, de s'outiller de suite pour une production considérable et de procéder autrement qu'en payant les installations nouvelles par des prélèvements sur les bénéfices déjà réalisés.

Notre visite à Siele nous a permis de voir des fronts de taille où le cinabre compact et d'un beau rouge paraissait absolument pur. Néanmoins, en l'absence de tout plan et vu l'irrégularité du gite, il doit être très difficile d'évaluer, même approximativement, la quantité de minerai disponible. M. Petiton, qui a essayé de faire une semblable évaluation, ne donne pas les résultats de son travail; mais tout en regrettant qu'un garnissage jointif de planches ne lui ait souvent pas permis de reconnaitre la nature des parois des galeries, il constate que ce qu'il a vu lui a donné une haute idée de la richesse de la mine. Nulle part, peut-être, on n'a du cinabre plus pur ni en plus grande quantité, et la production actuelle est sans rapport aucun avec la production possible.

D'après ce que nous venons de dire sur la direction des travaux, on comprend qu'il n'y ait pas de méthode d'exploitation bien définie. On se contente de pousser l'avancement des galeries en suivant, autant que possible, le minerai, mais sans plan ni règle fixe. Il y a deux puits, dont un seul sert à l'extraction. Ce puits, qui atteint une profondeur de 200 mètres, est armé d'une petite machine d'extraction à un seul cylindre. Les chaudières sont chauffées avec des agglomérés importés d'Angleterre. La cage ne reçoit qu'un wagonnet. Les wagonnets, dont la capacité est d'environ 250 litres, sont en fer et viennent, ainsi que la machine, des ateliers de construction de Milan. A leur sortie de la mine, les minerais sont descendus à l'usine au moyen d'un plan incliné automoteur à deux voies.

Le minerai est abattu le plus souvent au pic et à la pioche, et quelquefois à la poudre.

L'aérage est naturel. L'épuisement se fait à l'aide d'une pompe à vapeur.

Au Cornacchino, comme à Siele, on a procédé aux travaux de recherche au moyen de prélèvements sur les bénéfices, car le gîte paraissait au début plus pauvre et plus irrégulier encore que celui de Siele. Là aussi, la principale règle de l'exploitation consiste à ne jamais sortir du minerai quand on l'a rencontré, car il y a bien peu d'indices qui puissent guider le mineur dans la recherche du minerai (tout au plus quelquefois la couleur des argiles), et, d'autre part, les travaux dans le stérile sont toujours coûteux. On ne remblaie pas les travaux et il y subsiste parfois d'assez grands vides.

La difficulté que l'on éprouve à produire la force motrice à bon marché, en un point où l'eau et le bois sont en petite quantité, a imposé à la mine du Cornacchino des règles spéciales. On y dirige l'exploitation de façon à n'avoir jamais à faire mécaniquement l'extraction ni l'épuisement, et cela a été facile jusqu'à présent, puisqu'on est arrivé aux parties les plus riches en allant de bas en haut.

III. — TRAITEMENT DES MINERAIS.

Préparation mécanique. — Les minerais se présentent sous trois formes différentes :

1° Cristaux indistincts à l'œil nu, disséminés dans l'argile ;

2° Nodules de grosseur très variable ;

3° Morceaux compacts de cinabre presque pur. Ces morceaux proviennent des gros rognons que l'on trouve dans les argiles.

Les minerais de Siele étant en général bien plus riches que ceux du Cornacchino, la préparation mécanique n'a,

relativement, que peu d'importance dans cette mine. La laverie, plus petite que celle du Cornacchino, était en chômage lors de notre visite.

Au Cornacchino, la laverie comprend 15 débourbeurs, 1 trommel, 8 bacs à la main, 3 tables dormantes et 1 labyrinthe.

Le bas prix de la main-d'œuvre, surtout de la main-d'œuvre fournie par les femmes, le manque d'eau et la cherté de la force motrice étaient des conditions assez particulières, et le mode de travail adopté pour la préparation mécanique paraîtrait probablement partout ailleurs un peu primitif. En fait, il semble que le travail se fasse bien et économiquement.

Tandis que la teneur moyenne des minerais est, à Siele, de 30 p. 100 de mercure, elle n'est, au Cornacchino, que de 2 à 3 p. 100, et on doit, par la préparation mécanique, arriver à une teneur de 25 à 35 p. 100, suivant qu'il y a plus ou moins de pyrite. On pousse l'enrichissement d'autant plus loin qu'il y a plus de pyrite.

La première opération est un débourbage. Les débourbeurs sont de simples caisses rectangulaires ayant $1^{m},50$ environ de longueur et $0^{m},50$ sur $0^{m},50$ comme section, avec une distribution d'eau à une extrémité, et une grille pour le départ des boues à l'autre extrémité. On met dans chaque débourbeur une certaine quantité de minerai, et deux femmes le retournent avec de petites pelles étroites. Au sortir du débourbeur, le minerai passe dans un trommel mû à la main et constitué par des barres de fer longitudinales distantes de 1 centimètre.

Les morceaux de minerai qui n'ont pas pu traverser le trommel sont triés à la main ; les autres vont aux bacs à main. Pour éviter que le stérile ne traverse la grille avec un peu de minerai et pour avoir une couche de minerai bien pur lorsqu'on vide le bac, on laisse toujours sur la grille une certaine épaisseur de minerai. D'ailleurs, les

femmes qui font ce travail arrivent bientôt à avoir une grande habileté et opèrent le lavage avec peu d'efforts.

Pour le traitement des fins, on a des tables dormantes de 2 mètres de longueur et servies chacune par deux ouvrières. C'est le travail qui demande le plus d'attention et le plus d'expérience. Les femmes remontent constamment le minerai sur la table à l'aide de leur petite raclette, et ont bientôt dans le haut de la table du minerai riche.

Pour les boues et les eaux qui ont servi au lavage, on a un labyrinthe au sortir duquel les eaux traversent une série de caisses séparées par des cloisons disposées en chicane, de façon à modifier à chaque instant la vitesse verticale de l'eau et à faire déposer les dernières traces de cinabre.

Le refus de la laverie ne donne plus trace de mercure à l'analyse chimique, mais la reprise sur les tables dormantes y révèle la présence d'environ 1/1000e de cinabre.

La laverie du Cornacchino occupe quarante-cinq femmes et peut traiter environ 40 tonnes de minerai par jour. Le prix moyen de la journée d'une femme étant de 60 centimes et l'installation de la laverie étant très simple, l'enrichissement d'une tonne de minerai revient certainement à moins de 1 franc. Il est probable que des installations moins sommaires donneraient difficilement un meilleur résultat.

Fours à cornues. — Le minerai enrichi est traité dans des fours à cornues ou dans des fours continus.

L'usine de Siele comprend quatre fours à trois cornues. Le traitement aux cornues consiste à mélanger le minerai avec de la chaux vive, à chauffer les cornues et à condenser le mercure, qui distille après avoir été mis en liberté par la combinaison du soufre avec la chaux.

Le minerai n'étant pas analysé, on met toujours à peu près les mêmes quantités de chaux et de minerai, soit pour chaque cornue :

200 à 250 kilogr. de minerai,
40 kilogr. de chaux vive.

On force un peu la proportion de chaux quand le minerai est notablement pyriteux.

Les cornues (voir Pl. IV, *fig.* 6) sont des cornues en fonte ayant à peu près la forme des cornues à gaz. Après essai, les cornues en terre ont été rejetées comme trop poreuses. Les dimensions principales des cornues sont les suivantes : longueur $2^m,40$, largeur $0^m,60$, hauteur $0^m,30$. Les oreillettes figurées à l'avant de la cornue servent à fixer la porte. On lute les joints à l'aide d'une boue formée d'un mélange d'argile et de farine fossile.

La chauffe d'un four à trois cornues est disposée pour brûler du bois, et ses dimensions sont les suivantes :

Longueur.	$0^m,50$
Largeur.	$0^m,40$

Deux carneaux recueillent les gaz brûlés des deux côtés du four et les conduisent à la cheminée.

Une opération dure de 7 à 8 heures. On chauffe d'abord très lentement et on n'arrive que progressivement au rouge vif. Une cornue dure en moyenne deux ans avant d'être hors de service.

On consomme environ 1 tonne de bois pour 1 tonne de minerai.

Le mercure qui distillle des cornues va se condenser dans des caisses pleines d'eau. A cet effet, au bec de chaque cornue est fixé un tube en fonte qui plonge dans l'eau d'un bassin commun à toutes les cornues. L'appareil de condensation est donc des plus simples.

Afin d'éviter les vols de mercure, on tient toujours fermée à clef la chambre de condensation. L'atmosphère de cette chambre est viciée par des émanations mercurielles et sulfureuses ; les parois sont même tapissées de soufre et de sous-sulfure de mercure.

Dans une expérience faite sous ses yeux, M. Petiton a constaté, par l'analyse, que la perte en mercure était d'au moins 28,68 p. 100, et cela malgré une distillation plus soignée sans doute qu'à l'ordinaire, puisqu'elle était faite en sa présence.

Outre les pertes dues à une condensation incomplète, il y en a d'autres qui sont dues à la formation de sous-sulfures de mercure ou de *neri*. Ces neri se forment principalement quand le minerai est humide ou pyriteux ou qu'on n'a pas mis une quantité suffisante de chaux, ou quand le mélange a été fait sans soin. Ils se condensent dans les caisses à mercure sous forme de poussières noires qui surnagent avec les autres impuretés au-dessus du mercure.

On puise le métal au moyen de cuillers en fer ; on le verse dans des baquets en fonte, et on le laisse bien reposer ; les neri et autres impuretés montent à la surface ; on les écume et on met le mercure en bouteilles.

Ces neri peuvent encore donner une petite quantité de mercure, car traités à froid par de la chaux vive, ils se décomposent. On les remue donc avec de la chaux au moyen de balais dans des rigoles en fonte, et le mercure coule ; ce qui reste dans la rigole est passé aux cornues.

Il faut signaler ici le danger qui menace les ouvriers chargés du service des cornues en tout temps, et surtout au moment du chargement.

Les tubes de condensation pénétrant dans l'eau de quelques centimètres, il en résulte qu'il y a toujours dans les cornues un excès de pression ; cette surpression facilite les fuites à l'avant des cornues et fait, qu'au moment du déchargement, les vapeurs mercurielles envahissent la chambre de chauffe.

En fait, le service des chauffeurs est un service très pénible et ils restent rarement plus de deux semaines sans être malades. On a donc dû établir un roulement entre les ouvriers de la mine et ceux de l'usine pour ce service. Il en résulte que le travail n'étant pas fait par des ouvriers spéciaux est moins bien conduit.

Au Cornacchino, M. Jaczinski a apporté aux fours à cornues de nombreux perfectionnements, qu'il a bien voulu nous laisser étudier, et qui ont eu pour effet de diminuer considérablement les pertes en mercure, de supprimer tout danger pour les ouvriers attachés au service des fours, et de rendre impossibles les vols de mercure, tout en permettant aux ouvriers de surveiller les appareils de condensation.

Les cornues du Cornacchino sont les mêmes que celles de Siele. Les fours sont des fours à trois cornues, et ils sont associés par groupes de deux. Les *fig.* 7 et 8, Pl. IV, représentent une des moitiés du four.

La chauffe est destinée à recevoir du bois et a $1^m,10$ de profondeur et $0^m,40$ de largeur.

Trois carneaux recueillent les gaz brûlés vers le fond de la chauffe et les conduisent vers l'arrière du four, au-dessous de chaque cornue. Ils reviennent vers la porte des cornues et retournent à la cheminée, en échauffant le dessus et les côtés des cornues. Pour assurer une bonne répartition de ces gaz dans le four, on les fait passer dans la cheminée par trois carneaux verticaux correspondant chacun à une des cornues. Ces carneaux peuvent être facilement ramonés par le dessus du four. Il suffit pour cela d'enlever une plaque mobile qui se trouve au-dessus de chacun d'eux; tous trois ils aboutissent à une conduite horizontale qui mène les gaz à la cheminée commune aux deux fours d'un même système.

Si l'on veut éviter de chauffer une des cornues, soit parce que la distillation du mercure y est terminée, soit pour toute autre raison, on n'a qu'à fermer le carneau correspondant à l'aide d'un registre.

Les cornues, ainsi que le montre la section transversale du four, sont soutenues sur toute leur longueur et se remplacent très facilement. Elles traversent le four de part en part et, pour les dégager, il suffit d'enlever à l'avant et à l'arrière quelques briques mobiles qui servent à fermer hermétiquement le four.

Les *fig.* 9 et 10 représentent les dispositifs adoptés pour condenser le mercure et éviter les vols.

Au bec de la cornue est fixé un tube en fonte A de 12 centimètres de diamètre intérieur. Ce tube est refroidi par un courant d'eau assez lent, qui tombe en cascade dans trois caisses successives.

Le tube A se continue par un tube coudé B dont une branche plonge un peu dans l'eau et dont l'autre est en communication soit avec les chambres de condensation et, après elles, avec la cheminée des fours, soit directement avec la cheminée lors de l'ouverture des cornues.

La caisse qui contient l'eau est simplement en bois et le niveau y est réglé de façon que la communication entre les deux branches du tube coudé soit toujours libre. Il n'y a donc pas dans les cornues une surpression et les vapeurs peuvent s'échapper sans avoir à refouler une petite colonne d'eau.

On a plutôt une dépression due à l'appel de la cheminée, appel qui se transmet même à travers les chambres de condensation.

En évitant ainsi toute perte de métal, on obtient à la fois le bien-être des ouvriers et un meilleur rendement.

Au-dessous du tube B est l'appareil de réception proprement dit.

Le métal tombe dans une cuve en fonte C, mais il est emmené constamment par un tube abducteur D dans une

chambre fermée à clef et il ne peut qu'affleurer au fond de la cuve. Les vols sont ainsi presque impossibles.

Par cette disposition on a réalisé un autre avantage. On peut très facilement surveiller en E la marche de la distillation, puisqu'on voit couler le mercure à mesure qu'il se condense et, si quelque irrégularité se produit, on peut y parer de suite par le jeu des registres. Un fait intéressant est que, lorsque le mercure venant d'une cornue commence à couler, le jet ne s'interrompt presque plus et l'opération est bientôt terminée.

Les vapeurs mercurielles qui n'ont pas été condensées par les tubes A et B peuvent encore l'être dans une grande chambre de condensation où l'on produit une pluie d'eau sous pression. Enfin, les gaz sont évacués par la cheminée.

Nous avons déjà dit que, pendant le chargement et le déchargement des cornues, on profite du tirage de la cheminée des fours pour appeler les gaz contenus dans les cornues en les faisant passer de suite dans la cheminée et non dans les chambres de condensation.

En outre, les portes de l'atelier sont disposées de façon qu'un courant d'air balaie constamment le devant des fours, ce qui contribuerait encore à soulager les ouvriers si malgré tout il se produisait des vapeurs mercurielles.

Four continu. — Nous ne parlerons pas du four continu de l'usine du Cornacchino, car ce four, lors de notre visite, était déjà en chômage depuis quelque temps.

On traite au four à cuve des minerais qui ne contiennent pas plus de 4 p. 100 de mercure. Avec des minerais d'une teneur plus élevée, la proportion des pertes augmente rapidement.

Le four à cuve de Siele est du type d'Idria et a 1 mètre de diamètre et 8 mètres de hauteur. On y charge un mélange de minerai et de charbon de bois au moyen d'une

trémie à fermeture hydraulique. Le minerai a été préalablement pétri à la main en boulettes ayant environ 6 centimètres de diamètre. On procède à la charge toutes les deux heures et chaque charge se compose des quantités suivantes :

Minerai	120 kilogr.
Charbon de bois	10

Dans ces conditions, le four arrive à produire 30 bombonnes par mois, soit environ 1.200 kilogrammes, ce qui est une partie minime de la production totale de l'usine.

On évacue les cendres et les résidus du four en les faisant tomber à travers la grille qui sert à l'arrivée de l'air.

Le mercure se condense dans trois chambres successives où l'on produit une pluie d'eau froide sous pression. Après ces chambres, les vapeurs traversent un tube horizontal de 6 mètres de longueur et arrivent à une dernière chambre surmontée d'une petite cheminée.

Un seul ouvrier suffit pour préparer et amener les charges et, grâce à la fermeture hydraulique, ce service est sans danger. On y emploie assez souvent les convalescents.

VI. — DONNÉES ÉCONOMIQUES.

Main-d'œuvre. — Les ouvriers attachés aux mines sont recrutés dans le pays même et habitent tous le petit village de Castellazare. Ils sont au nombre de 340, hommes et femmes. Intelligents pour la plupart, ils sont en général peu vigoureux, mais leur docilité, leur sobriété et la facilité avec laquelle ils trouvent dans le pays tout ce qui leur est nécessaire font en définitive qu'au Monte Amiata, on dispose d'une excellente main-d'œuvre. Les maîtres mineurs ou *caporaux*, qui dirigent les travaux

souterrains, se font notamment remarquer par leur intelligence naturelle.

Tous les employés des mines sont payés à la journée de travail qui est de douze heures avec des repos pour les repas. Les prix des journées de travail sont les suivants :

Mineurs	1f,50
Manœuvres	1 ,30
Boiseurs	2 ,00
Voituriers	2 ,00
Femmes	0 ,60

Il est alloué à chaque mineur 0f,20 par jour pour l'huile de sa lampe.

Ces salaires, qui semblent très faibles à première vue, suffisent néanmoins largement à satisfaire les besoins des ouvriers. Par cela même, en effet, que la région du Monte Amiata manque de voies de communication et n'a qu'un commerce restreint, les produits qu'elle pourrait exporter : bois, châtaignes, olives, etc., ont peu de valeur sur place.

Malgré l'éloignement de la Maremme, quelques cas de fièvre s'observent chaque année parmi les ouvriers. Ces fièvres et les accidents dus aux vapeurs mercurielles sont les seules maladies qui aient une importance spéciale.

Disons enfin que quelques bandits, protégés par la solitude des forêts (*macchie*), par l'insalubrité de la Maremme et la tolérance de la population, se montrent assez souvent dans le pays.

Minerai. — La teneur des minerais étant en moyenne de 30 p. 100 à Siele et de 2 p. 100 au Cornacchino, on conçoit que le prix de revient du mercure soit plus faible à Siele qu'au Cornacchino, bien que dans cette dernière mine toutes les opérations soient plus soignées et mieux

comprises. Il est difficile toutefois de fixer le prix de revient d'une tonne de minerai, ce prix dépendant essentiellement de l'importance des travaux d'aménagement et des travaux dans le stérile.

Prix de revient. — Donnons d'abord les frais spéciaux du traitement aux cornues d'une tonne de minerai :

Main-d'œuvre (1journée,50)	3f,00
Chaux vive (100 kilogr.)	10 ,00
Bois de chauffage (1.000 kilogr.)	10 ,00
Total	23f,00

soit 0f,08 par kilogramme de mercure pour un minerai à 30 p. 100. Nous pouvons aussi calculer approximativement le prix de revient réel pour l'année 1885. Le calcul suivant s'applique à l'ensemble des deux mines de Siele et du Cornacchino :

En 1885, on a produit 237 tonnes de mercure. On a employé pendant toute l'année 340 ouvriers payés comme il suit :

60 femmes à 0f,60
240 hommes à 1f,50
40 hommes à 2f,00

soit pour l'année, 142.800 francs de main-d'œuvre ou 602 francs par tonne de mercure ou 0f,60 par kilogramme de mercure.

En ajoutant 0f,20 pour les fournitures diverses telles que bois, huile, etc., et 0f,70 pour les frais généraux, on arriverait au prix maximum de 1f,50 pour le kilogramme de mercure.

Le prix de vente est assez variable, et, pendant l'insurrection carliste en Espagne, l'exploitation étant arrêtée à Almaden, le mercure s'est vendu jusqu'à 24 francs le kilogramme. En somme, on constate plutôt une baisse continue du cours et cette baisse est due moins à la concurrence que se font entre elles les mines, qu'aux soins

apportés à la régénération du mercure dans les usines où on pratique l'amalgamation. Le prix moyen à Londres a été de 3f,70 par kilogramme pour l'année 1885 et de 4f,80 pour l'année 1886.

La légère hausse qui s'est produite en 1886 semble due aux ventes de cinabre qui ont été faites en Chine pour la décoration des palais impériaux, à l'occasion de la majorité du souverain.

Production. — Jusqu'en 1879, la mine de Siele fournissait presque tout le mercure extrait au Monte Amiata.

Les chiffres suivants correspondent à une période de quatre années :

1875	116	tonnes de métal.
1876	111	—
1877	130	—
1878	115	—

En 1878, l'usine comprenait déjà quatre fours à trois cornues produisant ensemble 11.200 kilogrammes de mercure par mois et un four à cuve donnant 1.200 kilogrammes par mois.

Déjà, en 1878, l'usine du Cornacchino produisit 6 tonnes de mercure.

Les deux usines occupaient alors 280 ouvriers dont 233 hommes et 47 femmes.

Depuis cette époque, la production s'est rapidement accrue, et, pour l'année 1885, on a les chiffres suivants :

	Ouvriers.	Production.
Mines de Siele et du Cornacchino.	340	237 tonnes de mercure.

LES PRIX DE REVIENT

SUR LES CHEMINS DE FER

Par M. RICOUR, Inspecteur général des ponts et chaussées.

EXPOSÉ.

Les progrès dans la production industrielle ont pour guide principal l'étude des prix de revient. Dans l'industrie des chemins de fer cette étude est non moins féconde que dans toute autre branche de l'industrie humaine. Tout ce qui peut l'éclairer ou la compléter nous paraît à la fois intéressant et utile. C'est ce qui nous a déterminé à rédiger la présente note.

PREMIÈRE PARTIE.

RELATIONS ENTRE LE PRIX DE REVIENT DE L'UNITÉ DE TRAFIC, LA FRÉQUENTATION ET LA DÉCLIVITÉ.

En envisageant à un point de vue d'ensemble le réseau des chemins de fer français, nous avons fait ressortir une relation étroite entre la fréquentation moyenne d'un groupe de lignes et le prix de revient de l'unité de trafic (*). Nous avons déduit les conséquences logiques de cette

(*) *Annales des Ponts et Chaussées*, août 1887. — *Annales des Mines*, septembre-octobre 1887.

relation, conséquences inquiétantes pour les finances de l'État et l'avenir des grandes Compagnies, et nous avons indiqué comme seuls remèdes efficaces pour enrayer le progrès du mal :

1° L'*arrêt des dépenses* de construction des lignes improductives ;

2° La *réduction des dépenses* d'exploitation des grands réseaux français.

En formulant ces conclusions, nous avons en même temps fait ressortir, par des exemples frappants, les économies considérables que des modifications très simples appliquées au matériel moteur et roulant permettraient de réaliser sur les dépenses spéciales à la traction.

Avec une autorité que personne ne lui contestera, le directeur du plus grand des réseaux français, M. Noblemaire, s'associe sans réserve à nos conclusions ; toutefois il estime que la relation que nous avons établie entre le prix de revient de l'unité de trafic et la fréquentation est incomplète, parce qu'elle ne tient pas compte, d'après lui, des déclivités : dès lors toutes les conséquences déduites de notre formule des prix de revient de l'unité de trafic lui paraissent ou inexactes ou au moins contestables. M. Noblemaire ne se borne pas à une critique facile, il fait mieux ; il indique lui-même une formule plus complète du prix de revient, laquelle tient compte à la fois, d'une manière explicite, de la fréquentation et de la déclivité.

Nous croyons que le désaccord n'est qu'apparent et que les considérations développées par M. Noblemaire complètent les nôtres, sans les infirmer.

Les points de vue sont différents : nous avons considéré des moyennes générales : M. Noblemaire a examiné les éléments qui constituent ces moyennes. Une formule spéciale correspond à chacun de ces deux cas. Les deux formules sont empiriques; elles n'ont de valeur que si

elles représentent la réalité des faits. Quoique distinctes, elles doivent être en harmonie l'une avec l'autre. Résistent-elles à cette double vérification? C'est ce que nous chercherons à mettre en lumière.

Voici d'abord notre formule du prix de revient des transports par chemins de fer en fonction de la fréquentation :

$$(R) \qquad P_a = \frac{6.125^f}{F} + 21^f,50.$$

P_a est le prix de revient de 1.000 unités de trafic (*);

F est la fréquentation, c'est-à-dire le nombre de milliers d'unités de trafic par kilomètre et par an.

Que veut dire cette formule? Le voici :

Quand on prend pour l'*ensemble de la France* les lignes d'une même fréquentation F, *le prix de revient moyen* du millier d'unités de trafic de ces lignes est donné par l'expression très simple :

$$\frac{6.125^f}{F} + 21^f,50,$$

expression dans laquelle n'apparaît pas d'une manière explicite la déclivité.

Comment cette formule a-t-elle été obtenue?

Toutes les lignes, au nombre de 210, constituant l'ensemble des réseaux des Compagnies françaises, ont été inscrites les unes à la suite des autres, sans distinction de réseau, dans l'ordre croissant de la fréquentation. Ces 210 lignes ont été ensuite subdivisées dans l'ordre même de leur inscription, en 36 groupes de longueurs variables, dont la moyenne est d'environ 700 kilomètres. Chaque groupe a fourni un prix de revient spécial, un point du diagramme (*fig.* 1) que nous reproduisons ci-après (page 158 *bis*); les 36 points ainsi obtenus se rapprochent

(*) Nous rappelons que l'unité de trafic est représentée par le transport à 1 kilomètre de distance, soit de 1 voyageur, soit de 1 tonne de marchandises.

beaucoup d'une courbe régulière qui a été tracée avec la latte flexible ou règle à poids (*), et cette courbe régulière est elle-même représentée avec une très grande approximation par l'expression algébrique :

$$P_\alpha = \frac{6.125}{F} + 21^f,50.$$

Cette formule, on le voit, est la représentation aussi exacte que possible d'un ensemble de données statistiques. La déclivité n'y figure pas explicitement, c'est un fait, ce n'est pas une hypothèse. Cette formule, d'après la manière même dont elle a été obtenue, n'implique nullement que, pour chaque ligne de fréquentation F considérée isolément, le prix de revient ait la même valeur P_α, mais elle constate que pour un ensemble de lignes de fréquentation F, la valeur moyenne du prix de revient tend vers la limite P_α. En d'autres termes, on peut dire que pour un ensemble de lignes de même fréquentation, les difficultés moyennes résultant des déclivités et de toutes les autres circonstances tendent aussi vers une limite fixe. Mais comment donner une expression numérique à ces difficultés? La connaissance seule des déclivités maxima est insuffisante : il faut tenir compte de la manière dont ces déclivités sont réparties, de la position des dépôts qui desservent les lignes et enfin du sens du trafic. Nous avons fait connaître ailleurs (**) qu'à chaque groupe de lignes de même fréquentation moyenne, desservies par un même dépôt, correspond ce que nous avons appelé la *rampe caractéristique*, quantité déterminée qui tient compte à la fois de tous les éléments dont nous avons parlé plus

(*) Nous avons dressé le même diagramme pour le réseau *isolé* P.-L.-M. Les résultats obtenus sont tout à fait comparables.

(**) *Annales des ponts et chaussées*, septembre 1885; *Annales des mines*, janvier-février 1886.

haut et parmi lesquels le rôle principal revient aux déclivités maxima.

Cela posé, lorsqu'on considère un ensemble de lignes de même fréquentation F, cette valeur de F est étroitement liée à la rampe caractéristique moyenne i_m; elle est en réalité fonction de la rampe caractéristique; on a :

$$F = \varphi(i_m).$$

ou inversement

$$i_m = \psi(F).$$

Le fait existe, il est incontestable; en outre, les principales causes qui le produisent sont faciles à saisir; en effet, d'une manière générale, les grands courants commerciaux s'établissent suivant les vallées et non à travers les montagnes; les grandes fréquentations, à part de rares exceptions (qui influent peu sur la moyenne), coïncident avec les faibles rampes caractéristiques. D'autre part, quand les ingénieurs construisent des chemins de fer dans des régions analogues au point de vue orographique, mais différentes au point de vue commercial, ils tendent à réduire les frais de construction dans les régions les plus pauvres : de là augmentation de la rampe caractéristique, lorsque le trafic est moindre. Enfin, quand un réseau existe à mailles plus ou moins serrées, et que divers chemins peuvent conduire d'un point à un autre, le trafic tend à suivre la direction de moindre dépense; peu à peu, il se crée une répartition stable du trafic, telle que le prix de revient, qui résume l'ensemble du travail fait pour le transport, travail qui a pour principal facteur la rampe caractéristique, est en réalité une fonction simple de la fréquentation. C'est ainsi que pour des causes diverses, les unes naturelles, les autres économiques ou administratives, il s'est établi en France une relation générale entre les rampes caractéristiques et l'importance du trafic, et cette relation est rendue mani-

feste par notre diagramme (*fig.* 1) qui montre que pour 36 groupes de lignes, les prix de revient moyens viennent se ranger régulièrement le long de la courbe hyperbolique

$$(R) \qquad P_a = \frac{6.125}{F} + 21{,}50.$$

Il va de soi, comme nous l'avons indiqué plus haut, que pour un groupe donné de lignes de fréquentation F, les déclivités peuvent être très variables d'une ligne à une autre; la limite vers laquelle tend le prix de revient moyen n'exclut nullement les écarts individuels. Nous avons mis nous-même ces écarts en évidence dans le tableau A annexé à notre travail sur la répartition du trafic en France (*).

Quelle est l'influence des rampes caractéristiques dans ce cas, c'est-à-dire de quelle manière varient les prix de revient P de diverses lignes de même fréquentation F, ayant des rampes caractéristiques différentes?

C'est une question à laquelle nous n'avons pas répondu, que nous avons *omise* parce qu'elle n'entrait pas dans notre cadre. Nous n'avions en vue que la recherche d'une *commune mesure*, d'une *courbe typique*, permettant de comparer dans leur ensemble les résultats économiques des réseaux français et de prévoir les conséquences financières des grands travaux de chemins de fer en cours d'exécution. Mais c'est ici que l'observation de M. Noblemaire tend à compléter notre étude en l'étendant aux éléments constituant notre commune mesure, et aux variations que ces éléments subissent avec les circonstances spéciales à chaque ligne considérée isolément. C'est assurément une question fort importante et fort intéressante, et voici comment elle est résolue d'après M. Noblemaire.

Les résultats comptables de l'exploitation des cin-

(*) Voir *Annales des ponts et chaussées*, août 1887, page 187.

quante-cinq lignes à déclivités variables qui composaient en 1879 le réseau P.-L.-M. ont permis de déterminer le prix de revient de l'unité de trafic en fonction de la fréquentation et du profil.

En conservant les notations déjà adoptées dans notre mémoire, la formule donnée par M. Noblemaire est la suivante :

$$(N) \qquad P = \left(15 + \frac{3.000}{F}\right)\left(1 + \frac{5}{100}i\right).$$

La lettre i correspond aux déclivités en millimètres par mètre.

M. Noblemaire exprime d'ailleurs l'opinion que cette formule établie pour les lignes du réseau P.-L.-M. est applicable à tous les autres réseaux, et qu'elle donne dans la pratique une idée suffisamment exacte de la réalité.

Dans ce cas, cette formule doit nous fournir des indications précieuses sur les *valeurs moyennes* des déclivités des groupes de lignes d'une fréquentation donnée; elle doit, en un mot, faire découvrir la relation $i_m = \psi(F)$, dont nous avons parlé plus haut, c'est-à-dire la limite vers laquelle tend la rampe caractéristique moyenne d'un ensemble de lignes de fréquentation donnée F.

Remarquons tout d'abord que la formule (N) est du premier degré en i : dès lors la valeur moyenne de i pour un ensemble de lignes de même fréquentation F doit correspondre exactement à la valeur moyenne du prix de revient P_m constaté pour ces lignes.

Prenons un exemple :

Pour un groupe de lignes ayant une fréquentation moyenne exprimée par F=3.000, comparable à celle de la ligne de Paris à Marseille, nous savons que la rampe caractéristique est très faible, qu'elle s'écarte peu de 3 à 4 millimètres. Nous savons, en outre, que le prix de revient moyen du millier d'unités de trafic a pour valeur :

soit $P_\alpha = 23{,}54$, d'après notre formule

$$P_\alpha = \frac{6.125}{F} + 21.50,$$

soit $P_m = 24$, d'après la formule ci-après

$$P_m = \frac{6.000}{F} + 22^f,$$

calculée par M. Noblemaire, et reconnue exacte par lui, bien qu'interprétée autrement que par nous, en ce qui concerne la déclivité.

Si dans la formule

$$(N) \qquad P = \left(15 + \frac{3.000}{F}\right)\left(1 + \frac{5}{100} i\right)$$

nous remplaçons F par 3.000 et P par 24, nous devons trouver la valeur de i_m. Or, voici le résultat de cette substitution :

$$24 = \left(15 + \frac{3.000}{3.000}\right)\left(1 + \frac{5}{100} i\right) = 16 + 0{,}80\, i.$$

d'où

$$i_m = \frac{24 - 16}{0{,}80} = 10^{mm}.$$

Cette valeur i_m est *en contradiction manifeste avec les faits :* la rampe caractéristique des lignes dont le trafic correspond à F = 3.000 est beaucoup plus faible que 10 millimètres; elle ne dépasse certainement pas 3 à 4 millimètres. Ainsi la formule proposée

$$(N) \qquad P = \left(15 + \frac{3.000}{F}\right)\left(1 + \frac{5}{100} i\right)$$

est en défaut pour les lignes les plus importantes, celles à grand trafic.

C'est là un cas particulier; nous pouvons la soumettre à une épreuve plus générale et plus décisive.

En effet, si dans cette formule (N) nous remplaçons P par sa *valeur moyenne*, qui est, d'après les calculs de

M. Noblemaire,

$$P_m = \frac{6.000}{F} + 22^f,$$

nous devons trouver la valeur moyenne correspondante de i_m en fonction de F. Voici le résultat de la substitution :

$$\frac{6.000}{F} + 22 = \left(15 + \frac{3.000}{F}\right)\left(1 + \frac{5}{100} i_m\right),$$

ou

$$i_m = 4 \cdot \frac{3.000 + 7F}{600 + 3F}.$$

Telle est, si la formule (N) est exacte, la relation entre la valeur moyenne i_m et la fréquentation F.

Faisons successivement :

F = 50 — 100 — 200 — 500 — 1.000 — 2.000 — 3.000.

Nous aurons :

i_m = 17,9 — 16,4 — 14,7 — 12,4 — 11,1 — 10,3 — 10.

Prix moyens correspondants :

P_m = 142^f — 82^f — 52^f — 34^f — 28^f — 25^f — 24^f.

Ce tableau confirme ce qu'un exemple isolé nous avait déjà fait pressentir; la formule (N) ne résiste pas à l'épreuve; elle donne des valeurs de i très exagérées pour les lignes à grand trafic et insuffisantes pour les lignes à très faible trafic.

Pour les lignes à très faible trafic (F = 50, par exemple), on admet des déclivités de 20 à 25 millimètres et même de 30 millimètres d'une manière courante, soit, en moyenne, 24 à 26 millimètres.

Pour F = 200 — 1.000 — 3.000 — ∞, nous aurions dû trouver approximativement :

i_m = 12 à 14^{mm} — 5 à 6^{mm} — 3 à 4 — 2 à 3^{mm}.

Nous avons marqué ces divers points par un signe ap-

parent sur le diagramme (*fig.* 1, page 158 *bis*) et nous avons tracé la courbe des valeurs de i_m déduites de la formule de M. Noblemaire en traits longs ———— et la courbe des valeurs probables en croisillons + + + +.

Les deux courbes n'ont qu'un point commun; elles sont absolument dissemblables.

En résumé, la formule

$$\text{(N)} \qquad P = \left(15 + \frac{3.000}{F}\right)\left(1 + \frac{5}{100}i\right)$$

n'est pas d'accord avec les faits, tandis que la formule des prix de revient moyens :

$$\text{(R)} \qquad P_m = \frac{6.125}{F} + 21{,}50,$$

déduite des données statistiques de l'ensemble des chemins de fer français est d'autant plus exacte que les lignes considérées sont plus nombreuses. Elle est l'expression d'une loi générale qui peut se traduire en ces termes : « La *rampe caractéristique* moyenne d'un ensemble de lignes de même fréquentation F n'est pas « une quantité arbitraire; elle tend vers une valeur déterminée i_m, de telle sorte que l'on peut poser :

$$i_m = \psi(F),$$

ou

$$F = \varphi(i_m). \text{ »}$$

Les conséquences déduites de cette formule (R) ne sont logiques, cela est évident, que lorsqu'elles sont envisagées elles-mêmes à un point de vue général, comme lorsqu'il s'agit des prix de revient d'un grand réseau ou de la répartition générale du trafic en France. La valeur de la formule (R) n'est donc nullement infirmée par ce fait qu'elle n'est pas applicable à chaque ligne considérée isolément. Lorsqu'on entre dans le détail, la rampe caractéristique de chaque ligne individuelle exerce son influence spéciale, comme l'a très bien fait voir M. Noblemaire, qui a ouvert ainsi la voie à de très utiles recherches; nul mieux que lui n'est à même de les mener à bonne fin; mais la vérification que nous venons de faire démontre que le but n'est pas atteint encore; l'expression empirique

$$\text{(N)} \qquad P = \left(15 + \frac{3.000}{F}\right)\left(1 + \frac{5}{100}i\right)$$

n'est qu'un jalon provisoire. La formule donnant, pour des lignes de même fréquentation F, l'influence de la rampe caractéristique sur les prix de revient de l'unité de trafic reste à établir.

Le problème étant posé, il est naturel de se demander si une expression de la forme

$$P = \left(15 + \frac{3.000}{F}\right)\left(1 + \frac{5}{100}i\right)$$

peut donner une solution approchée en modifiant convenablement les coefficients de chacun des deux facteurs. Nous répondrons « non »; et voici pourquoi :

Dans le deuxième facteur, le coefficient de i est une constante; il en résulte que, si on met en parallèle deux lignes à très faible trafic, rapportant 2.000 francs de recettes, par exemple, l'une en palier, l'autre en rampe de 20 millimètres, le prix de revient a une valeur double sur la ligne à fortes déclivités. Si des lignes à très faible trafic on passe aux lignes à grande circulation, Paris à Lyon, par exemple, pour une même variation dans les pentes, les dépenses augmentent d'après la formule exactement dans la même proportion, c'est-à-dire qu'en passant du palier à la rampe de 20^{mm}, le prix de revient prend aussi une valeur double. Or, sur les lignes à faible trafic, trois trains au minimum circulent dans chaque sens et de lourdes machines traînent quelques rares wagons peu chargés ou quelques voitures à voyageurs presque vides.

Dans ces circonstances, non seulement la dépense ne double pas lorsqu'on passe de faibles déclivités à des déclivités de 20 millimètres, mais c'est à peine si elle augmente de 30 à 40 p. 100. Il en va tout autrement sur les lignes à grand trafic, où les trains circulent toujours à pleine charge. Les frais de traction à eux seuls augmentent dans le rapport de 1 à 5, en passant du palier à la rampe de 20 millimètres. Cet exemple montre clairement que l'impuissance de la formule

$$P = \left(15 + \frac{3.000}{F}\right)\left(1 + \frac{5}{100}\, i\right)$$

à représenter la réalité des faits est radicale : elle résulte de ce que, dans le deuxième facteur, le coefficient de i est invariable. Ce coefficient est nécessairement fonction de la fréquentation : il est plus faible sur les lignes à trafic réduit, plus fort sur les lignes à grand trafic.

Si l'on veut tenir compte des déclivités sous forme de *distances équivalentes*, comme l'a proposé M. Noblemaire, ces *distances équivalentes* doivent varier aussi avec la fréquentation. Or, l'une des conclusions de M. Noblemaire est formulée ainsi :

Distances équivalentes.

1 kilomètre de ligne sera compté pour :

1.000m,	si la déclivité est de	0 à	5mm p. m.	1.600m,	si la déclivité est de	15 à 20mm p. m.
1.200	—	5 à 10	—	1.800	—	20 à 25	—
1.400	—	10 à 15	—	2.000	—	25 à 30	—

La fréquentation est passée sous silence, comme si elle ne jouait aucun rôle. Consultons les faits : voici les résultats comptables constatés sur le réseau P.-L.-M. et consignés dans le mémoire de M. Noblemaire.

Prix de revient de 100 unités de trafic.

DÉCLIVITÉS	IMPORTANCE des fréquentations		RAPPORTS DES PRIX de revient	
	F = 36,5	F = 1.460	F = 36,5	F = 1.460
$i = 0$	104 fr.	17 fr.	1.000	1.000
$i = 10$	122	25	1.173	1.470
$i = 20$	140	33	1.346	1.941

Le rapport des prix de revient est évidemment le même que celui des *distances équivalentes ;* si donc 1 kilomètre de ligne en palier est représenté par 1.000 mètres, 1 kilomètre de ligne en rampe de 20 millimètres aura pour longueur équivalente (en palier), d'après les résultats constatés sur le réseau P.-L.-M.,

1.346m pour une fréquentation F = 36,6

et

1.941m pour une fréquentation F = 1.460.

D'après le tableau des *distances équivalentes* reproduit ci-dessus, la première longueur 1.346 mètres, inférieure à 1.400, devrait correspondre à des déclivités n'atteignant pas 10 à 15 millimètres, et la deuxième longueur 1.941 mètres, qui s'éloigne peu de 2.000, devrait correspondre à des déclivités de 25 à 30 millimètres, tandis qu'en réalité les deux nombres 1.346 et 1.941 s'appliquent à deux lignes de même déclivité, ne différant que par la fréquentation. Les écarts entre les résultats constatés en pratique et les chiffres déduits soit du tableau des *distances équivalentes*, soit de la formule empirique

$$P = \left(15 + \frac{3.000}{F}\right)\left(1 + \frac{5}{100}\, i\right),$$

sont trop considérables pour qu'on puisse considérer la question comme résolue.

D'après l'exposé qui précède, il nous paraît douteux

qu'une formule algébrique assez simple pour être d'un emploi commode puisse traduire des relations aussi complexes. L'emploi de tableaux graphiques analogues à ceux dont M. Lalanne a fourni de nombreux et instructifs exemples faciliterait probablement les recherches et permettrait de figurer la solution du problème sous une forme plus satisfaisante.

Quelques mots encore sont nécessaires pour rétablir le véritable sens d'une loi formulée dans notre notice.

De ce que la déclivité n'apparaît pas d'une manière explicite dans notre formule générale

$$P_\alpha = \frac{6.125}{F} + 21{,}50,$$

M. Noblemaire a conclu, comme nous l'avons rappelé plus haut, que notre formule n'*en tient pas compte*, et, sous l'influence de cette conviction, il a interprété cette loi, dont nous reproduisons ci-dessous les termes, en y attachant un sens que nous n'avions pas soupçonné en la formulant : « *De quelque façon que le trafic se partage entre les divers groupes de lignes d'un réseau, pourvu que la fréquentation générale soit la même, le prix de revient de l'unité reste invariable.* »

Voilà la conséquence forcée d'une formule qui *ne tient pas compte des déclivités*, dit M. Noblemaire (avec beaucoup de raison au point de vue où il s'est placé); on arrive à ce résultat qu'on peut bouleverser arbitrairement les directions du trafic, faire passer sur les lignes accidentées les trains qui suivaient les lignes faciles, sans se préoccuper du prix de revient qui reste invariable!

Expliquons, plus clairement que nous ne l'avons fait, une proposition ou, si l'on veut, une loi qui a une toute autre signification.

Nous avons constaté, dans notre mémoire, que sur un réseau quelconque le trafic tend naturellement vers une *répartition stable* étroitement liée à la richesse et à la

configuration du pays. Cette répartition une fois établie, examinons trois cas bien distincts :

1° Sur un réseau, comme le P.-L.-M., il peut se trouver des lignes à très faible pente et à très gros trafic, et des lignes à fortes déclivités et à très faible trafic; appelons F_R la fréquentation moyenne générale;

2° Sur un autre réseau, comme le Nord, il peut se trouver quelques lignes à gros trafic et un grand nombre de lignes à trafic moyen, soit F'_R la fréquentation générale;

3° Sur un troisième réseau, il peut arriver que toutes les lignes présentent à peu près la même fréquentation F''_R.

Si pour ces trois réseaux la fréquentation générale par kilomètre est la même, c'est-à-dire si l'on a

$$F_R = F'_R = F''_R,$$

le prix de revient aura, d'après nous, une valeur invariable, quoique sur chaque réseau le trafic soit réparti d'une manière très différente entre les divers groupes de lignes. Il suffit, en un mot, de connaître la fréquentation générale d'un réseau pour évaluer le prix de revient P_m, sans se préoccuper de la façon dont le trafic se partage entre les divers groupes de lignes. Telle est la loi que nous avons formulée et démontrée, laquelle n'a rien de commun avec l'hypothèse originale de prix de revient indépendants du profil. Elle a une portée pratique sérieuse, en ce sens qu'elle fournit une base commode pour la comparaison des résultats économiques de réseaux placés dans des conditions très différentes.

DEUXIÈME PARTIE.

COMPARAISON DES PRIX DE REVIENT DE LA TRACTION DE DIVERS RÉSEAUX : INFLUENCE DE LA RAMPE CARACTÉRISTIQUE.

Une autre observation de M. Noblemaire, fort intéressante aussi, se rattache à l'influence que nous avons

attribuée aux améliorations récentes des machines locomotives (tiroirs cylindriques, soupapes de rentrée d'air, surfaces de moindre résistance, etc.) sur les prix de revient de la traction.

M. Noblemaire reconnaît, avec notre mémoire de 1887(*), que la proportion des dépenses de la traction par rapport à celle des autres services a représenté :

Sur les six grands réseaux :

52 p. 100 en 1882-83, 52 p. 100 en 1884-85.

Sur l'État :

46 p. 100 en 1882-83, 39 p. 100 en 1884-85.

Il admet que le simple rapprochement des chiffres ci-dessus

46 et 39

met nettement en évidence les résultats obtenus par les perfectionnements des machines sur le réseau de l'État. Mais ce que M. Noblemaire conteste, c'est qu'on puisse rapprocher avec la même certitude les chiffres de deux réseaux différents, à cause du manque d'uniformité dans la comptabilité statistique des diverses compagnies de chemins de fer.

L'introduction de cette uniformité serait un des plus grands progrès à réaliser dans l'administration des chemins de fer. La lumière se ferait rapidement sur la valeur respective des divers modes adoptés pour telle ou telle branche de l'exploitation. On aurait, pour l'appréciation de tous les services techniques de même nature, *une commune mesure* qui fait aujourd'hui défaut. Dans l'état actuel, le doute plane sur toutes les recherches; toutes les conclusions sont ébranlées par cette unique observation : *les écritures comptables ne sont pas tenues de la même manière.*

(*) *Annales des ponts et chaussées*, août 1887, p. 173.

L'observation de M. Noblemaire est donc parfaitement fondée, et si elle pouvait conduire à l'adoption de règles uniformes pour la comptabilité statistique, elle serait le point de départ d'une importante amélioration.

Mais, ce qui reste acquis, c'est que la proportion des dépenses de la traction est restée constante :

52 p. 100

sur les grandes compagnies, pendant les périodes 1882-1883 et 1884-1885, tandis qu'elle a baissé, sur le réseau de l'État, pendant les mêmes périodes,

de 46 à 39,

c'est-à-dire de $\frac{7}{46}$ ou 15 p. 100.

Dans notre mémoire de 1885 (*), nous avons établi les points suivants :

1° Lorsqu'on veut comparer les prix de revient de la traction, l'unité de comparaison ne peut être le prix de revient du kilomètre de train; il faut distinguer tout d'abord les trains de marchandises et les trains de voyageurs. La raison est manifeste : sur un même réseau, le prix du kilomètre de train étant 1 pour les voyageurs, est tantôt 1,67, tantôt 1,85, tantôt 1,94 pour les marchandises.

2° La véritable mesure, pour chaque espèce de train, est la tonne kilométrique brute.

Il y a donc deux unités distinctes qu'il faut bien se garder de confondre :

1° La tonne kilométrique des trains de marchandises;

2° La tonne kilométrique des trains de voyageurs.

En moyenne, le prix de la tonne kilométrique des trains

(*) *Annales des ponts et chaussées*, septembre 1885. — *Annales des mines*, janvier-février 1886.

de marchandises étant 1, le prix de la tonne kilométrique des trains de voyageurs est 1,60.

En étudiant, au point de vue de la traction, les prix de revient des diverses compagnies, nous étions arrivés à la conclusion suivante pour ce qui concerne les marchandises :

1° Les prix de revient les plus bas des six grands réseaux sont ceux de la compagnie P.-L.-M ;

2° Les prix de revient de l'État sont inférieurs à ceux de la compagnie P.-L.-M.

Les documents dont nous disposions alors étaient extraits des comptes rendus de la compagnie P.-L.-M. pour l'année 1883, dernier exercice connu à cette époque.

M. Noblemaire reprend la comparaison et en la modifiant il arrive à une conclusion différente. Voici la marche suivie par M. Noblemaire :

1° Au lieu de séparer, comme nous l'avions fait, les tonnes kilométriques de voyageurs et les tonnes kilométriques de marchandises, il les réunit en bloc ;

2° Il calcule l'économie qu'aurait pu faire la compagnie P.-L.-M. sur les prix réels accusés par la comptabilité, si elle avait pu obtenir la tonne de charbon, *rendue sur le tender*, au même prix que l'État ;

3° Pour les autres matières, sans prendre en considération, comme pour le charbon, le prix de revient de l'unité *au moment de la livraison au service consommateur*, il déduit les frais de transport en service, parce que ces derniers transports ne sont pas comptés au réseau de l'Etat ;

4° Il déduit des dépenses de traction de la compagnie P.-L.-M. toutes les dépenses de matériel démoli ou vendu, toutes les dépenses de transformation ;

5° Il fait connaître que le tonnage kilométrique brut inscrit dans les comptes rendus de la compagnie est un tonnage déduit de *poids conventionnels*, et que, pour obtenir le véritable tonnage, il faut ajouter au chiffre publié par la compagnie,

1.300.461.655 tonnes kilométriques.

En introduisant toutes ces modifications, M. Noblemaire trouve que le prix de revient de 1.000 tonnes kilométriques, évalué par la compagnie, dans ses comptes rendus, à $4^f,52$, s'abaisse à $3^f,70$.

La question est délicate ; elle ne peut pas être traitée dans les termes nouveaux où elle est posée par M. Noblemaire, pour les motifs suivants :

1° On ne peut pas confondre, dans un calcul de prix de revient, deux genres d'unités dont le rapport dépasse 1,60 : la tonne kilométrique des trains de marchandises coûtant 1, la tonne kilométrique des trains de voyageurs coûte en effet 1,60 ; de plus, au réseau P.-L.-M., le tonnage brut des trains de marchandises est le double du tonnage brut des trains de voyageurs ; à l'État, il en est à peine les 5/6. On voit que la nouvelle comparaison manque de base.

2° *Combustible.* — Nous sommes d'accord avec M. Noblemaire pour le prix du combustible. Puisqu'il s'agit de comparer les frais de traction dans des circonstances autant que possible identiques, il faut admettre un prix commun pour le combustible, *au moment de l'emploi*.

3° *Autres matières.* — Il faudrait évidemment suivre la même marche que pour le combustible. Or les prix d'achat des matières de consommation, métaux, bois, huiles, autres que les combustibles, étaient en 1884 beaucoup plus élevés sur le réseau de l'État que sur le réseau P.-L.-M., et cela tenait à ce que le réseau de l'État était éloigné de Paris et de tout centre de production, que les achats se faisaient relativement sur une petite échelle, et qu'ils étaient grevés, sur de longs parcours *extérieurs au réseau*, des frais de transport *à plein tarif*

des compagnies. Tout compte fait, il résulte de nos recherches que les matières autres que le combustible revenaient, *au moment de l'emploi*, à un prix notablement plus élevé au réseau de l'État qu'au réseau P.-L.-M. La rectification indiquée par M. Noblemaire, portant uniquement sur les frais de transport en service et négligeant tout le reste, devrait être faite en sens inverse.

4° Le réseau de l'État a hérité du matériel provenant de treize compagnies en ruine. A ce point de vue, il ne s'est pas trouvé dans une situation meilleure que le P.-L.-M. En outre, toutes les dépenses de matériel démoli ou transformé, lorsque la transformation n'ajoute rien à la valeur, sont inscrites au compte entretien. En fait, la manière d'opérer est exactement la même au P.-L.-M. et à l'État, sauf qu'à l'État, toutes les dépenses figurent sous le titre unique de « dépenses d'entretien ».

5° La rectification du tonnage est la seule importante; elle est considérable, puisqu'elle est de près de 10 p. 100 et qu'elle atteint le chiffre de

1.300.461.655 tonnes kilométriques.

Nous l'admettons pleinement, et nous ajoutons que ce chiffre se décompose de la manière suivante :

516.014.740 t. k. pour les trains de voyageurs,
784.446.915 t. k. pour les trains de marchandises,

1.300.461.655 t. k.

Et voici maintenant de quelle manière peut se rétablir sur des bases plus solides la comparaison des prix de revient :

1° Nous limiterons la comparaison aux tonnes kilométriques des trains de marchandises et nous ramènerons au même prix la tonne de charbon *au moment de l'emploi* sur le tender ;

2° Nous admettrons que pour les autres matières il y a équilibre entre les prix.

Notre comparaison est résumée dans le tableau suivant, que nous étendons à l'exercice 1885, dont les résultats sont aujourd'hui connus pour les deux réseaux.

TABLEAU A. — **Trains de marchandises.**

	EXERCICE 1884		EXERCICE 1885	
	P.-L.-M.	ÉTAT	P.-L.-M.	ÉTAT
Dépenses accusées par les comptes rendus des administrations.	30.546.796	2.055.467	26 594.501	1 895.458
A retrancher pour différence du prix des charbons au moment de l'emploi.	1.430 086	»	1.116.900	
Dépenses totales à comparer . . . . . A.	29.116.710	2.055.467	25.477.601	1.895.458
Tonnage kilométrique brut accusé	8.242.373.297	541.402.054	7.584.253.647	501.247.352
Id. à ajouter sur le réseau P.-L.-M.	784.446.915	»	719.746.353	
Id. à comparer . . . . B.	9.026.820.212	541.402 054	8.304.000 000	501 247.352
Kilomètres de trains	21.705.106	1.935.323	19.862.982	1.829.651
Charge moyenne des trains de marchandises	415^{t}	280^{t}	418^{t}	273^{t}
Prix de revient de 1.000 tonnes kilométriques $\frac{A}{B}$	3^{f},22	3^{f},80	3^{f},07	3^{f},79

Il résulte de ce tableau que les prix de revient du transport de 1.000 tonnes kilométriques dans les trains de marchandises ont été :

Pour le réseau P.-L.-M. . . . . { 3^{f},22 en 1884 / 3^{f},07 en 1885
Pour le réseau de l'État. . . . . { 3^{f},80 en 1884 / 3^{f},79 en 1885

C'est sur ces prix que peut s'établir un examen approfondi et non, comme nous l'avons expliqué plus haut, sur les prix de revient calculés par M. Noblemaire, pour les tonnes kilométriques cumulées de voyageurs et de marchandises, et évalués par lui à :

Pour le réseau P.-L.-M. . . . . 3^{f},70 en 1884
Pour le réseau de l'État . . . . . 4^{f},70 id.

Les prix de revient du tableau A qui précède sont-ils eux-mêmes directement comparables, bien que se rapportant les uns et les autres à des unités de même espèce? Nullement.

Et voici pourquoi :

S'il est un fait incontesté, c'est que les prix de la traction augmentent avec les déclivités du profil, aussi bien sur les chemins de fer que sur les routes ordinaires.

Personne n'ignore que sur les lignes de fer à grand trafic des sommes énormes ont été dépensées en tunnels, viaducs, tranchées ou remblais, uniquement pour diminuer d'un petit nombre de millimètres les pentes ou rampes.

Nous avons montré comment, toutes choses égales d'ailleurs, les prix de revient de la traction varient avec les déclivités du profil, ou plus exactement, avec les *rampes caractéristiques* (*).

Nous donnons ci-dessous un tableau B permettant de déterminer la *rampe caractéristique* d'un groupe quelconque de lignes, et nous mettons en regard les *prix normaux* de 1.000 tonnes kilométriques brutes, pour ce qui concerne la traction.

(*) Voir : *Notice sur les prix de revient de la traction*, p. 35 et 36, et l'*Appendice*, p. 53. — *Annales des ponts et chaussées*, septembre 1885. — *Annales des mines*, janvier-février 1886.

TABLEAU B.

RAMPES caractéristiques p_m	CHARGES BRUTES REMORQUÉES PAR DES MACHINES à marchandises dont le poids adhérent est de :			
	36 tonnes	**38** tonnes	**40** tonnes	Prix de revient normal de 1.000 tonnes kilométr. brutes
millim.	tonnes	tonnes	tonnes	fr.
4	368	600	631	2,72
5	487	514	541	3,00
6	425	449	472	3,30
7	375	396	416	3,60
8	335	353	373	3,91
9	302	319	335	4,23
10	274	289	304	4,56
11	251	265	279	4,89
12	230	243	256	5,25
13	12	224	236	5,61
14	196	207	218	5,98
15	182	192	202	6,37
16	169	179	188	6,78
17	158	167	175	7,19
18	147	155	163	7,65
19	139	147	155	8,03
20	131	138	145	8,46

L'application de ce tableau et du diagramme (*fig.* 2), qui en est la représentation graphique (page 158 *ter*), est extrêmement simple. Considérons deux groupes de lignes X et Y, et divisons pour chaque groupe le nombre de tonnes kilométriques des trains de marchandises, tant à l'aller qu'au retour, par le nombre de kilomètres de parcours des machines qui les ont remorqués, et nous obtiendrons la charge moyenne des trains de marchandises.

Supposons que le poids moyen adhérent des machines locomotives soit de

38 tonnes pour les deux groupes de lignes,

et que la charge moyenne des trains soit de

449 tonnes pour le groupe X,
et de 289 tonnes pour le groupe Y.

En remontant au tableau B ci-dessus, on trouvera ces deux tonnages inscrits dans la colonne 3 (poids adhérent de 38 tonnes).

Les *rampes caractéristiques* correspondantes seront de

6 millimètres pour le groupe X,
10 millimètres pour le groupe Y.

Les prix normaux seront, pour 1.000 tonnes kilométriques de poids brut,

de $3^f,30$ pour le groupe X,
de $4^f,56$ pour le groupe Y.

c'est-à-dire que si l'on dépense

$3^f,30$

pour remorquer 1.000 tonnes kilométriques de poids brut sur le groupe X, on dépensera, toutes choses égales d'ailleurs,

$4^f,56$

pour remorquer la même charge à la même distance sur le groupe Y.

Supposons maintenant que les deux groupes X et Y constituent deux réseaux distincts, et qu'à la fin d'un exercice les prix s'abaissent à

$3^f,10$ pour le groupe X,

et à

$4^f,00$ pour le groupe Y.

l'économie réalisée, par rapport aux dépenses normales, sera de

$3,30 - 3,10 = 0,20$ ou $\frac{0,20}{3,30}$ ou 6 p. 100 sur le groupe X,

et de

$4,56 - 4,00 = 0,56$ ou $\frac{0,56}{4,56}$ ou 12 p. 100 sur le groupe Y.

Si on établissait la comparaison *directement* entre les prix de revient de chacun des groupes, soit

$3^f,10$ pour le réseau X,

et

$4^f,00$ pour le réseau Y,

on omettrait l'influence de la *rampe caractéristique;* on comparerait des quantités qui ne sont pas *directement* comparables et on arriverait à la conclusion suivante, que la traction du réseau Y est faite d'une manière plus onéreuse que celle du réseau X, et que la différence est de

$4,00 - 3,10 = 0,90$ ou $\frac{0,90}{4,00}$ ou 22,5 p. 100,

tandis que nous venons de voir, d'après une comparaison rationnelle, que l'économie réalisée est au contraire plus considérable sur le réseau Y que sur le réseau X, et que l'écart est

de 6 p. 100 en faveur du réseau Y.

On voit à quelles erreurs énormes pourrait conduire l'omission de la *rampe caractéristique.*

Il nous semble clairement établi par ce qui précède que lorsqu'on connaît pour divers réseaux le prix de revient de 1.000 tonnes kilométriques brutes, il faut tout d'abord, en vue d'une comparaison rationnelle, déterminer pour chaque réseau la *rampe caractéristique*, et mettre ensuite les prix de revient réels en regard des prix de revient normaux, et non comparer directement entre eux les prix de revient déduits de la comptabilité. Ce dernier procédé serait défavorable aux réseaux à fortes déclivités; il reviendrait à supprimer l'influence des rampes, à considérer comme équivalents au point de vue de la traction les chemins des montagnes et les chemins des vallées.

En résumé, de même que nous avons fait voir que, pour comparer entre eux les prix de revient totaux de

l'unité de trafic (P_a) sur divers réseaux, il faut recourir à la *courbe typique* des fréquentations, de même pour comparer entre eux les prix de revient de la traction (tonnes kilométriques brutes de trains de marchandises), il faut recourir à la *courbe typique* des rampes caractéristiques.

Ces observations préliminaires ont un caractère tout à fait général : appliquons-les aux réseaux du P.-L.-M. et de l'État.

Les règles suivies sur les deux réseaux pour les charges des trains sont les mêmes : le poids moyen adhérent des machines est d'environ 38 tonnes de part et d'autre.

Or, d'après le tableau A, on voit que les charges moyennes des trains de marchandises ont été :

Sur le réseau P.-L.-M. de . . . . . { 415 tonnes en 1884 / 418 tonnes en 1885

Sur le réseau de l'État de . . . . . { 280 tonnes en 1884 / 273 tonnes en 1885

Les rampes caractéristiques correspondantes sont, d'après notre diagramme (*fig.* 2, page 158 *ter*) :

Sur le réseau P.-L.-M. de . . . . . { $6^{mm},55$ en 1884 / $6^{mm},45$ en 1885

Sur le réseau de l'État de. . . . . { $10^{mm},37$ en 1884 / $10^{mm},67$ en 1885

Le tableau suivant fait saisir d'un coup d'œil les données et leurs conséquences pour les deux exercices :

	EXERCICE 1884		EXERCICE 1885	
	P.-L.-M.	Etat	P.-L.-M.	État
Charge moyenne des trains de marchandises.	415^t	280^t	418^t	273^t
Rampes caractéristiques	$6^{mm},55$	$10^{mm},37$	$6^{mm},45$	$10^{mm},67$
Prix de revient normaux de 1.000 tonnes kilométriques	$3^f,47$	$4^f,68$	$3^f,45$	$4^f,78$
Prix de revient réels.	$3^f,22$	$3^f,80$	$3^f,07$	$3^f,79$
Économie pour 100 par rapport aux prix normaux	7,06	18,84	11,01	20,65

On voit par le tableau qui précède que les économies réalisées par *rapport aux prix normaux* se sont élevées, pour le réseau P.-L.-M.,

à 7,06 p. 100 en 1884,
à 11,01 p. 100 en 1885,

soit en moyenne, pour les deux exercices, à

9,03 p. 100.

Ces économies se sont élevées, pour le réseau de l'État,

à 18,84 p. 100 en 1884,
à 20,65 p. 100 en 1885,

soit en moyenne, pour les deux exercices, à

19,75 p. 100.

En d'autres termes, toutes choses égales d'ailleurs, le travail qui correspond à une dépense normale de 100 francs, coûte sur le réseau P.-L.-M. :

$$100 - 9{,}03 = 90^f,97,$$

et le travail qui correspond à une dépense normale de 100 francs, coûte sur le réseau de l'État :

$$100 - 19{,}75 = 80^f,25.$$

Ce sont ces chiffres 90,97 et 80,25 qui condensent et résument tous les éléments de comparaison des deux exercices 1884 et 1885 pour les réseaux P.-L.-M. et État, en ce qui concerne les prix de revient de la traction pour les trains de marchandises.

L'économie relative en faveur du réseau *État* est la suivante :

$$\frac{90{,}97 - 80{,}25}{90{,}97} = \frac{10{,}72}{90{,}97} \quad \text{ou} \quad 11{,}67 \text{ p. } 100.$$

Cette économie sur les trains de marchandises se retrouverait à peu près la même sur les trains de voyageurs ; nous l'attribuons, pour la majeure partie, comme

nous l'avons fait ressortir dans nos précédentes notices, publiées dans nos *Annales* et celles des mines, aux modifications introduites dans les machines locomotives du réseau de l'État. Parmi ces modifications nous rappellerons celle qui a eu pour résultat de réduire de 62 p. 100 les dépenses de graissage par la substitution radicale de l'oléonaphte au colza.

Il a suffi, pour cela, d'adapter des soupapes de rentrée d'air aux boîtes de distribution de vapeur.

M. Noblemaire, sans contester l'économie, a fait remarquer que la diminution très notable des prix des huiles de graissage avait pu jouer un rôle important dans cette économie.

Nous avons cherché à nous en rendre compte. Or, au moment où nous obtenions sur le réseau de l'État une économie de 62 p. 100, les prix comparatifs des huiles de graissage étaient les suivants, sur ce réseau :

« Huiles de colza, 69 francs les 100 kilogrammes;

« Huiles minérales, 30 francs les 100 kilogrammes.

Aujourd'hui, sur le même réseau, les prix se sont en effet abaissés; les voici :

« Huiles de colza, 55 francs les 100 kilogrammes;

« Huiles minérales, 21f,25 les 100 kilogrammes. »

Comme l'abaissement du prix des huiles minérales a suivi une marche plus rapide que l'abaissement du prix des huiles de colza, on voit que l'économie de 62 p. 100 loin de diminuer, par suite de l'abaissement du prix des huiles, a dû suivre au contraire une marche ascendante.

Ce qui est exact, c'est que le bon marché des huiles a fait baisser les dépenses totales de graissage.

CONCLUSIONS.

Les conclusions, qui se dégagent nettement du travail qui précède, sont les suivantes :

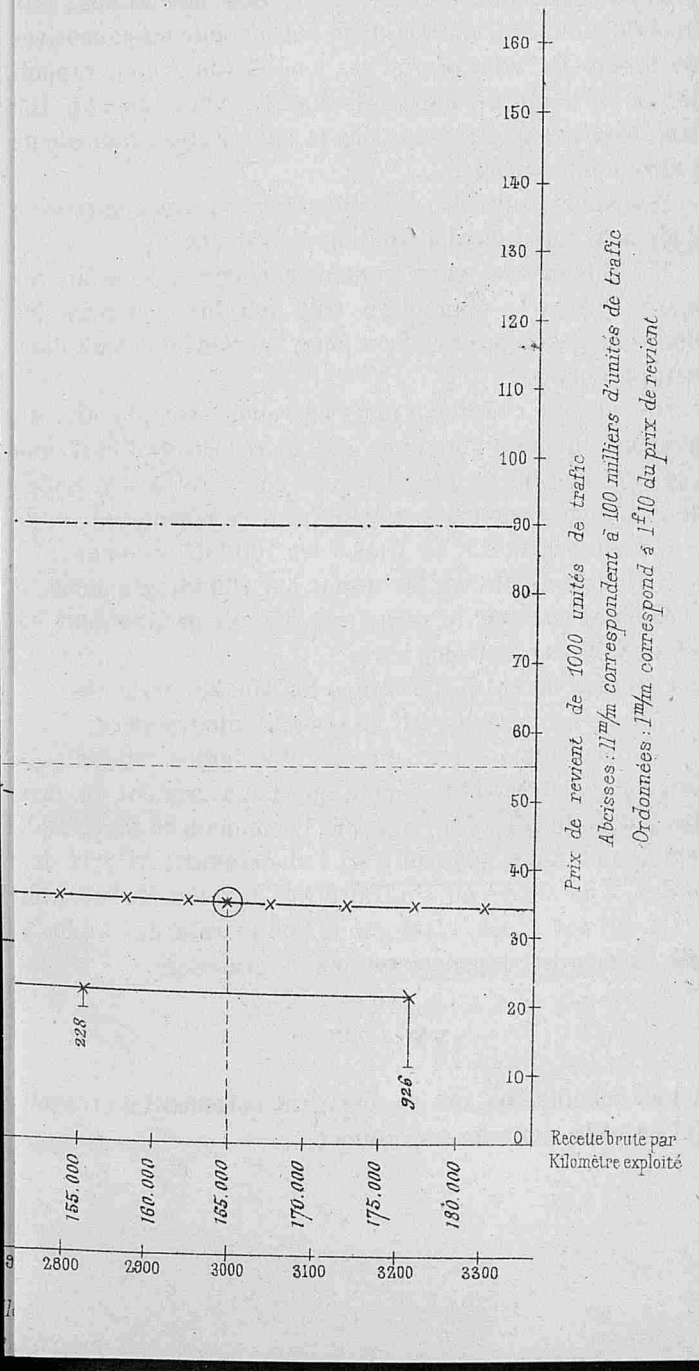


Fig. 1.

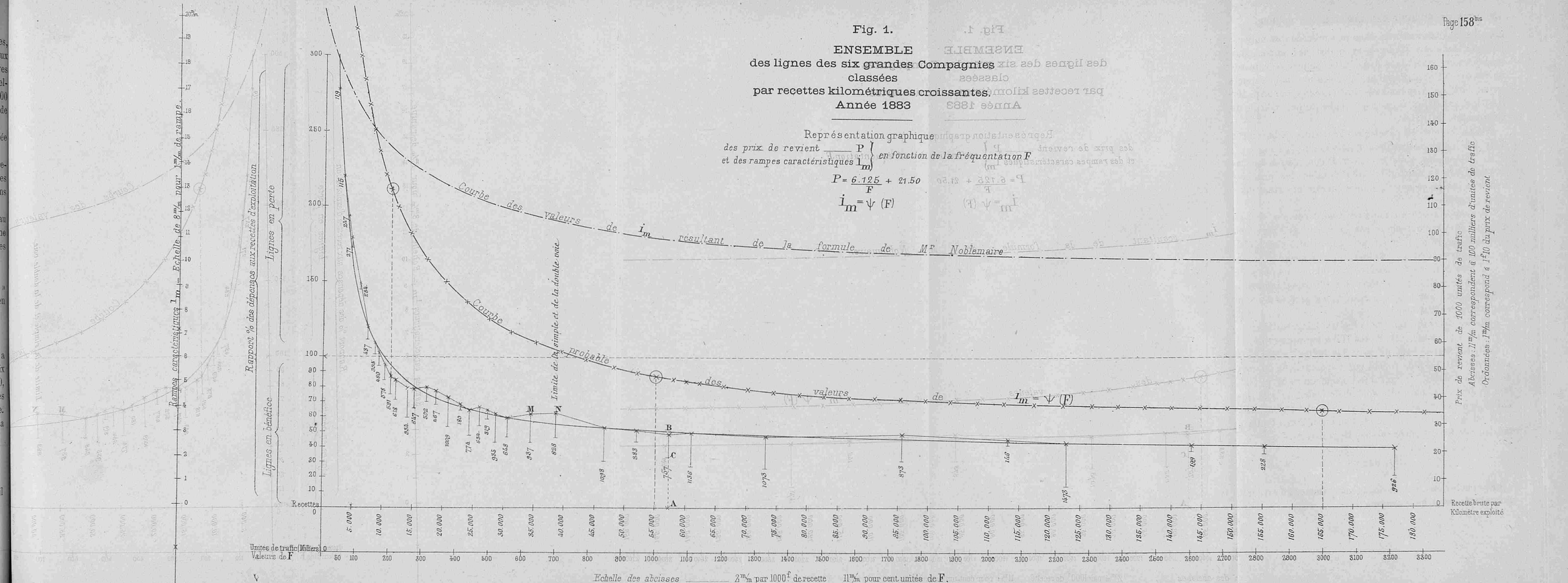
ENSEMBLE
des lignes des six grandes Compagnies
classées
par recettes kilométriques croissantes.
Année 1883

Représentation graphique

des prix de revient $\frac{P}{i_m}$ et des rampes caractéristiques i_m } en fonction de la fréquentation F

$$P = \frac{6.125}{F} + 21.50$$

$$i_m = \psi\,(F)$$

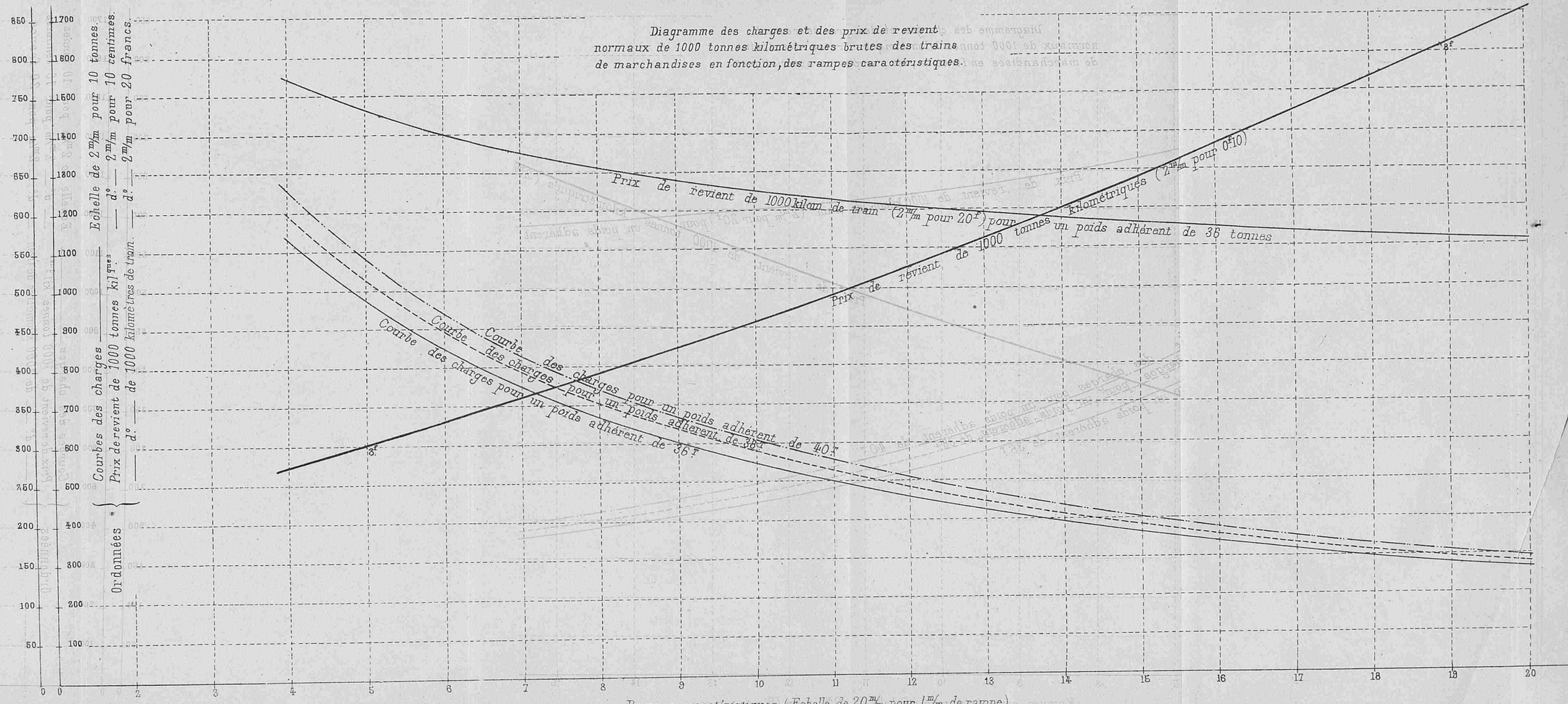


Echelle des abscisses ..... 2m/m par 1000f de recette 11m/m pour cent unités de F.

d° ordonnées ..... 1m/m pour 2 unités du coëfficient d'exploitation 1m/m pour 1f 10 du prix de revient 8m/m pour 1m/m de rampe caractéristique

Fig. 2

Diagramme des charges et des prix de revient normaux de 1000 tonnes kilométriques brutes des trains de marchandises en fonction, des rampes caractéristiques.



1° Les prix de revient de l'*unité de trafic*, pas plus que les coefficients d'exploitation de divers réseaux, ne peuvent pas être comparés entre eux directement. Il faut pour chaque réseau déterminer la fréquentation F_R et chercher le prix de revient normal P_α correspondant à F_R, soit d'après notre diagramme (*fig.* 1), soit d'après la formule

$$P_\alpha = \frac{6.125}{F_R} + 21{,}50\ (*).$$

C'est au prix de revient normal ainsi obtenu pour chaque réseau qu'on doit comparer le prix de revient réel. Le rapport de ces deux prix, que nous appellerons *rapport typique*, donne la mesure de l'économie plus ou moins grande apportée dans l'ensemble des services d'exploitation. Voici, pour l'exercice 1884, le rapprochement de ces diverses quantités pour les grandes compagnies d'une part, et pour le réseau de l'État d'autre part.

	EXERCICE 1884	
	Grandes compagnies	État
Fréquentation moyenne	712	252
Prix normaux du millier d'unités de trafic	30f,10	45f,80
Prix réels id. id.	29f,55	38f,95
Rapports typiques	0,98	0 85
Coefficients d'exploitation	0,53	0,80

En considérant les *rapports typiques*, on voit que,

(*) Cette formule donne le résultat moyen des exercices 1882 et 1883 pour la France entière. L'exploitation, pendant ces deux années, s'est faite dans des *conditions normales*, c'est pour ce motif que nous choisissons la courbe répondant à notre formule comme *courbe typique*, comme terme de comparaison. Pendant les années qui ont suivi, de grandes réductions ont été opérées. Il n'est pas certain que quelques-unes de ces réductions n'aient été réalisées aux dépens de l'entretien normal. Des réductions de cette nature seraient en réalité un prélèvement sur le compte capital et ne pourraient être considérées comme des économies. Il est du reste tout naturel que les années de crise mangent les réserves des années d'abondance : il en a été ainsi bien avant l'existence des chemins de fer.

dans un exercice où les compagnies ont dépensé 98 p. 10 du prix normal, le réseau de l'État n'a dépensé que 8 p. 100. Cependant, devant les Chambres françaises, on a vu attaquer vigoureusement l'administration des chemins de fer de l'État, sous prétexte que la dépense des compagnies se limitait à 53 p. 100 de la recette, tandis que celle de l'État dépassait 80 p. 100.

Les coefficients d'exploitation étaient confondus, dans la discussion, avec les rapports typiques; l'influence capitale de la fréquentation était entièrement oubliée : là où se manifestait une économie considérable, on croyait découvrir une dépense exagérée.

2° Lorsqu'au lieu de comparer *les prix de revient de l'unité de trafic* (prix obtenus par le concours de tous les services de l'exploitation réunis), on veut limiter la comparaison au service du matériel et de la traction, cette dernière comparaison doit porter soit sur le prix de revient de la tonne kilométrique brute des trains de marchandises, soit sur le prix de revient de la tonne kilométrique brute des trains de voyageurs. Ces prix de revient établis avec soin, en tenant compte des variations de prix des matières de consommation *au moment de l'emploi*, ne peuvent pas être comparés directement entre eux. Il faut suivre une marche analogue à celle que nous avons indiquée plus haut pour les prix de revient de l'unité de trafic.

Il faut pour chaque réseau déterminer la rampe caractéristique ρ_m et chercher le prix de revient normal de la tonne kilométrique brute correspondant à ρ_m, soit d'après notre diagramme (*fig.* 2), soit d'après notre tableau B. C'est au prix de revient normal ainsi obtenu pour chaque réseau qu'on doit comparer le prix de revient réel. Le rapport de ces deux prix que nous appelons, comme ci-dessus, « rapport typique », donne la mesure de l'économie plus ou moins grande, en ce qui concerne le service spécial du matériel et de la traction.

Voici, pour les exercices 1884 et 1885, le rapprochement de ces diverses quantités pour le réseau P.-L.-M. d'une part, et pour le réseau de l'État d'autre part.

	RÉSEAU P.-L.-M.		ÉTAT	
	1884	1885	1884	1885
Rampes caractéristiques.	6^{mm}	$6^{mm},45$	$10^{mm},37$	$10^{mm},67$
Prix normaux du millier de tonnes kilométriques brutes des trains de marchandises.	$3^f,47$	$3^f,45$	$4^f,68$	$4^f,78$
Prix réels du millier de tonnes kilométriques brutes des trains de marchandises.	$3^f,22$	$3^f,07$	$3^f,80$	$3^f,79$
Rapports typiques	0,92	0,89	0,81	0,79

Paris, le 1er février 1888.

NOTE

SUR

SUR L'OZOKÉRITE DE BORYSLAW

ET LES PÉTROLES DE SLOBODA (GALICIE)

Par M. L. BABU, ingénieur des mines.

Introduction. — Dans un important mémoire inséré aux *Annales des mines*, en 1871, M. Heurteau, ingénieur des mines, a étudié la constitution géologique d'un grand nombre de points de la zone pétrolifère en Galicie. C'est là un document très précieux au point de vue de la géologie proprement dite, et qui fait encore souvent autorité dans les discussions des géologues allemands. Sans revenir sur ce qu'a dit M. Heurteau, nous nous occuperons seulement ici de décrire le mode de gisement et le mode d'exploitation des deux espèces d'hydrocarbures qui se rencontrent sur le versant nord des Carpathes, savoir :

Les hydrocarbures solides constituant les diverses variétés d'ozokérite;

Les hydrocarbures liquides, huiles plus ou moins lourdes et plus ou moins riches en paraffines.

Peu nombreux sont les points où se trouve l'ozokérite; ils forment seulement deux groupes voisins, l'un avec Boryslaw et Truskawice, l'autre avec Starunia et Dwiniacz. Boryslaw est de beaucoup le centre le plus important; il était donc naturel de s'attacher à lui pour l'étude de l'ozokérite.

Au contraire, la multiplicité des points où on rencontre le pétrole rendait plus difficile le choix d'un centre pétrolifère à étudier spécialement; nous nous sommes décidé en faveur de Sloboda, à cause du rapide développement qu'y ont pris les exploitations de pétrole dans ces dernières années.

Identité géologique de l'ozokérite et du pétrole. — Au point de vue géologique et géogénique, on ne peut séparer l'ozokérite de l'huile minérale. Le produit solide n'est, en réalité, qu'une variété de pétrole très paraffiné, qui donne à l'analyse par distillation fractionnées les mêmes corps intégrants que les produits liquides; ces corps intégrants sont simplement en proportions différentes. L'huile de Pensylvanie donne par exemple :

Pétrole raffiné avec plus ou moins de benzine	41
Huile à graisser	39
Paraffine	2
Résidu et perte	18

tandis que l'ozokérite de Boryslaw donne :

Huile de naphte et benzine	17 - 28
Huile à graisser	15 - 20
Paraffine	36 - 50
Résidu et perte	10 - 20

Mais entre ces deux produits on trouve des huiles dont la teneur en paraffine passe par tous les degrés intermédiaires, et, dans les Carpathes, on peut faire un tableau des huiles, suivant leur teneur en paraffine, commençant par les huiles légères peu ou point paraffinées de Sloboda et se terminant par les pétroles de Starunia qui laissent déposer des nodules de paraffine. C'est ainsi que les

pétroles de Sloboda tiennent 0 à 6 p. 100 de paraffine, ceux de Boryslaw 8 à 10 p. 100, et ceux de Starunia 10, 20 et 25 p. 100.

On ne saurait donc attribuer une trop grande importance à l'étude des gisements d'ozokérite pour arriver au mode de distribution de l'huile dans les terrains pétrolifères de la Galicie. Les exploitations de pétrole, en effet, en raison de la fluidité du produit qu'elles poursuivent, n'arrivent à donner une idée assez précise de cette distribution qu'après de longues années et après de nombreux travaux.

Au contraire, l'ozokérite est abattue directement en place, et l'allure des gisements peut être étudiée aussi bien que celle d'un filon de plomb, de cuivre ou d'or. Du mode de gisement de l'ozokérite on peut conclure le mode de gisement du pétrole, et ce doit être là un guide sûr pour indiquer les meilleurs emplacements des sondages.

Étages riches en hydrocarbures. — Les géologues autrichiens et allemands, qui n'hésitent jamais à attribuer au pétrole une origine purement organique, se sont efforcés de rechercher quel étage géologique avait pu, par ses fossiles, donner naissance à une si grande quantité d'hydrocarbures. Les uns ont proposé l'éocène, d'autres le néocomien, d'autres enfin le carbonifère.

En fait, c'est presque toujours en vain que, même dans les régions riches, on cherche des fossiles soit dans l'éocène, soit dans le néocomien. Quant au carbonifère, il n'existe tout au plus que dans la partie ouest de la zone pétrolifère ; la partie est en est sûrement dépourvue. L'opinion des géologues allemands paraît donc avoir peu de fondement.

Aucun puits ni sondage n'a encore traversé le néocomien, et, jusqu'à ce niveau inclusivement, on a trouvé

de l'huile. Les centres les plus productifs ont leurs puits arrêtés soit dans l'éocène (Ropianka, Bobrka, Sloboda), soit dans le miocène (Boryslaw, Dwiniacz, Starunia).

Le miocène présente surtout un intérêt particulier, on ne le trouve guère qu'au voisinage des régions riches en hydrocarbures, à Boryslaw, à Dwiniacz, à Starunia, et aux environs de Kolomea, non loin de Sloboda; c'est seulement dans ce terrain que, jusqu'à présent, on a constaté la présence de l'ozokérite.

Géologie générale de la Galicie. — Pour avoir une idée très nette de la géologie des Carpathes, il suffit de parcourir une ligne S.-O.-N.-E., partant de Bocskó-Rubo, en Hongrie, et aboutissant à la frontière russe à la naissance du Podhorce. Au pied des Carpathes, une grande faille, orientée heure 20-21, sépare les premiers contreforts de la chaîne, des plaines de la Pologne. D'un côté, les vallées ouvertes dans les Carpathes montrent une puissante formation éocène, fortement faillée et vallonnée qui constitue tous les sommets; en certains points, notamment sur le versant sud, on la voit reposer sur le néocomien, l'une des assises les plus continues des Carpathes, tandis que ce terrain paraît lui-même surmonter directement le dévonien. Dans les plaines de la Pologne, ce n'est guère que dans le lit des fleuves tels que le Sereth, le Pruth, le Dniester et le Podhorce qu'on voit affleurer successivement les couches éocènes, puis le néocomien et le dévonien.

Dans l'étage éocène, le plus important au point de vue des pétroles, on distingue, en commençant par la base :

1° Les couches à nummulites, formées d'alternances de calcaires, de grès et de schistes bleu-gris, sableux, micacés, avec beaucoup d'hiéroglyphes (*Ropiankaschichten*);

2° Les couches à ménilites, schistes foncés, feuilletés, caractérisés par des lits de quartz et qui se subdivisent elles-mêmes comme il suit :

α *Wellensandstein*, avec quelques fucoïdes et des couches de schistes argileux et marneux;
β *Nicht wellige sandstein*, contenant de rares restes de plantes;
γ Conglomérats;
δ Argiles et schistes plus ou moins bleus, gris, verts ou rouges;
ε Schistes à ménilites, bruns foncés et bitumineux, avec quelques restes de poissons;
ϰ Marnes à fucoïdes.

On voit, en résumé, que la puissante formation des grès carpathiques se compose d'une série d'alternances de schistes et de grès, avec quelques couches de conglomérats.

I. — L'OZOKÉRITE A BORYSLAW.

Description du gisement.

Le gîte d'ozokérite de Boryslaw et l'exploitation française de Wolanka ont été récemment décrits dans les *Annales* (8e série, t. XII, 1887) par M. Rateau, ingénieur des mines. Nous ajouterons seulement ici quelques renseignements complémentaires sur ce minéral intéressant et sur les exploitations faites par les gens du pays.

Constitution géologique. — Les dépôts miocènes qui ont rempli la grande selle formée par l'éocène à Boryslaw, et qui se retrouvent un peu plus au sud en îlots très petits, près de Mraznica et de Schodnica, appartiennent à la partie inférieure de l'étage, ainsi que le prouve la présence du sel et du gypse.

Après avoir traversé les sables alluvionnels, appelés *Ryn* dans le langage courant, les puits pénètrent dans le miocène, composé d'alternances d'argile schisteuse, d'argile marneuse, de bancs de grès de quelques pieds d'épaisseur seulement et plus ou moins ocreux.

En général, les *argiles* sont couleur ardoise, elles deviennent grises à l'air et s'effritent alors facilement. La plupart d'entre elles sont salées, et certains bancs contiennent des traces ou empreintes désignées sous le nom d'hiéroglyphes.

Les *grès* sont tendres, à grains fins, et toujours imprégnés de pétrole qu'il laissent suer à l'air. Ils sont recoupés par un grand nombre de veinules de gypse de 2 à 3 millimètres d'épaisseur.

A une certaine profondeur, on trouve, dans les argiles, des fragments de *calcaire dolomitique*. Ils présentent un grand nombre de cavités plus ou moins grandes remplies d'une huile assez limpide. Sous prétexte que ces cavités paraissent sans communication avec l'extérieur, les géologues allemands ne doutent pas que ce soit un fossile qui ait donné naissance à cette huile.

Distribution de l'ozokérite. — Jusqu'à présent tous les puits de Boryslaw sont restés dans le miocène, quoique un grand nombre d'entre eux atteignent 120 mètres et plus. Il suffit de descendre dans quelques-uns pour se rendre compte du mode de gisement de l'ozokérite (*fig.* 1, Pl. V). On distingue immédiatement :

1° Des filons plus ou moins voisins de la verticale, recoupant les couches et y occasionnant souvent des rejets;

2° Des couches interstratifiées.

1° Les *filons* exploités sont parallèles à la direction des couches et à la ligne des Carpathes, soit environ heure 20-21; leur puissance est très variable et d'ailleurs bien difficile à évaluer à cause de la plasticité de l'ozokérite. Ils sont quelquefois continus en direction et en profondeur; la plus grande continuité, jointe à la puis-

sance maxima, se trouve dans l'axe de la zone à ozokérite, dirigé à peu près N. 50° O. et passant par le point où la route de Boryslaw à Tustanowice s'infléchit du nord-ouest au sud-est.

Perpendiculairement à la direction précitée, se rencontre un autre système de filons peu importants au point de vue de l'exploitation; et, de même, si l'on considère les traces d'un système de filons sur un plan vertical perpendiculaire à leur direction, on reconnaît deux pendages à peu près rectangulaires.

Malgré cette apparente complication, il est facile de déterminer deux espèces de fractures bien distinctes. En effet, tandis que les unes sont continues et accompagnées d'un rejet indéfini en profondeur, les autres beaucoup moins importantes, sont courtes et irrégulières. Les premières sont de véritables failles ou paraclases, fentes anticlinales de M. Moissenet; les secondes forment un réseau de cassures secondaires, qui, pour la plupart, ne sont autres que des diaclases.

2° Les *couches* interstratifiées comprennent elles-mêmes :

Des couches d'ozokérite pure;

Des couches de grès fissurés dont toutes les fissures sont remplies d'ozokérite.

Les couches d'ozokérite pure sont toujours en relation avec les failles principales. Leur puissance est très variable, et leur pendage, tantôt vers sud, tantôt vers nord, ne dépasse guère 25°. Ces couches ne semblent pas être autre chose que le remplissage de fissures interstratifiées ou diastromes, tout à fait comparables aux diaclases dont il a déjà été parlé; il n'est d'ailleurs pas rare de voir ces diastromes cesser d'être interstratifiées, se relever, et passer à l'état de diaclases.

Les couches de grès fissurées et imprégnées d'ozokérite sont plus rares; l'une d'elles était exploitée auprès

de Tustanowice en juillet 1886. On ne les rencontre guère qu'aux points où les efforts mécaniques extérieurs, tassements ou autres, ont dû se faire sentir le plus vivement, c'est-à-dire aux points où la courbure des couches est minima, par exemple au sommet des selles. Ces efforts ont développé dans les grès, couches à cassure facile, des craquelures très nombreuses, véritables piésoclases, dont le remplissage semble comme imprégner la roche.

Mode de formation du gîte. — D'après ce qui précède, le mode de formation du gîte ne paraît pas douteux; les failles principales ont amené du fond les émanations hydrocarburées qui se sont infiltrées dans les fractures déjà existantes et ont saturé les grès poreux; la richesse la plus grande se trouve évidemment au voisinage de ces failles. L'imprégnation a d'ailleurs pu s'étendre au loin, grâce au réseau des fractures secondaires interstratifiées ou non; et, par ce fait, on conçoit que le gîte n'existe pas seulement au voisinage immédiat de certaines lignes, mais bien qu'il s'étende à des distances assez grandes de part et d'autres de ces lignes; ce qui est d'ailleurs parfaitement justifié par la forme du gîte de Boryslaw (*).

Il est à remarquer que les cassures secondaires pouvaient ne pas exister au moment de la venue des émanations; bien que postérieures à l'ozokérite, elles auraient en effet pu être minéralisées grâce à la plasticité du remplissage.

Exploitation.

Méthode d'exploitation. — On se fait difficilement idée de l'importance qu'ont maintenant acquises les exploita-

(*) Voir la planche jointe au Mémoire de M. Rateau, 8e série, t. XII, 1887.

tions d'ozokérite de Boryslaw. Le prix de vente du produit extrait dépasse annuellement, sur place, 5 millions de francs. Et cependant quels moyens primitifs pour l'exploitation ! M. Heurteau, à la fin de son mémoire, donne une courte description de Boryslaw; elle est encore vraie à l'époque actuelle.

Qu'on se figure, répartis sur une surface d'environ 90 à 100 hectares, 12.000 à 13.000 puits dont le dixième à peu près est en activité. Leur distance varie de 3 à 8 mètres, et le champ d'exploitation de chacun d'eux est compris entre 9 et 60 mètres carrés. Souvent une parcelle de terrain, avec un seul puits, appartient à un propriétaire distinct, et il résulte de là une confusion absolument indescriptible. Cet état de choses est dû à la législation minière en Autriche; l'ozokérite, et d'ailleurs aussi le pétrole, ne sont pas compris parmi les substances concessibles et appartiennent aux propriétaires de la surface.

L'exploitation se fait par puits et galeries. Lorsque le puits rencontre une couche ou un filon d'ozokérite, on pousse une galerie en direction, et, si c'est possible, sous la propriété voisine; on revient ensuite vers le puits en faisant l'abatage par la méthode des chambres. Tel est du moins le principe qui paraît présider à l'exploitation; mais, en fait, dès que la longueur de la galerie a atteint quelques mètres, on fait des trous à droite, à gauche, partout où se présente l'ozokérite, et on travaille ainsi jusqu'à ce que survienne un éboulement, qui le plus souvent ensevelit l'ouvrier.

Pour les puits très rapprochés, on supprime même la galerie; on se contente de piocher tout autour du puits.

Point de massifs de protection pour le puits, aussi celui-ci reste-t-il rarement vertical, et les poussées latérales y produisent souvent des flèches de plusieurs mètres. De plus, des rétrécissements dans la section rendent à certains endroits le passage presque impossible.

Les puits sont ordinairement carrés et leur section est de 1 mètre.

Extraction. — L'extraction se fait par un treuil à bras mû par un homme ou par une femme. Un seul seau en bois ou en tôle fait la navette entre le fond et la surface. Bien souvent il est accroché en route par un bois cassé; il chavire et son contenu retombe sur l'ouvrier du fond. Dans les nouveaux puits, plus larges, on emploie deux seaux dont l'un monte, tandis que l'autre descend.

La plupart du temps, le treuil est installé dans un bâtiment en planches; mais il n'est pas rare aussi de rencontrer des puits sans aucun abri. Vient-on alors à abandonner l'un d'eux, le treuil est simplement enlevé, ainsi que l'espèce de garde-fou qui l'entoure, et il y a ainsi, dans Boryslaw, des milliers de puits à fleur de terre, qui rendent la circulation impossible dès qu'il fait un peu sombre. Le sort de l'astrologue de La Fontaine menace là quiconque ne regarde pas toujours à ses pieds.

Pour la descente ou la montée des hommes et aussi des visiteurs, le même appareil d'extraction est utilisé. Un pied dans le seau, une main avec la lampe à la corde, et l'on descend ainsi en se dirigeant avec l'autre pied et l'autre main. La descente dans un puits de 120 mètres nécessite environ quinze minutes. On a donc tout le temps de songer à la mortalité par accidents, dont la moyenne est de 2 p. 100 par an.

Déblais. — On conçoit que le morcellement de la propriété minière entre 1.000 à 1.200 possesseurs amène les plus grandes difficultés pour le choix des haldes à déblais. Le plus souvent on met les terres stériles dans des sacs, et des hommes ou des femmes les répandent où ils peuvent, entre les maisons, sur les terrains des

voisins, partout où s'offre le plus petit espace libre, et, naturellement, le plus près possible du puits. Grâce à ce régime, tout Boryslaw est transformé en un bourbier, et, même dans les années sèches, on enfonce partout jusqu'aux genoux dans une boue huileuse. Aussi s'est-on vu obligé d'établir, dans les passages les plus fréquentés, des trottoirs en planches portés par des piquets.

Il y a quelques années déjà, les plus grands propriétaires ont commencé à établir pour eux-mêmes de véritables haldes à déblais. Les transports se font alors dans des wagonnets sur rails. Récemment, s'est installée une Société pour l'enlèvement des déblais; les principaux points d'extraction sont desservis par de petites voies ferrées, et, moyennant une redevance, les déblais sont transportés en dehors de la région exploitée.

Extraction de l'eau. — A Boryslaw, les exploitations n'ont pas à lutter contre l'eau. Les terrains miocènes sont en général absolument secs, sauf en quelques rares endroits où se trouvent des sources salées peu importantes. On n'a donc à se préserver que des eaux superficielles. A cet effet, les puits sont creusés dans les sables alluvionnels avec une section un peu plus grande que celle qu'ils doivent avoir. Dès qu'ils ont pénétré dans les argiles miocènes, on construit à leur intérieur un second cuvelage en planches jointives, et, dans l'espace resté libre autour, on pilonne fortement de l'argile. Cette précaution est efficace lorsque le terrain est à peu près neuf, mais elle devient illusoire dans les régions que les exploitations ont déjà absolument bouleversées.

L'extraction de l'eau se fait soit par les seaux, soit à l'aide de pompes. Tous les propriétaires qui n'ont qu'un petit nombre de puits emploient les seaux. Deux ou trois Sociétés (la Société juive, la banque de crédit de Lemberg) ont établi des pompes. Presque chaque puits a sa

pompe, et le moteur est une machine à vapeur installée en un point déterminé. De longues tiges de bois transmettent alors le mouvement dans toutes les directions.

Ventilation. — S'il y a peu d'eau, les venues de gaz sont par contre un des grands dangers de l'exploitation. Ces gaz hydrocarburés sont enfermés dans les couches à une pression énorme; ils se dégagent constamment dans les puits et y occasionnent de nombreuses asphyxies. L'emploi des lampes Mueseler ou Marsaut est naturellement indispensable, et c'est faute de cette précaution qu'arriva, en 1870, la grande explosion de Dwiniacz.

Pour combattre l'afflux des gaz, un simple ventilateur à main est installé au-dessus de chaque puits. Là aussi cependant il y a eu des essais de concentration; on a établi quelques ventilateurs mûs par des machines à vapeur, et des conduites en zinc, débouchant au fond des puits voisins, viennent se réunir sur le tuyau d'aspiration collecteur. C'est une installation plus efficace, mais qui est encore loin d'être suffisante.

Triage et lavage. — L'abatage donne deux sortes de produits :

Des morceaux d'ozokérite à peu près pure;
Des terres riches en ozokérite.

Les gros morceaux sont fondus tels quels, les terres subissent une série de manipulations destinées à en retirer toute l'ozokérite. Ces opérations sont par ordre :

1. Triage à la main;
2. Lavage à l'eau froide;
3. Lavage à l'eau chaude;
4. Traitement à la benzine et à la vapeur d'eau.

1. Le *triage à la main* retire des terres tous les fragments d'ozokérite de quelque importance; il se fait au-

tour des puits. Les femmes occupées à ce travail sont munies d'une pioche avec laquelle elles aplatissent les morceaux d'ozokérite pour les débarrasser de la terre qui les enveloppe.

Après ce triage, les terres contiennent encore 8 à 10 p. 100 d'ozokérite.

2. L'opération suivante est une *séparation par différence de densité*. Les terres amenées à la brouette sont versées dans des bailles pleines d'eau, et on brasse à la pelle. L'ozokérite libre monte à la surface, et on la retire à l'aide d'un crible servant d'écumoire.

Les cuves servant à cette opération sont des bailles en bois ou bien les chaudières en fonte de l'opération n° 3.

Après ce lavage, les terres ne contiennent plus que 4 à 5 p. 100 d'ozokérite.

3. Le lavage à l'eau froide ne retire que les fragments d'ozokérite non intimement mélangés aux terres; le *lavage à l'eau bouillante* a pour but d'isoler les parties fines disséminées dans la masse terreuse.

A cet effet, on verse les terres par 100 à 150 kilogrammes dans des cuves en fonte pleines d'eau bouillante; l'ozokérite, fusible au-dessous de 100 degrés, fond immédiatement et vient se rassembler à la surface sous forme d'écume noirâtre qu'on enlève à l'aide d'un crible servant d'écumoire.

Diamètre des chaudières	1m,00 à 1m,50
Profondeur	1m,00

Les terres traitées à l'eau bouillante ne contiennent plus que 1 à 1,5 p. 100 d'ozokérite.

4. Pendant longtemps l'extraction de l'ozokérite n'a pas été poussée plus loin; les terres lavées à l'eau bouillante étaient alors portées aux haldes. M. van Haecht a eu l'idée d'acheter toutes ces terres à un prix très

minime, et d'entreprendre leur *traitement à la benzine et à la vapeur d'eau*. Un lavage méthodique à la benzine dans une sorte d'appareil à épuisement dissout à peu près les dernières traces d'ozokérite, qu'on isole ensuite par distillation de la benzine au moyen de la vapeur d'eau. L'opération faite dans un appareil absolument fermé ne donne aucune perte de benzine et il y a épuration de l'ozokérite, car sous l'influence de la vapeur d'eau ce corps laisse dégager presque toute la benzine qu'il contient. Le produit ainsi obtenu est très pur et a sur les autres qualités une plus-value considérable; quand la première qualité d'ozokérite brute fondue vaut 50 francs, le produit obtenu par M. van Haecht vaut 60 francs.

Fusion et coulée en pains. — Avant d'être livrée au commerce, l'ozokérite est coulée en pains tronconiques de 50 à 60 kilogrammes. La fusion se fait dans des chaudières en fonte chauffées directement.

Les frais de triage, lavage et fusion jusqu'à l'ozokérite marchande s'élèvent environ à 40-50 kreutzers par quintal (0f,80 à 1 franc).

On distingue deux et quelquefois trois qualités d'ozokérite. La première qualité ne doit contenir aucune trace de terre; elle est transparente en lames minces, et sa couleur varie du jaune au brun vert. Mais les vendeurs introduisent souvent dans les pains des corps étrangers et quelquefois dans la proportion de 20 p. 100. On incorpore, par exemple, des huiles brutes, des huiles lourdes, des résidus de raffineries, de l'asphalte et parfois aussi simplement de la terre. Afin de cacher la fraude, la coulée se fait alors en deux fois : un premier pain d'ozokérite impure est recouvert d'une couche d'ozokérite à peu près pure, et on donne à celle-ci une épaisseur suffisante pour que l'acheteur ne puisse pas constater avec sa hachette l'existence du pain central.

Condition des ouvriers. — L'extraction de l'ozokérite et les opérations de triage, lavage et fusion nécessitent un grand nombre d'ouvriers. Il est difficile de voir une population plus misérable que celle employée aux mines de Boryslaw. Non pas que le travail ne soit pas suffisamment payé ou qu'il abrutisse l'ouvrier, mais l'organisation du travail et le mode de recrutement des ouvriers sont tels qu'ils conduisent fatalement ceux-ci à la misère. Le plus souvent, les ouvriers ne sont attachés à aucune exploitation en particulier ; chaque jour ils changent de maître. Tous les matins, à certains endroits déterminés, ils se réunissent en un véritable marché ; les propriétaires de puits ou leurs agents choisissent les individus qui leur conviennent, et, si ceux-ci ne veulent pas descendre, on a bientôt fait de les convaincre avec une bouteille de « schnaps ». Ces faits expliquent la mortalité effrayante due aux accidents que d'ailleurs les exploitants se gardent bien de déclarer. Et on peut estimer que le chiffre de la population ouvrière de Boryslaw est voisin de dix à douze mille !

Les salaires varient, en général, de 1 à 2 francs par jour.

Police des mines. — Depuis 1878, on a essayé d'établir une certaine surveillance sur les exploitations de Boryslaw. Il ne semble pas qu'il en soit résulté une grande amélioration.

D'une manière générale, la surveillance technique de toute la contrée pétrolifère est entre les mains de la *Bezirkshauptmannschaft*. En raison de l'importance de Boryslaw, on a installé, dans cette ville, un *contrôle de surveillance technique* spécial, chargé de la police des mines et de la surveillance administrative.

L'inspection des mines de Boryslaw comprend :

1 inspecteur, qui doit être un homme technique,

1 caissier,
1 géomètre,
3 surveillants des exploitations,
6 ou 8 agents de police.

Les frais de la surveillance sont à la charge des exploitants, à raison de 2 florins par puits.

Conditions économiques.

Prix de revient. — Avec les exploitations actuelles de Boryslaw, il est assez difficile d'établir le prix de revient moyen du quintal d'ozokérite. Les chiffres suivants peuvent cependant en donner une idée :

Salaires journaliers en francs	des mineurs. . .	1f,60 à 2f,00
	des manœuvres.	1f,00
	des femmes . . .	0f,80

En général, les puits et les galeries sont entrepris à forfait.

Prix moyen du mètre courant de puits à section de 1 mèt. carré, sans cuvelage et jusqu'à 130 mètres.	40 à 50 fr.
Prix du mètre de galerie sans boisage (hauteur, 1m,80 ; largeur à la base, 1m,20 ; largeur au plafond, 0m,80)	10 à 16 fr.

En fait, on peut compter avec le cuvelage :

Pour un puits de 100 mètres.	4.000 à 8.000 fr.
Pour un puits de 200 à 225 mètres.	20.000 à 25.000 fr.

Un puits occupe en moyenne :

3 manœuvres à 1 fr.	3f,00
1 femme à 0f,80.	0f,80
2 mineurs à 1f,75.	3f,50
Total des salaires	7f,30

La part afférente aux salaires dans les frais annuels est donc d'environ 2.000 à 3.000 francs par puits.

On peut estimer à 3.000 à 4.000 francs par puits tous les autres frais, y compris les intérêts d'argent; et par suite, la somme totale des frais s'élève à 7.000 à 8.000 francs par puits.

D'un autre côté la production moyenne d'un puits est annuellement de 15 à 18 tonnes d'ozokérite.

Le prix de revient moyen calculé d'après ces données concorde à peu près avec celui indiqué par les exploitants :

Prix de revient moyen du quintal métrique (100 kil.), 32 à 36 fr.

Ce chiffre s'abaisse à 20 et même à 16 francs dans quelques puits, tandis que dans d'autres il s'élève à 48 francs.

Prix de vente et bénéfice. — On peut établir le bénéfice en comparant le prix de revient au prix de vente. Celui-ci, assez variable, est surtout fonction de la plus ou moins grande productivité des puits. On ne connaît pas, en effet, à Boryslaw les stocks d'ozokérite, et chaque exploitant vend ses produits au fur et à mesure de l'extraction.

Les prix ordinaires sont les suivants pour le quintal métrique d'ozokérite fondue, prise sur les lieux de production :

1re qualité	58 à 70 fr.
2e qualité	44 à 48
3e qualité	38

En 1876-1877, le prix moyen était de 64 francs.

En 1878, le prix moyen était de 56-61 francs.

En 1874-1875, une très grande production jointe à un défaut dans la demande avait fait baisser ce prix à 44 francs; quelques exploitants faisaient même marché à 36 francs.

En 1886, il oscillait entre 50 et 60 francs.

Le bénéfice calculé d'après les prix moyens s'établit alors par différence :

Prix de vente du quintal	48 à 50 fr.
Prix de revient du quintal	36 à 32
Bénéfice par quintal.	12 à 18 fr.

Statistique.

Importance de Boryslaw. — Les chiffres qui précèdent montrent les bénéfices énormes que donnent les exploitations d'ozokérite, malgré les procédés barbares qui y sont en usage. Aussi les terrains sont à des prix exorbitants, et les heureux possesseurs de quelque parcelle dans la région riche réalisent de très grandes fortunes. Boryslaw est maintenant un des marchés importants de l'Autriche, au point de vue du chiffre des affaires qui s'y traitent. La production annuelle a en effet varié jusqu'à présent de 4.000 à 18.000 tonnes; et, dans certaines années, la valeur du produit extrait a dépassé *neuf millions* de francs.

Le nombre total des puits est d'environ 13.000; ils sont répartis sur une surface de 90 hectares; mais la zone riche comprend seulement 60 hectares avec 1.000 à 1.200 puits en activité.

Actuellement, la production totale de Boryslaw varie de 18 à 22 wagons de 10 tonnes par semaine, ce qui représente annuellement une valeur de cinq millions.

Le bénéfice que les exploitants réalisent peut être évalué de 1.250.000 à 2.000.000 de francs.

Autres gîtes d'ozokérite. — Boryslaw n'est pas le seul point de la chaîne des Carpathes où se rencontre l'ozokérite. Ce corps est connu et exploité en trois autres points (Truskawice, Starunia et Dwniacz) et toujours dans le miocène.

Truskawice est situé tout près de Boryslaw, sur la limite des affleurements miocènes. On y trouve à la fois du pétrole, de l'ozokérite et un grand nombre de sulfures divers. Les argiles et les marnes sableuses situées à une demi-heure au nord de ce village ont même donné lieu autrefois à des exploitations de plomb et de zinc. Les travaux sont maintenant abandonnés et les puits hors d'usage.

Actuellement, la production totale de Truskawice en ozokérite est de 10 wagons par mois, et la valeur du produit extrait par an d'environ 600.000 francs.

Starunia est à 35 kilomètres au sud de la station de Stanislau, sur le chemin de fer de Lemberg à Czernowitz. Au-dessous des alluvions dont l'épaisseur ne dépasse pas 5 mètres, on trouve des alternances de grès et d'argiles; les grès sont imprégnés de pétrole très paraffiné, et, comme à Boryslaw, l'ozokérite existe en couches et en filons.

La production totale en ozokérite est de 25 wagons par mois, ce qui représente annuellement une valeur de 1.500.000 francs.

De plus la région paraît riche en pétrole, car plusieurs puits de 20 mètres ont donné jusqu'à 300 barils d'huile par jour.

Dwiniacz, au voisinage de Starunia, présente une constitution géologique identique.

La production mensuelle est de 15 wagons d'ozokérite, ce qui représente par an une valeur de 900.000 francs.

Statistique de la production d'ozokérite. — On peut résumer la statistique de la production d'ozokérite dans le tableau suivant, qui met bien en évidence l'importance des exploitations de la chaîne des Carpathes :

	Nombre de wagons de 10 tonnes expédiés par mois.	Valeur de l'ozokérite extraite annuellement.
Boryslaw	85	5.000.000 fr.
Truskawice.	10	600.000
Starunia	25	1.500.000
Dwiniacz	15	900.000
Total.	135	8.000.000 fr.

L'ozokérite extraite annuellement représente donc une valeur créée de 8 millions de francs. Le bénéfice réalisé par les exploitants est environ de 2.500.000 francs.

II. — LE PÉTROLE A SLOBODA.

A trois milles et demi de Kolomea, tout à fait dans la partie est de la zone pétrolifère, on rencontre la région maintenant la plus célèbre des Carpathes au point de vue de l'exploitation des pétroles : la région de *Sloboda rungurska.*

Description du gîte.

Constitution géologique. — La constitution géologique des environs de Kolomea est identique à celle de Boryslaw; en quelques points on rencontre le miocène, cependant les émanations hydrocarburées sont venues surtout dans les terrains éocènes. Il paraît bien certain, en effet, que les couches de Sloboda doivent être rangées dans l'éocène, bien que certains géologues continuent encore à les regarder comme appartenant au miocène salifère.

Les exploitations sont concentrées dans une clairière occupant le fond de la vallée et entourée par les forêts de l'État.

Au-dessous des alluvions, formées par des couches de limons plus ou moins sableux, les sondages traversent

une série d'alternances de schistes et de grès. Les schistes sont rouges ou verts et plus ou moins marneux, et les grès parfois très durs sont quelquefois à petits grains, mais le plus souvent à gros grains. La direction des couches est toujours heure 20-21, et leur pendage assez fortement incliné vers le sud-ouest.

Distribution de l'huile. Fractures et couches imprégnées. — Pour étudier la distribution de l'huile minérale, il y a lieu de rechercher :

1° Les *couches* qui ont pu servir de réceptacle pour les émanations hydrocarburées, couches plus ou moins perméables, telles que grès, sables ou calcaires fissurés;

2° Les *failles* par lesquelles sont venues ces émanations.

La considération des gisements d'ozokérite vient singulièrement faciliter ce double problème. On doit, en effet, prévoir que le mode de gisement du pétrole à Sloboda est identique au mode de gisement de l'ozokérite à Boryslaw, à Starunia et à Dwiniacz, et que les terrains y sont recoupés non seulement par des paraclases, fractures génératrices des émanations hydrocarburées, mais encore par un grand nombre de fissures secondaires, diaclases et leptoclases, qui ont servi à étendre au loin l'imprégnation des roches perméables.

Le pétrole ne sera donc pas concentré exclusivement au voisinage des failles génératrices; mais, conduit principalement par les diaclases et par les diastromes ou fissures interstratifiées, il saturera toute une région.

On constate, en effet, qu'à Sloboda comme à Boryslaw, dans un rectangle assez bien déterminé, tous les puits ou sondages qui atteignent la profondeur voulue sont productifs. L'expérience a vite fait de déterminer cette zone productive par quelques sondages, et on est alors sûr d'arriver à un résultat heureux dans le périmètre qui la détermine.

Parmi les couches de Sloboda, les grès sont les seuls qui se soient imprégnés, et encore d'une façon bien inégale suivant la nature de ces grès. En fait, les sondages semblent accuser, jusqu'à la profondeur de 300 mètres, trois niveaux pétrolifères réellement exploitables.

L'inclinaison des couches, jointe à la forte déclivité du sol, fait varier suivant les points les coupes géologiques fournies par les sondages; ces coupes ont d'ailleurs été rarement relevées. Nous citerons seulement celle relevée dans un puits de 245 mètres de profondeur. Ce puits a traversé successivement :

	mètres
Alternances de schistes verts et rouges.	85,00
Alternances de petits lits de schistes et de grès. .	35,00
Schistes durs	13,75
Grès durs formant un niveau pétrolifère.	15,00
Schistes	2,50
Grès durs	10,25
Alternances de bancs de 1 à 10 mètres de grès et de marnes.	51,87
Grès formant un second niveau pétrolifère plus important que le premier.	44,38

Quant aux failles principales, elles sont loin encore d'être déterminées d'une manière certaine. Leur direction constante est heure 20-21, mais pour trouver un point de l'une d'elles on est obligé de s'en remettre à peu près au hasard. En fait, on peut admettre que les puits les plus productifs sont au voisinage immédiat des fractures les plus importantes, car celles-ci déterminent évidemment en plan les lignes de plus grande productivité.

Dans une région déjà explorée par quelques sondages, on obtient donc approximativement les lignes de meilleur emplacement, en traçant par les puits les plus productifs des lignes parallèles à la direction heure 20-21.

Après avoir foncé les premiers puits au voisinage de

ces lignes, on dispose les autres puits en quinconce, de façon à épuiser complètement le niveau pétrolifère. Afin de ne pas faire double emploi, les sondages ne doivent pas s'influencer réciproquement. L'expérience a montré que la distance de 20 mètres entre chacun de ceux-ci était suffisante, et cette distance a été adoptée par l'administration des mines comme règle servant à limiter les droits des propriétaires voisins. Sur cent puits foncés dans ces conditions à Sloboda, il n'y a qu'un seul exemple de solidarité pour deux puits, dont la distance était seulement de 14 mètres; le puits d'aval a enlevé à celui d'amont les 100 barils qu'il rendait par jour.

Exploitation.

Développement de Sloboda. — Le pétrole fut découvert à Sloboda en 1771, à la profondeur d'environ 70 pieds, par deux puits foncés pour la recherche du sel. Le rendement fut d'une centaine de kilogrammes par jour.

L'un d'eux, le puits Stanislawa, subit ensuite une série d'approfondissements qui augmentèrent constamment son débit. A l'origine, le puits avait $1^m,50$ de diamètre et était revêtu en charpente; en 1865, il fut poussé de la même façon à la profondeur de 50 mètres, et rendit 5 barils par jour. Ce débit se maintint jusqu'en 1884; il n'avait pas été sensiblement modifié par un trou de sonde percé en 1875 dans l'axe du puits jusqu'à 150 mètres.

En 1884, un nouvel approfondissement porta le puits à 213 mètres, et, depuis ce temps, le rendement s'est maintenu à 10 barils par jour.

En réalité, le grand développement de Sloboda date seulement de 1881. La surface exploitable est évaluée à 350 hectares, et, dans cet espace, tout puits poussé à la profondeur voulue est productif. Les résultats heureux obtenus dès l'abord n'ont pas tardé à attirer une multi-

tude de spéculateurs, qui ont presque tous fait fortune, malgré l'insuffisance de leurs moyens financiers et le défaut de connaissances techniques dans l'art du sondeur.

Les premiers explorateurs se sont surtout préoccupés de l'économie dans l'établissement des puits, et, même encore aujourd'hui, on rencontre quelques vieux équipages de sonde fonctionnant dans les plus mauvaises conditions possibles. C'est principalement à des matériels de sondage imparfaits et incomplets qu'il faut attribuer les insuccès; et l'abandon d'un grand nombre de puits a eu pour cause l'emploi de tubes de 15/10 de millimètres, beaucoup trop faibles et sujets à se déformer. Le battage amenait, en effet, la dislocation des joints et la destruction des tubes, dont les débris ne tardaient pas à obstruer le trou de sonde ou à coïncer le trépan.

Sondages. Systèmes rapides. — De même que dans presque toutes les régions pétrolifères, la méthode d'exploitation par sondages s'est entièrement substituée à l'exploitation par puits boisés.

Il y a peu d'années cependant, les puits de Sloboda étaient foncés avec une section variant de $1^m \times 1^m,30$ à $2^m \times 2^m,60$. Le fonçage était donné à l'entreprise, et suivant la dureté des couches et la profondeur atteinte, profondeur ne dépassant pas 100 à 150 mètres, on payait un prix variant de $2^{fl},50$ à 60 florins par mètre courant.

Les premiers sondages furent d'abord faits à la main; mais tous les équipages de sonde comprennent maintenant une locomobile chauffée au bois; on produit même, autant que possible, la vapeur par la combustion des gaz qui s'échappent des forages.

La chute libre fut pendant longtemps le seul système appliqué; c'est seulement depuis quelques mois que fonctionnent, et avec le plus grand succès, des appareils du système Fabian et des appareils canadiens.

Système Canadien. — Le système Canadien, tel qu'il est appliqué à Sloboda, est caractérisé :

1° Par le *battage à glissière* (Pl. V, *fig.* 4), à l'aide d'une manivelle actionnant le levier de battage ;

2° Par l'*emploi de barres de frêne* remplaçant les tiges en fer et supprimant les contrepoids (*fig.* 5) ;

3° Par les *ailes élargisseuses* qui surmontent le trépan et qui permettent de faire suivre le tubage ;

4° Par *un tubage étanche à vis*, très lourd, et dont le poids suffit pour la descente.

Les tubes sont le plus souvent en fer étiré avec renflement conique pour la vis (*fig.* 6). On commence à employer avec succès des manchons rivés avec mattage et mastic pour assurer l'étanchéité de la colonne. Ces tubes réalisent sur les premiers une économie de 50 p. 100 sur le prix du tubage, et le poids des tubes est 1/3 moins considérable.

L'appareil extérieur du système Canadien (*fig.* 3, Pl. V) est excessivement simple, et toutes les manœuvres se font avec une rapidité remarquable. Une locomobile suffit pour le battage, la montée et la descente des tiges, et la manœuvre de la cloche à soupape. Placée à une dizaine de mètres seulement de l'orifice du puits, elle actionne par une courroie ou un câble de transmission une grande poulie formant volant et montée sur l'arbre moteur principal. Cet arbre moteur porte :

Une manivelle à rayon variable (*fig.* 11) agissant sur le levier de battage par l'intermédiaire d'une bielle ;

Un cône d'engrenage par friction pouvant actionner le treuil de la cloche à soupape ;

Une poulie actionnant par une courroie à embrayage volontaire le treuil pour la montée ou la descente des tiges.

Trois leviers de commande sont placés sur le bord du trou de sonde à portée de la main du sondeur ; ils permettent :

D'embrayer le treuil de la cloche à soupape ;

D'embrayer le treuil pour la descente et la montée des tiges ;

De régler ou d'arrêter complètement le mouvement de ce dernier treuil par un frein à ruban.

Le levier de battage peut se mouvoir légèrement dans un plan perpendiculaire au plan d'oscillations ; ce jeu permet de rendre la bielle indépendante de la manivelle ou au contraire de l'adapter au bouton de celle-ci par une manœuvre très facile et sans qu'il soit nécessaire de démonter aucun organe.

Afin d'augmenter la rapidité des manœuvres et d'éviter le gauchissement des tiges, celles-ci, au lieu d'être déposées dans un coin de la barraque du chevalement, sont suspendues par leur tête dans le puits servant d'amorce au trou de sonde.

Enfin, une dernière disposition propre aux systèmes rapides et pour ainsi dire indispensable au système Canadien consiste dans l'emploi simultané pour l'allongement de la tige, d'une vis (*fig.* 7) pour les faibles allongements et d'une chaîne enroulée sur un treuil à cliquet (*fig.* 8 et 9), pour les allongements plus considérables.

Système Fabian. — A côté du système Canadien, le système Fabian fonctionne avec des résultats comparables. On y a adapté tout le dispositif canadien extérieur ; et les deux systèmes ne diffèrent guère que par la glissière et par la nature des tiges. Le système Fabian est en effet caractérisé :

1° Par une glissière munie d'un cran permettant d'accrocher le trépan. Un simple mouvement de rotation donné à la tige par le sondeur suffit pour cette manœuvre qui nécessite cependant une assez grande habileté de la

part de celui qui la dirige. Le trépan fonctionne donc à chute libre;

2° Par des tiges en fer ou en acier de 12 à 15 mètres de longueur qu'il est indispensable de suspendre dans le puits servant d'amorce au trou de soude.

Comparaison du système Canadien avec les systèmes à chute libre. — Les systèmes rapides et en particulier le système Canadien présentent pour les exploitations de pétrole deux avantages énormes : réduction dans la durée du forage, économie dans le prix de revient. A Sloboda, il faut environ trois mois pour forer un puit de 300 mètres par le système Canadien; les systèmes à chute libre n'arrivent à la même profondeur qu'au bout de quatre mois. Le prix de revient du puits varie de 25.000 à 26.000 francs par le système Canadien et de 30.000 à 35.000 francs par les systèmes à chute libre. Aussi la tendance actuelle est-elle de donner la préférence au système Canadien.

A côté des avantages ci-dessus énumérés, il faut cependant considérer les inconvénients. L'un des plus graves est le rapide rétrécissement du trou de sonde par suite des fréquents coïncements du tubage. On est obligé d'envoyer plusieurs colonnes de tubes pendant la durée d'un forage, et chaque nouvelle colonne réduit le diamètre d'environ 7 à 8 centimètres. Aussi les trous de sonde commencés avec un diamètre de 35 à 40 centimètres n'arrivent-ils guère à 300 mètres qu'avec un diamètre de 8 à 10 centimètres.

Il est à remarquer que dans le système Canadien on ne place jamais de colonnes perdues afin de retirer les tubes lorsque c'est possible.

La substitution des courroies ou des engrenages par friction aux roues dentées offre un autre inconvénient assez grave; en cas d'accident, on ne dispose pas d'une force assez grande pour la manœuvre efficace des caracoles, pinces et autres instruments de sauvetage. Il résulte de là que le nombre des puits perdus par accidents est plus fort qu'avec les systèmes à chute libre, et s'élève à environ 10 p. 100.

Durée et rendement des puits. — Malgré ces inconvénients, les sondeurs donnent maintenant la préférence au système Canadien; et c'est de l'application des méthodes de sondages rapides et économiques que date le développement rapide de Sloboda. Les résultats obtenus sont maintenant excellents, et la région de Sloboda est la plus célèbre dans les Carpathes au point de vue de l'exploitation des pétroles, grâce au débit et à la durée des puits.

Bien que la plupart des sondeurs ne semblent encore tenir aucun compte des directions heure 20-21, précédemment indiquées et placent leurs puits absolument au hasard, le débit des puits est cependant comparable au débit des puits de Pensylvanie. On a en effet reconnu que le débit moyen est de 25 à 30 barils par jour.

Plusieurs puits donnent ou ont donné 100 barils, quelques-uns 200 barils. Souvent, au début, il y a jaillissement, et ces *flowing-well*, s'ils ne sont pas un danger pour l'exploitation, occasionnent du moins des pertes quelquefois considérables. Le jaillissement s'arrête d'ailleurs au bout de quelque temps, et c'est alors qu'on installe les pompes (Pl. V, *fig.* 10).

Le développement de Sloboda est encore trop récent pour qu'on puisse établir la durée moyenne des puits. Jusqu'à présent cependant elle paraît être plus grande que celle des puits du Caucase et des puits d'Amérique. Ce fait semblerait d'ailleurs tenir uniquement au peu d'ouverture que présentent les fractures du terrain pétrolifère en Galicie; ces fractures sont en effet les canaux d'écoulement du pétrole vers le puits et comme les canaux d'exsudation de la roche imprégnée. L'exiguïté de

ces fractures explique d'ailleurs en même temps l'indépendance des puits voisins. En fait, et bien que plusieurs puits fonctionnent depuis plus de dix ans avec un débit presque sensiblement constant, on peut admettre que la durée moyenne des puits est de deux ans.

Jusqu'à la profondeur de 300 mètres, la région de Sloboda semble donc être caractérisée par les nombres suivants :

Durée d'un puits.	2 ans
Rendement journalier moyen. .	25 à 30 barils
Rendement total.	15.000 à 20.000 barils.

La production totale de Sloboda est actuellement d'environ 2.000 barils par vingt-quatre heures.

Nature des huiles. — La nature des huiles recueillies à Sloboda est assez variable ; tantôt on rencontre des huiles vertes et tantôt des huiles brunes. Comme dans toutes les régions pétrolifères, la densité des huiles diminue avec la profondeur ; il en est de même de la teneur en paraffine. Tandis que les huiles des couches peu profondes marquent 38° et tiennent 6 p. 100 de paraffine, la densité tombe à 35° et la teneur en paraffine à 1 p. 100 et même à zéro pour les huiles des couches profondes.

On attribue quelquefois la coloration brune des huiles au contact d'une couche d'argile couleur lie de vin contenant des sphérosidérites dont la décomposition donnerait la coloration. Cette argile constitue un horizon d'une constance remarquable et très précieux, non seulement au point de vue géologique, mais aussi au point de vue des exploitations de pétrole ; c'est un indice certain du voisinage de l'huile.

A la distillation, les pétroles de Sloboda donnent en moyenne les résultats suivants par 100 kilogrammes :

	kilogr.
Benzine.	22
Huiles lampantes.	56 à 60
Paraffine	1 à 6
Résidus et pertes.	12

Conditions économiques.

Prix de revient et prix de vente du pétrole brut. — D'après la loi autrichienne, le pétrole comme l'ozokérite n'étant pas une substance concessible appartient aux propriétaires du sol. Parmi ceux-ci, les uns exploitent eux-mêmes, et traitent alors à forfait avec des entrepreneurs de sondages pour un prix déterminé du mètre courant jusqu'à une profondeur déterminée ; les autres cèdent le droit d'exploiter moyennant certaines conditions et redevances. Le plus souvent intervient un contrat de métayage plutôt qu'un contrat de fermage ; l'exploitant s'engage, par exemple, à forer annuellement un certain nombre de puits et à payer une redevance de 50 p. 100 sur le produit brut.

Les chiffres précédemment indiqués et relatifs au rendement des puits et aux frais de forages permettent de donner une idée des conditions économiques qui régissent les exploitations de Sloboda.

Le prix actuel du pétrole est de 12 francs le baril ; le prix moyen était auparavant de 15 francs. Le rendement total d'un puits s'élevant en moyenne et pendant une durée de deux ans de 15.000 à 20.000 barils, le produit brut peut être évalué par puits de 180.000 à 240.000 fr.

Le produit net ou le bénéfice est la différence entre le produit brut et le prix de revient. Or ce prix de revient peut se décomposer comme il suit :

Premier établissement	Forage de 300 mètres, à 112 francs le mètre	33.600 fr.
	Baraque d'abri	1.200
	Pompe	2,000
	Machine à vapeur	4.000
	Frais divers (10 p. 100 des frais précédents)	4.080
	Total	44.880 fr.
Entretien	10 p. 100 des frais de premier établissement	4.488 fr.
Extraction	Bois, 25 francs par jour, pendant 730 jours	18.250 fr.
	2 chauffeurs, à 2 francs par jour	2.920
	Total	21.170 fr.
Frais généraux et divers		9.462 fr.

En résumé, la somme totale des frais comprend :

Frais de premier établissement	44.880 fr.
Frais d'entretien	4.488
Frais d'extraction	21.170
Frais généraux et divers	9.462
Total des frais	80.000 fr.

Lorsque plusieurs puits sont en exploitation simultanément, le prix de revient est sensiblement abaissé. Une seule machine à vapeur suffit, en effet, à actionner plusieurs pompes, ce qui produit une assez grande économie; l'économie est beaucoup plus sensible si la machine est chauffée par les gaz qui s'échappent des puits.

Le produit net d'un puits peut donc être évalué de 80.000 à 160.000 francs.

En général, les exploitants paient aux propriétaires du sol une redevance de 50 p. 100 sur le produit brut; leur bénéfice se réduit donc par puits de 10.000 à 40.000 francs.

Raffinage. — Les pétroles de Sloboda sont traités dans les raffineries voisines ou dans les usines de Fiume. La raffinerie la plus proche est celle de Peczénigyn, à moitié route de Kolomea à Sloboda.

Le transport des pétroles bruts aux usines de Kolomea s'élève à 1 florin par baril; mais le chemin de fer, en exploitation au commencement de 1887, réduira considérablement ce prix. Le transport est à la charge des raffineurs.

Le prix des huiles lampantes est assez variable; lorsque le baril d'huile brute de 150 kilogrammes vaut 15 francs, les huiles d'éclairage, qui paient un impôt fiscal de $6^{fl},50$ à la sortie de l'usine, valent $19^{fl},75$ et $16^{fl},50$ les 100 kilogrammes, suivant qu'il s'agit d'huiles de luxe ou d'huiles ordinaires.

Il est alors facile d'établir la somme prélevée par les raffineurs par baril d'huile brute de 150 kilogrammes. La valeur des produits marchands est en florins :

	florins	florins
Huiles d'éclairage, 84 à 90 kilogr., aux prix ci-dessus indiqués	9,96	13,00
Paraffine, 1,5 à 6 kilogr., à 46 florins les 100 kilogr.	0,69	4,14
Benzine, 33 kilogr., à $16^{fl},25$, les 100 kilogr.	5,36	5,36
Total	16,01	22,50

Si on retranche de la valeur du produit marchand la valeur du pétrole brut, on voit que les raffineurs prélèvent par baril pour frais de distillation et bénéfice, une somme variant de $8^{fl},05$ à 15 florins.

Régime protecteur. — Malgré les résultats très beaux obtenus à Sloboda et en plusieurs autres points du versant nord des Carpathes, l'introduction en Autriche des pétroles russes, soit par le Danube, soit par Fiume, aurait pu arrêter ou du moins entraver le développement de

l'industrie pétrolifère, si le gouvernement autrichien n'avait établi des droits d'importation très élevés. Pour favoriser la Galicie, le même gouvernement a invité les compagnies de chemins de fer à abaisser leurs tarifs autant que possible.

Les droits de douane sont par 100 kilogrammes :

Pour les pétroles bruts.	2ᶠ,40 or =	6 fr.
Pour les pétroles raffinés.	10 ,00 or =	25

C'est grâce à ce régime protecteur que les exploitations de pétrole des environs de Kolomea, et en particulier celles de Sloboda, se sont développées avec une rapidité si remarquable. La production de Sloboda s'élève déjà à environ 2.000 barils par jour, mais elle sera sans doute plus que quintuplée dans peu d'années. Vraisemblablement les droits de douane sont destinés à vivre longtemps encore en Autriche, et, tant qu'ils subsisteront, le prix du pétrole brut ne baissera pas beaucoup, car le chiffre de la production est loin d'atteindre celui de la consommation. Mais, ces droits viendraient-ils même à être supprimés, le rendement actuel des puits est tel, que, dans certains centres de la Galicie, l'industrie du pétrole pourrait lutter avantageusement contre l'importation des pétroles russes.

TABLE DES MATIÈRES.

GÉNÉRALITÉS.

Pages

Introduction 162
Identité géologique de l'ozokérite et du pétrole. 163
Étages riches en hydrocarbures. 164
Géologie générale de la Galicie 165

L'OZOKÉRITE A BORYSLAW.

Description du gisement. 166
Constitution géologique. 166
Distribution de l'ozokérite. 167
Mode de formation du gîte. 169
Exploitation. 169
Méthode d'exploitation proprement dite 169
Extraction. 171
Déblais 171
Extraction de l'eau 172
Ventilation. 173
Triage et lavage. 173
Fusion et coulée en pains. 175
Condition des ouvriers 176
Police des mines 176
Conditions économiques. 177
Prix de revient 177
Prix de vente et bénéfice 178
Statistique 179
Importance de Boryslaw. 179
Autres gîtes d'ozokérite 179
Statistique de la production d'ozokérite 180

LE PÉTROLE A SLOBODA.

Description du gite. 181
Constitution géologique 181
Distribution de l'huile. Fractures et couches imprégnées. 182

	Pages
EXPLOITATION	184
Développement de Sloboda	184
Sondages. Systèmes rapides. — Système Canadien	186
Sondages. Systèmes rapides. — Système Fabian	187
Sondages. Systèmes rapides. — Comparaison du système Canadien avec les systèmes à chute libre.	188
Durée et rendement des puits	189
Nature des huiles	190
CONDITIONS ÉCONOMIQUES	191
Prix de revient et prix de vente du pétrole brut	191
Raffinage	193
Régime protecteur établi sur les pétroles	193

COMMISSION DES SUBSTANCES EXPLOSIVES

SOUS-COMMISSION SPÉCIALE (*)

RAPPORT

SUR

L'ÉTUDE DES QUESTIONS

RELATIVES A

L'EMPLOI DES EXPLOSIFS

EN PRÉSENCE DU GRISOU

HISTORIQUE.

Commission française du grisou. — La Commission française du grisou, instituée par la loi du 26 mars 1877, avait manifesté le désir que la commission des substances explosives examinât si, en modifiant la nature ou le

(*) Cette Sous-Commission est composée de :

MM. Mallard, inspecteur général des mines, *président;*
Cornu, membre de l'Institut, ingénieur en chef des mines;
Sarrau, membre de l'Institut, ingénieur en chef des poudres;
Colonel Sebert;
Colonel Castan;
Lambert, ingénieur en chef des poudres;
Haffen, chef de bataillon du génie;
Aguillon, ingénieur en chef des mines;
Le Chatelier, ingénieur des mines;
Vieille, ingénieur des poudres;
Bruneau, ingénieur des poudres, *secrétaire.*

mode d'emploi des explosifs, on pouvait atténuer l'effet des explosions de grisou résultant du tirage des coups de mine. A cet effet, M. Aguillon, ingénieur des mines, avait été attaché temporairement à la Commission des substances explosives, qui voulut bien étudier attentivement la question, et fit connaître ses conclusions dans un rapport rédigé par M. Aguillon et approuvé dans la séance du 2 décembre 1880.

La Commission émettait l'avis que, la température d'inflammation du grisou étant de 6 à 700 degrés, il n'existait aucun explosif dont la température de détonation fût inférieure à ce chiffre. D'autre part, elle considérait comme à peu près impossible de trouver un procédé dont on puisse affirmer qu'il empêche avec certitude le contact de la flamme de l'explosif avec le grisou.

Commission anglaise. — La commission anglaise du grisou, instituée peu après la Commission française, a clos ses recherches en 1886 seulement (*). Ses travaux sur les substances explosives furent dirigés par sir F. Abel, l'un de ses membres les plus illustres.

Il fut constaté que la poudre noire, enfermée dans des trous de mine, de 2 pieds de profondeur, bourrés complètement à l'eau, allumaient quatre fois sur six, en débourrant, un mélange d'air et de grisou.

Sur les indications de sir F. Abel, on remplaça la poudre noire par la dynamite, le fulmicoton comprimé ou le fulmicoton mêlé à une proportion d'azotate (salpêtre ou azotate de baryte) nécessaire pour la complète combustion de son carbone. Dans des expériences faites avec des

(*) *Final Report of her Majesty's Commissionners appointed to inquire into Accidents in Mines* (15 mars 1886). — Voir aussi : *Accidents in Mines* by sir F. Abel. (Minutes of Proceedings of the Institution of Civil Engineers (24 mai 1887).

trous débourrants, il fut constaté qu'une charge de 3 onces (93^{gr}) de dynamite, placée au fond d'un trou de mine de 0^{m},60 et bourrée seulement avec 15 à 16^{cm} de sable, allumait un mélange détonant d'air et de grisou.

Une charge d'un des explosifs brisants ci-dessus mentionnés, placée au fond d'un trou de mine et bourrée avec des cylindres remplis d'eau (procédé Mac-Nab) n'enflamma pas des mélanges d'air et de grisou non détonants par eux-mêmes, mais rendus inflammables par l'addition d'une quantité suffisante de poussière de houille. Dans des conditions identiques, et avec les mêmes mélanges, la poudre noire produisait l'inflammation.

Sir F. Abel avait proposé, en 1873, de faire détoner les explosifs au milieu de l'eau, de manière à produire sur les parois du trou une répartition parfaitement égale de la pression (*). Il eut l'idée de recourir à ce procédé, pour assurer la sécurité. Des expériences faites dans le charbon montrèrent que si le procédé de sir F. Abel avait de réels avantages économiques surtout dans le tirage au charbon, il produisait à peu près les mêmes effets que le procédé Mac-Nab au point de vue de la sécurité. Les mélanges d'air et de grisou rendus détonants par la présence de la poussière n'étaient jamais allumés, mais sur 42 coups tirés avec la dynamite, on produisit six fois l'allumage d'un mélange d'air et de grisou.

M. Galloway ayant proposé de placer directement au-dessus de l'explosif, de la mousse imbibée d'eau, la

(*) On a proposé et breveté, pour maintenir la cartouche au sein de l'eau, sous le nom de *cartouche Settle*, un sac en papier imperméable, du diamètre du trou de mine, que l'on remplit d'eau, et dans l'axe duquel la cartouche explosive est maintenue. A cet effet la cartouche s'engage dans un cylindre en fer-blanc muni d'ailettes. — Sir F. Abel conteste formellement la validité du brevet.

Commission constata que ce procédé avait à peu près, avec un léger avantage, le même effet que l'eau.

La Commission n'obtint aucun résultat satisfaisant par l'emploi d'un procédé assez singulier, proposé par M. Galloway et consistant à placer, au-dessus de la cartouche, de l'acide carbonique liquéfié renfermé dans des cylindres en fer.

Elle repoussa d'ailleurs l'emploi, comme bourrage, de matières solides susceptibles de donner, sous l'influence de la chaleur, un dégagement considérable d'eau ou de gaz, telles que le carbonate de soude cristallisé, la calcite, etc. Sir F. Abel fit remarquer avec raison que le temps manquerait certainement, à cause de la soudaineté de la détonation, pour que le dégagement prévu pût se produire.

En résumé, la Commission anglaise préconise l'emploi de la dynamite gélatinée (comme résistant mieux à l'action de l'eau). La cartouche étant placée au fond du trou, elle recommande de verser de l'eau pour remplir le vide existant entre les parois de la cartouche et celles du trou, de bourrer ensuite avec de la mousse imbibée d'eau sur la moitié de la hauteur du trou, et d'achever le remplissage avec l'eau. Elle fait remarquer que ce procédé suffisant contre les mélanges d'air et de grisou non détonants par eux-mêmes, mais rendus détonants par la présence de la poussière de houille, n'a pas une efficacité certaine lorsque le mélange d'air et de grisou est réellement détonant par lui-même.

La Commission se prononce d'ailleurs nettement contre l'emploi de la mèche Bickford et pour celui de l'électricité.

Commission prussienne. — La Commission prussienne du grisou, instituée le 6 octobre 1880, a publié les résultats de ses recherches au fur et à mesure de l'avancement des travaux.

La plupart des expériences entreprises par elle sur les explosifs, ont été faites dans le courant de 1885, et les résultats, après avoir été mentionnés dans divers journaux techniques, furent publiés officiellement en 1886 (*). De nouvelles expériences ont été faites, dans les mêmes conditions que les premières, de mai à septembre 1887, et les résultats n'en ont été publiés que dans les derniers cahiers du *Journal officiel des Mines* pour 1887 (**).

Les expériences de la Commission prussienne étaient faites dans une longue galerie artificielle, construite sur le plâtre de la mine König, près de Neunkirchen (Saarbruck). On pouvait, avec des toiles, isoler dans cette galerie un compartiment de 20 mètres cubes de capacité, dans lequel on faisait arriver le grisou capté de la mine, de manière à former un mélange détonant. La composition de ce mélange était connue par l'abaissement de la cloche du gazomètre dans lequel le gaz était renfermé.

Les cartouches explosives étaient, soit posées à terre, soit bourrées au fond de trous de $0^m,50$ à $0^m,60$ de profondeur, percés dans des blocs de grès ou de charbon, de $0^m,80$ à 1 mètre de longueur, $0^m,70$ à $0^m,80$ de largeur et $0^m,50$ d'épaisseur. Les blocs étaient recouverts d'une couche de $0^m,20$ à $0^m,30$ de poussière de houille. Le sol de la galerie était recouvert de poussière de houille sur 10 à 20 mètres de longueur.

La détonation du grisou était constatée en observant, à travers des fenêtres convenablement placées, la flamme produite par cette détonation.

Les résultats obtenus par la Commission prussienne ont été assez peu concordants, et ses conclusions ont notablement varié avec le temps.

(*) *Anlagen zum Haupt-Berichte der Preussischen Schlagwetter Commission*, B. IV, p. 63-78.

(**) *Zeitschrift für Berg, Hütten und Salinen Wesen*, B. XXXV. 3 et 4. H, p. 271 et 852 (1887).

Ces contradictions nous semblent tenir, en outre de celles qui tiennent au sujet même, que nous avons aussi rencontrées, et dont la raison sera expliquée plus loin, à plusieurs causes, parmi lesquelles les principales nous paraissent être les suivantes :

1° On opérait souvent avec des mélanges trop peu riches en grisou et à peu près ininflammables (5 à 7 p. 100 de grisou);

2° On n'avait pas de moyen de s'assurer que l'explosif avait détoné d'une façon sérieuse. Nous verrons plus loin que cette condition est de toutes la plus importante à connaître.

Quoiqu'il en soit, les principaux résultats auxquels est successivement arrivée la Commission sont les suivants :

La *dynamite* qui, jusqu'en juin 1885, n'avait allumé qu'une fois le grisou en détonant à l'air libre, l'a à peu près constamment allumé dans les expériences de juillet de la même année. La Commission a attribué ce changement à la substitution d'une dynamite *maigre*, c'est-à-dire dans laquelle la nitroglycérine est très bien absorbée par la silice, à une dynamite *grasse*, d'où la nitroglycérine a quelque tendance à exsuder.

La *dynamite-gomme* (*), en 1885, n'avait jamais allumé le grisou à l'air libre, et ne l'avait enflammé qu'une fois, fortement bourrée au fond d'un trou de mine, avec un gaz tenant 9 p. 100 de grisou.

En 1887, on a obtenu l'inflammation par la détonation à l'air libre. En revanche on n'a pas obtenu, même avec de fortes charges (280^{gr}), l'allumage du mélange gazeux à 10 p. 100 de grisou, lorsque la cartouche était bourrée dans des trous de mine percés dans des blocs de grès.

(*) La dynamite-gomme est formée par une dissolution de coton-poudre dans la nitroglycérine.

La *dynamite-gélatine n° I* (*) n'a pas allumé le grisou en 1885; en 1887, elle a allumé le grisou et les poussières de houille, en détonant à l'air libre. Mais une charge de 300^{gr} bourrée au fond d'un trou de mine n'a pas allumé le mélange gazeux à 10 p. 100 de grisou, tandis que dans les mêmes conditions une charge de poudre noire de 230^{gr} produisit l'explosion.

La *dynamite-gélatine n° III* (**), qui détone difficilement, a allumé le grisou en détonant à l'air libre, en 1885 et 1887.

Le *coton-poudre comprimé* (***) n'a allumé le grisou en détonant, soit à l'air libre, soit bourré au fond d'un trou, ni en 1885 ni en 1887.

Le *coton-poudre mêlé de 50 p. 100 d'azotate de baryte*, non essayé en 1885, a allumé le grisou en 1887, en détonant à l'air libre.

La *hellhoffite* (****) n'a pas allumé le grisou en 1885, en détonant soit à l'air libre, soit bourrée au fond d'un trou de mine. Les expériences n'ont pas été reprises en 1887.

La *carbonite* est formée d'un mélange de salpêtre, de cellulose, et d'un mélange de nitroglycérine avec une huile sulfurée particulière (*****). Les inventeurs avaient proposé deux sortes de cette matière. Le n° 1 alluma la poussière de houille seule. Le n° 2 se montra pleinement sûr, dans 42 essais faits avec des cartouches de

(*) Mélange de 65 p. 100 de dynamite-gomme et de 35 p. 100 d'une poudre formée de salpêtre et d'un corps carboné (cellulose, charbon).

(**) Mélange de 25 p. 100 de dynamite-gomme et de 65 p. 100 de la même poudre que ci-dessus.

(***) On ne donne pas sa teneur en azote.

(****) Mélange de dinitrobenzol et d'acide azotique concentré.

(*****) Sir F. Abel (*Min. of Proc. of the Inst. of Civil Eng., loc. cit.*), dit la carbonite formée de salpêtre, de nitrate de baryte, de nitrobenzol et de cellulose. Il n'admet pas qu'elle puisse procurer la sécurité, parce que, dit-il, son explosion doit être accompagnée de flammes.

100 grammes, en détonant au milieu de mélanges tenant jusqu'à 9 p. 100 de grisou. On l'employa alors en grand dans la mine König, pour l'avancement de trois galeries au charbon du puits grisouteux de Carlowitz.

On eut cinq fois des explosions dans des mélanges très faiblement détonants de grisou et de poussière; la présence du grisou était à peine signalée par la lampe à benzine, et il y avait peu de poussière de houille. Pour quatre de ces cinq cas, les coups travaillèrent bien; pour le cinquième, le coup débourra, ce qui paraît n'être pas rare avec la carbonite, la sécurite et la roburite. Quatre des charges étaient de quatre à quatre cartouches et demie de 100 grammes; pour le coup débourrant et pour un autre des cinq coups, la charge était seulement de deux à deux et demie cartouches. Tandis que les quatre coups qui ont travaillé n'ont donné que des explosions locales, le coup débourrant a allumé le massif de houille lui-même.

On fit alors de nouvelles expériences dans la galerie de recherches, et avec 400 grammes de carbonite, on enflamma deux fois sur cinq la poussière de houille.

Il faut ajouter que la faible puissance de l'explosif, qui d'ailleurs lui donnait, dans le travail au charbon, une supériorité sur les explosifs brisants, ne permettait pas d'employer dans la mine de faibles charges.

La *kinétite*, de composition complexe, contenant du chlorate de potasse, n'a pas allumé le gaz. La présence du chlorate de potasse rend cette substance trop dangereuse pour que l'emploi puisse en être recommandé.

Quant à la *sécurite*, formée de dinitrobenzol et d'azotate d'ammoniaque en diverses proportions, avec une résine nitrée et des traces de naphtaline et d'azotate de soude, deux mélanges différents avaient donné d'assez bons résultats en avril et mai 1887, mais en août de la même année une cartouche de 100 grammes suspendue

dans un mélange gazeux à 10 p. 100 de grisou a produit l'explosion deux fois sur trois.

La *roburite* est composée d'un carbure d'hydrogène nitré (avec du chlore) et d'azotate d'ammoniaque en diverses proportions :

1° La roburite d'ancienne composition, tenant de l'acide picrique, a allumé le gaz lorsque la cartouche était portée à 40 degrés;

2° La torpedo-roburite a allumé le mélange contenant 5 p. 100 de grisou;

3° La berg-roburite I, composée de dinitrochlorobenzol et d'azotate d'ammoniaque, sans acide picrique, a allumé une fois;

4° La berg-roburite II, semblable à la précédente, mais tenant en outre du phénol, n'a pas donné d'inflammation, même lorsque la cartouche était portée à 40°.

La *lithotrite* de Demeuse (Aix-la-Chapelle) a donné une inflammation.

La poudre *Schulze* de Voltz, Lichtenberg et Ce, à Ludwigshafen, ne s'est pas montrée sûre à l'état pulvérulent. La poudre comprimée faiblement a allumé avec 8 p. 100 de grisou. La poudre comprimée fortement n'a jamais allumé.

Les capsules de Bornhardt à 1 gramme n'ont pas allumé, même avec 8 p. 100 de grisou.

M. Hugo Lohmann, après avoir donné, dans la *Zeit. für Berg, Hütten und Salinen wesen*, le résumé des expériences de la Commission sur les divers explosifs, termine par ces paroles :

« Après les expériences que nous venons de rapporter, l'auteur est d'avis que l'emploi des explosifs brisants actuellement connus en présence du grisou et particulièrement aussi dans des travaux contenant de la poussière de houille sèche, est beaucoup plus dangereux qu'on n'était porté jusque-là à le supposer, et que l'interdiction

d'employer la poudre noire ordinaire et les substances explosives analogues, n'aurait sur le nombre des explosions de grisou ou de poussière qu'une influence insignifiante (*). »

La Commission prussienne s'est peu occupée des moyens les plus propres à communiquer le feu à l'explosif.

Quelques expériences ont été faites en mai-août 1887 avec la mèche de sûreté. On remplissait la galerie de recherche de mélanges d'air, de poussière de houille et de grisou, dans lesquels le grisou variait depuis 4 p. 100 jusqu'à 6,66 p. 100. Dans un trou de mine, on plongeait l'une des extrémités d'une mèche, dont la partie extérieure était tailladée et dont on allumait l'extrémité libre dans l'intérieur de la galerie. Rien ne se produisait lorsque le mélange ne tenait que 4 p. 100 de grisou; lorsque le grisou dépassait cette proportion, il se produisait pendant quelques secondes une flamme vacillante, très faible, bleuâtre ou jaunâtre, dans la partie supérieure de la galerie au voisinage de la mèche. A 6,66 p. 100, on a obtenu plusieurs fois une faible explosion. Avec 10 p. 100 de grisou, on a obtenu aussitôt une explosion (**).

La Commission prussienne a cherché, comme la Commission anglaise, à savoir si l'on pouvait obtenir la sécurité en employant les explosifs suivant des méthodes

(*) *Zeit. für B. H. und Salinenwesen.* — XXXV, B. 44. § 356. L'Oberbergamt de Bonn s'est sans doute inspiré d'idées analogues en rédigeant l'ordonnance de réglementation des mines du 1er août 1887, dans laquelle le tirage des coups de mines est interdit (sans distinction d'explosifs) dans tous les points de la mine où la lampe constate du grisou. Ce n'est que dans les points où se trouve de la poussière de houille reconnue inflammable, qu'une distinction est faite et que la poudre noire est spécialement interdite.

(**) L'allumage des mélanges grisouteux explosifs par la mèche, dans les conditions où se plaçait la Commission prussienne, n'était pas douteux. Si nous citons ces expériences, c'est qu'elles confirment la limite inférieure d'inflammabilité des mélanges

particulières. Elle a simplement expérimenté les cartouches à eau déjà proposées par sir F. Abel. Des cartouches de 200 grammes de dynamite étaient placées au milieu de sacs en papier Settle, remplis d'eau et posés librement au milieu de la galerie. Dans ces conditions, on n'a pu obtenir l'inflammation du gaz, même avec les plus fortes teneurs en grisou, et en faisant détoner à la fois trois cartouches semblables. Dans une expérience, on fit même détoner à la fois, sans produire l'inflammation du gaz, 10 cartouches de 100 grammes de dynamite, enfermées chacune dans leur sac à eau, au milieu d'un mélange tenant 10 p. 100 de grisou.

On ne parvint à obtenir l'inflammation du mélange grisouteux qu'avec 1 kilogramme de dynamite, réparti dans sept sacs à eau placés à la sole de la galerie et recouverts de poussière de houille.

Les sacs en papier avaient 50 centimètres de longueur, un diamètre de 30 millimètres pour les cartouches ordinaires, de 40 millimètres pour les cartouches plus fortes. Pour mieux assurer l'enveloppement de la cartouche par l'eau, on glissait au fond du sac un bouchon en bois, et par-dessus l'eau on plaçait, avant de lier l'ouverture du sac, une bourre d'argile.

Le rapporteur, M. Hugo Lohmann, conclut en disant que l'emploi des cartouches à eau avec les explosifs brisants donne un haut degré de sécurité, s'il n'est pas absolument sûr dans toutes les circonstances. Il ajoute cependant que l'emploi de ces cartouches entraîne à une manœuvre longue, et n'est économique que dans la

d'air et de grisou, qui avait été jadis fixée par MM. Mallard et Le Chatelier entre 5,6 et 6 p. 100 de grisou. Comme l'avaient soutenu les mêmes observateurs contre l'opinion de Sir F. Abel, la présence de la poussière de houille n'abaisse pas ou n'abaisse que peu cette limite.

houille, à cause de l'élargissement considérable du trou de mine qu'il nécessite.

Il mentionne d'ailleurs, d'après des communications particulières, que des explosions se seraient produites, malgré l'emploi de cartouches à eau, dans les districts de Derby et de Newcastle, en Angleterre. Il cite aussi une explosion de grisou, mentionnée par M. Joseph Böhm (N° 13 de l'*Oester. Zeitung für. B.-u. H.-W.* de 1887), qui se serait produite dans le forage d'un puits, avec un trou de $1^m,30$ de profondeur, chargé avec de la dynamite bourrée à l'eau et allumée à l'électricité.

Enfin, la Commission a essayé de remplacer l'eau par le carbonate de soude cristallisé. Avec une charge de 100 grammes de dynamite, on n'a pas eu d'explosion; mais avec 3 cartouches semblables partant simultanément, on a eu deux explosions.

M. Hugo Lohmann attribue l'influence favorable de l'eau et du carbonate de soude au refroidissement produit par une volatilisation partielle de l'eau sous l'influence de la température de la détonation. Nous verrons plus loin que cette opinion est très contestable, et que, conformément aux vues de sir F. Abel, la volatilisation de l'eau du carbonate de soude est, dans ces conditions, très peu vraisemblable. Il est à croire que le même effet eût été obtenu si l'on avait remplacé le carbonate par une matière inerte, telle que du sable très finement pulvérisé.

En terminant, M. Hugo Lohmann mentionne les recherches poursuivies par M. Muller, directeur de la Société des explosifs de la Westphalie rhénane, à Cologne, qui a eu l'idée de mêler le carbonate de soude à l'explosif lui-même. Des expériences faites le 31 août 1887, dans la galerie de recherches de la Commission, avec un mélange de 10 parties de dynamite à 77 p. 100 de nitroglycérine, et de 7 parties de carbonate de soude,

ont donné des résultats favorables. Quelques essais auraient montré que le nouvel explosif, auquel on a donné le nom de *Wetter-Dynamit*, donnait, à cause de l'affaiblissement de ses effets brisants, des résultats économiques satisfaisants dans l'abatage de la houille.

Commission Saxonne. — La Commission saxonne du grisou (*) a fait quelques expériences sur le danger des explosifs en présence du grisou. Ces expériences, d'ailleurs peu nombreuses, n'ont rien appris de nouveau.

Commission autrichienne. — Les travaux de la Commission autrichienne du grisou ne sont pas encore connus. Cependant, M. l'ingénieur en chef Johann Mayer donne quelques indications sur ce sujet dans un très intéressant rapport sur un concours ouvert à l'occasion d'un prix de 1,000 ducats généreusement offert par les exploitants d'Ostrau-Karwin, à l'auteur de « la découverte d'un procédé pour remplacer le tirage des coups de mine dans les mines à grisou, ou pour le rendre sans danger. »

D'après M. Mayer, le comité local du bassin d'Ostrau-Karwin a constaté que la hellhoffite et la dynamite-gomme bourrées au fond d'un trou de mine n'allument pas un mélange tenant jusqu'à 10 p. 100 de grisou et qu'il suffisait même de recouvrir ces explosifs avec 5 ou 6 centimètres de sable pour empêcher l'allumage du grisou.

Avec la poudre noire l'inflammation du gaz se produit, même lorsque le trou est bourré et qu'il travaille sans débourrer, et à plus forte raison avec la même couver-

(*) *Uebersicht über die Thätigkeit der Commission zur Revision der bergpolizeilichen Vorschriften in Sachsen. — Jahrbuch für das Berg und Hüttenwesen im Königreiche Sachsen* (1886).

ture de sable qui rend inoffensifs les explosifs brisants.

D'un autre côté, des cartouches, détonant sans aucune enveloppe de dynamite-gomme et de hellhoffite (*), ont allumé, à chaque coup, le mélange gazeux explosible.

Ces résultats montrent, dit M. Meyer, que « lorsqu'un explosif détone sans enveloppe, la possibilité de l'inflammation du grisou ou de la poussière de houille ne peut jamais être évitée. »

Il est à remarquer que, d'après les conclusions de la Commission prussienne et celles de M. Mayer, on serait ramené, après de nombreuses expériences assez contradictoires, au résultat qui avait été prévu *a priori* par la Commission des substances explosives, dans son rapport du 2 décembre 1880.

Cependant, M. Mayer conteste la conclusion fort pessimiste de M. Lohmann, que nous avons citée plus haut. Il fait remarquer que des coups de mine chargés avec des explosifs brisants ne débourrent que rarement, et que lorsqu'ils ne débourrent pas, ils n'enflamment ni les mélanges grisouteux ni les poussières, tandis que des coups chargés avec la poudre noire peuvent allumer les uns et les autres, même sans débourrer. Cela suffit pour montrer le grand avantage qu'on obtient en substituant les explosifs brisants à la poudre noire.

M. Mayer signale le danger grave que fait courir l'emploi de la mèche pour l'allumage des coups de mine. Le tirage dans les points où l'on peut constater le grisou

(*) M. Margraf, dans un article publié par le *Journal des Mines Prussien* (B. XXXIV, 1886) avait annoncé qu'il n'avait pu allumer les mélanges grisouteux avec la hellhoffite. Des recherches ultérieures, non publiées encore, auraient, d'après M. Meyer, amené M. Margraf à constater que des cartouches, non enveloppées de hellhoffite, allument les mélanges grisouteux. M. Scharizer, à Rossitz, aurait même, avec cet explosif, allumé des poussières de houille.

est, il est vrai, interdit; mais la sécurité de la mine repose alors sur le respect, impossible à contrôler, d'une prescription souvent violée en fait. M. Mayer va jusqu'à attribuer à l'emploi de la mèche les deux tiers des accidents causés par le grisou.

Il fait d'ailleurs remarquer que l'emploi de l'électricité peut devenir dangereux avec les étincelles de l'électricité de tension; il le regarde, avec exagération sans doute, comme impossible dans les mines.

On ne s'étonnera plus, après cela, que le jury du concours ait décerné une forte partie du prix proposé, à M. le lieutenant-colonel du génie Lauer, inventeur d'une amorce de friction, placée dans la cartouche, au fond du trou de mine et mise en jeu au moyen d'un fil métallique qui passe à travers un tube engagé dans le bourrage.

D'après M. Mayer, l'allumage, par le procédé de M. Lauer, est actuellement employé d'une manière exclusive dans plusieurs exploitations du bassin d'Ostrau; il peut être employé dans tous les cas, même avec le bourrage à l'eau, et le prix de revient en est très peu plus élevé que celui de la mèche.

Nous ne trouvons plus à mentionner, dans l'intéressant travail de M. Meyer, que quelques renseignements sur la *Wetterdynamite* qui a été expérimentée, au point de vue économique, dans quelques exploitations. On a constaté que cet explosif détonait difficilement et ne donnait pas, au point de vue de l'effet utile, des résultats absolument satisfaisants.

Tels sont à peu près tous les faits actuellement connus qui intéressent la question soumise à l'examen de la Commission. Beaucoup d'entre eux, ne nous été connus qu'au cours de nos recherches, et même après leur achèvement.

Rôle des poussières de houille. — La Commission prus-

sienne s'est beaucoup préoccupée du rôle que peuvent jouer les poussières, soit seules, soit mélangées avec le grisou. Deux des membres de la Sous-Commission (*) ont déjà étudié les expériences prussiennes à ce point de vue et montré qu'elles semblent plutôt confirmer l'opinion qu'ils avaient déjà soutenue et appuyée de recherches personnelles, à savoir que les poussières de houille ne jouent jamais, dans les explosions dont les mines sont le théâtre, qu'un rôle subordonné. Sir F. Abel vient, dans une récente communication à la Société des Ingénieurs civils de Londres, de donner à cette opinion l'appui de sa haute autorité (**).

L'inflammabilité des mélanges d'air et de poussière de houille est d'ailleurs extrêmement inférieure à celle des mélanges d'air et de grisou, et tout le monde est d'accord pour admettre que de semblables mélanges ne peuvent être allumés que sous l'influence d'un foyer de chaleur intense. Il est donc bien évident qu'un explosif présentant un degré de sécurité reconnu suffisant dans les mélanges les plus détonants d'air et de grisou, sera *a fortiori* pleinement sûr en présence de mélanges d'air et de poussière.

Nous avons donc considéré comme une complication

(*) Mallard et Le Chatelier. — Sur les travaux de la Commission prussienne du grisou. — *Ann. des Mines*, 8e série, t. IX, p. 338 (1886).

(**) *The Institution of civil Engineers. Minutes of Proceedings.* — 24 mai 1887. — P. 174 et suiv. du tirage à part. — Voici les paroles de sir F. Abel auxquelles nous faisons allusion : « M. Bedlington a, dans l'opinion de l'auteur (sir F. Abel), exprimé l'avis rationnel en ce qui regarde la question des poussières, quand il a avancé que, bien qu'il ne fût pas convaincu que la poussière seule pût suffire à produire des explosions importantes, qui devraient être alors bien plus nombreuses qu'elles ne sont, il admettait que dans les points où la poussière existait en grande quantité, les explosions en étaient grandement aggravées. »

peu utile des expériences de mettre en suspension de la poussière de houille dans nos mélanges gazeux.

Nous avons cependant fait quelques expériences avec des poussières et nous les citerons ici pour n'avoir plus à y revenir.

Nous avons constaté que la dynamite détonant à l'air libre, au milieu de poussières de houilles très fines et très inflammables (*), n'enflamme pas ces poussières.

La dynamite, brûlant sans détoner, peut, au contraire, allumer la poussière, comme nous l'avons observé en plaçant un pétard de 50 grammes de dynamite dans un trou cylindrique percé au milieu d'un bloc en bois, recouvert de poussière de houille et en allumant la dynamite avec une mèche Bickford sans amorce fulminante.

Un pétard de 50 grammes de dynamite, placé dans un tube en étain de 25 millimètres de diamètre intérieur et de 40 millimètres de diamètre extérieur, bourré, sur 12 centimètres de hauteur, par de la poussière de houille très fine, n'a pas allumé le grisou.

Commission instituée par M. le Ministre des Travaux publics. — A la suite de la publication de la première série des expériences de la Commission prussienne, qui semblait attribuer une sécurité presque complète à l'emploi de certains explosifs, M. le Ministre des Travaux publics institua, le 12 février 1887, une Commission (**)

(*) Nous avons employé les poussières de houille de Blanzy que deux des membres de la Sous-Commission, MM. Mallard et Le Chatelier, avaient employées dans les expériences faites pour la Commission française du grisou. *Ann. des mines*, 8e série, p. 5 (1882).

(**) La Commission est composée de :

MM. Haton de la Goupillière, inspecteur général des mines, *président;*
Sarrau, ingénieur en chef des poudres et salpêtres;

chargée de l'étude des questions se rattachant à l'usage des explosifs dans les mines à grisou.

Dès ses premières séances, cette Commission jugea nécessaire de reprendre les expériences de la Commission prussienne. Après une entente entre MM. les Ministres de la guerre et des travaux publics, il fut décidé que la Commission des substances explosives, instituée près du ministère de la guerre, serait chargée de cette étude expérimentale. MM. Mallard, Aguillon et Le Chatelier lui furent, à cet effet, adjoints temporairement.

La Commission des substances explosives, dans sa séance du 31 mars 1887, désigna une Sous-Commission, dont nous avons fait connaître la composition, pour procéder aux recherches nécessaires.

Dès le 4 avril, cette Sous-Commission arrêta le programme des expériences qui furent continuées sans interruption, et dont on va faire connaître les résultats.

CHAPITRE I.

DESCRIPTION DES APPAREILS ET DES PROCÉDÉS D'EXPÉRIMENTATION.

Les recherches de la Commission prussienne avaient été faites en se rapprochant le plus possible des conditions de la pratique. Il y aurait eu peu d'intérêt à les répéter en suivant les mêmes errements.

Nous primes le parti d'observer dans des conditions

MM. Mallard, inspecteur général des mines;
Lorieux, inspecteur général des mines;
Aguillon, ingénieur en chef des mines;
Le Chatelier, ingénieur des mines, *secrétaire*.

aussi parfaitement définies que possible et de conduire nos recherches comme une étude scientifique.

Nous espérions ainsi nous rendre compte des anomalies qu'avaient signalées les expériences prussiennes, et même pouvoir formuler quelques lois dont les conséquences seraient immédiatement applicables à la pratique.

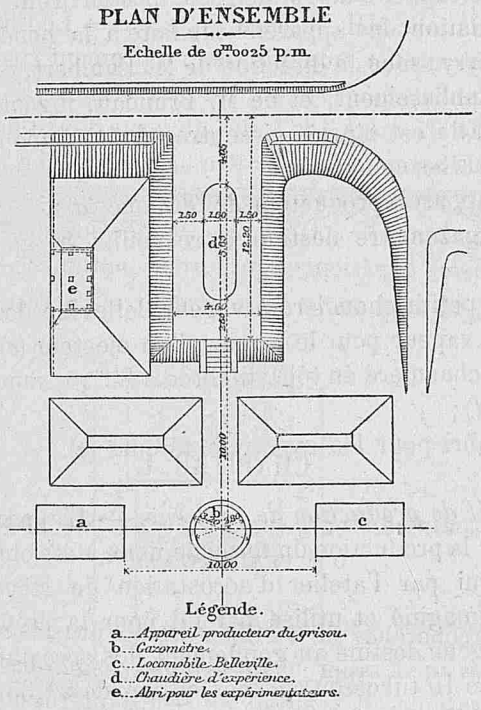


Fig. 1. — Plan général de l'installation.

N'ayant pas à notre disposition de source de grisou naturel, nous devions avoir recours au formène fabriqué artificiellement, et nous avons employé le procédé le plus commode, c'est-à-dire l'action de la chaleur sur un mélange d'acétate de soude et de chaux sodée.

Nous voulions faire détoner les explosifs dans une enceinte bien close, afin de pouvoir faire un dosage exact du grisou mélangé à l'air, de pouvoir étudier complètement les conditions de la détonation des explosifs, enfin d'être toujours bien certains de l'inflammation ou de la non inflammation du mélange grisouteux. Nous avons, pour remplir ces conditions, choisi une chaudière à vapeur d'une capacité de 10 mètres cubes environ.

L'installation des appareils fut faite à la poudrerie de Sevran-Livry, sous la direction de M. Lambert, directeur de cet établissement, et de M. Bruneau, ingénieur des poudres. Elle est figurée ci-contre (*fig.* 1) d'une manière générale. Elles comprend :

1° Un appareil producteur de formène (*a*) ;

2° Un gazomètre destiné à recueillir le gaz fabriqué (*b*) ;

3° Une petite chaudière à vapeur Belleville destinée à fournir la vapeur pour le service d'un éjecteur (*c*) ;

4° Une chaudière en tôle, timbrée à $8^{atm},5$, munie d'un éjecteur (*d*) ;

5° Un abri pour les expérimentateurs (*e*).

Appareil de production de formène. — L'appareil employé pour la production du formène nous a été obligeamment fourni par l'atelier d'aérostation de Meudon; il avait été imaginé et utilisé par lui pour la préparation de l'hydrogène destiné au gonflement des aérostats. Il se compose de 10 tubes ou cornues en fer, de $2^{m},35$ de longueur (*fig.* 2), munis d'obturateurs en fonte à l'une de leurs extrémités, et à l'autre d'un prolongement fileté d'un diamètre plus faible que le corps même du tube cylindrique. Ces cornues, disposées sur deux rangées horizontales au-dessus d'une grille, sont maintenues à l'aide de trois plaques percées de trous, encastrées dans les murs latéraux du fourneau.

A l'extrémité du fourneau se trouve un barboteur jusqu'au fond duquel pénètrent des tubes recourbés reliés

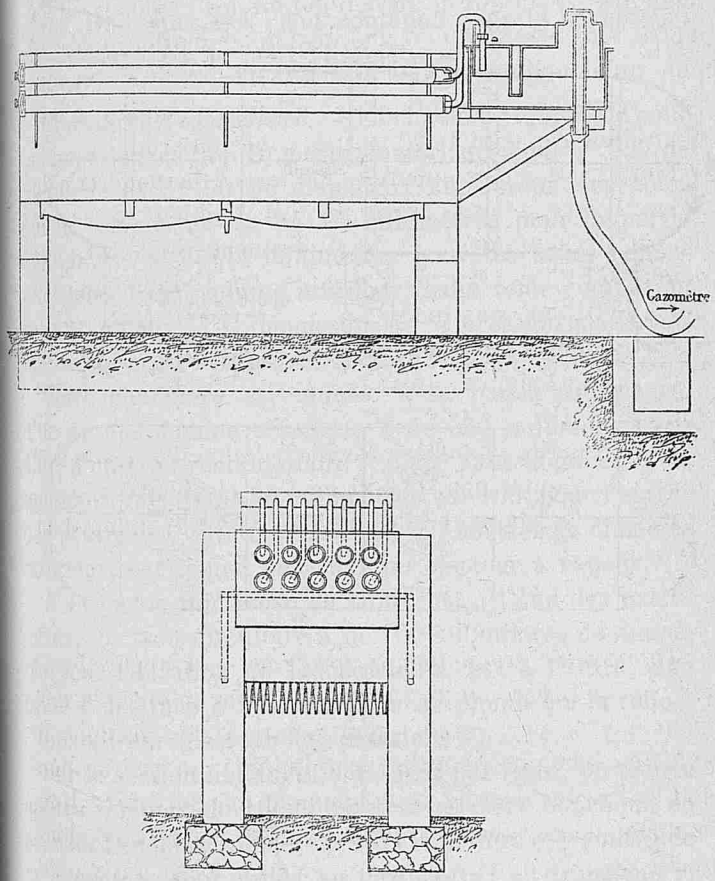


Fig. 2. — Élévation et coupe de l'appareil qui sert à préparer le formène.

aux cornues à l'aide de raccords filetés; enfin, un tuyau de 60 millimètres de diamètre traverse le barboteur en aboutissant au dôme et le relie au petit gazomètre.

Le chargement de cet appareil est obtenu en introduisant dans les cornues des gouttières ou coupelles

dans lesquelles on a préalablement placé le mélange d'acétate de soude et de chaux sodée. La charge de

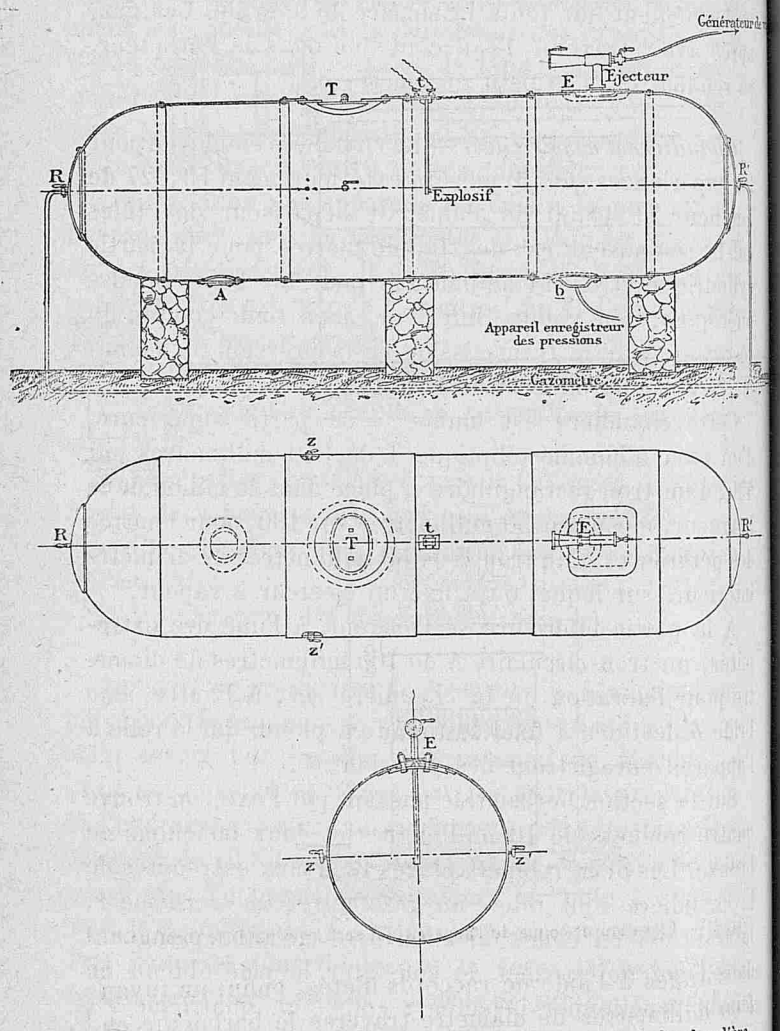


Fig. 3. — Coupe longitudinale, plan et coupe transversale de la chaudière.

chacune d'elles est d'environ 2 kilogrammes de mélange pulvérisé.

Les cornues étant chargées, on allume un feu de fagots, que l'on mène lentement en répartissant le bois uniformément sur toute la surface de la grille. Les gaz, après avoir traversé l'eau contenue dans le barboteur, se rendent dans le petit gazomètre *b*.

Chaudière d'expérience. — La chaudière employée pour les expériences (*fig.* 3) mesure extérieurement $5^{m},627$ de longueur et $1^{m},50$ de diamètre; l'épaisseur des tôles qui la composent est de 16 millimètres pour la partie cylindrique et de 14 millimètres pour les bouts hémisphériques; son volume intérieur, sans tenir compte du réservoir pour la transmission de la pression au manomètre enregistreur, est de $10^{m3},171$.

Cette chaudière est munie, à sa partie supérieure, d'un trou d'homme elliptique T de 350 millimètres sur 450; d'un trou rectangulaire *t*, placé dans le milieu de la longueur, mesurant 50 millimètres sur 100, pour l'entrée des pétards et d'un trou E de 50 millimètres de diamètre intérieur, sur lequel on a fixé un éjecteur à vapeur.

A la partie inférieure se trouvent, à l'une des extrémités, un trou circulaire A de 100 millimètres de diamètre pour l'aération de la chaudière, et, à l'autre, une bride *b* destinée à fixer le tuyau en plomb qui la relie à l'appareil enregistreur des pressions (*).

Sur la section horizontale passant par l'axe, on trouve quatre robinets de 10 millimètres et deux bouchons en bronze. Les deux robinets placés R, R′ aux extrémités de la chaudière sont reliés au gazomètre; un troisième *r*, latéral, est en communication avec un tube plongeant dans l'eau qui permet de constater le vide obtenu en faisant fonctionner l'éjecteur; enfin, un quatrième *r′*,

(*) Cet appareil enregistreur, reconnu inutile, a été abandonné après les premières expériences.

aussi latéral, est relié à un manomètre à eau formé par un tube en U.

L'un des bouchons en bronze est muni de deux

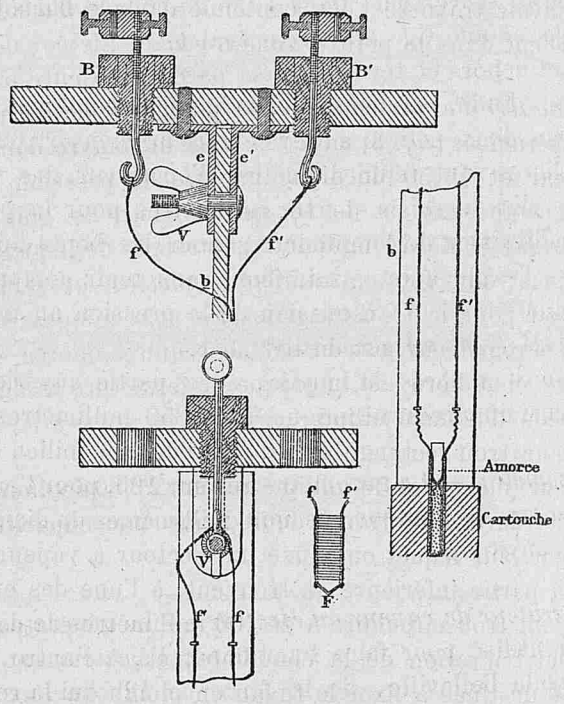


Fig. 4. — Détail de la fixation de la cartouche au couvercle qui ferme le trou de la chaudière.

fils de cuivre isolés, ce qui permet, soit de faire passer une étincelle dans le mélange gazeux, soit de porter au rouge un fil de fer fin.

Les cartouches des divers explosifs à essayer sont introduites par le trou rectangulaire situé à la partie supérieure de la chaudière. On peut aussi les introduire par le trou d'homme, lorsque leur diamètre est trop considérable ; on s'est rarement servi de ce procédé, qui allonge l'opération.

Pour faire détoner les explosifs, on fait ordinairement usage de l'électricité. A cet effet, la plaque de fermeture est munie de deux bouchons en gaïac B et B′ (*fig.* 4) filetés qui la traversent. Dans l'axe de chacun d'eux, on a fait passer une tige en cuivre également filetée, débordant au dehors et terminée à sa partie inférieure par un crochet. Enfin, au centre de la plaque de fermeture se trouvent deux petites équerres *e*, *e′* en cuivre dont les ailes libres sont réunies par une vis de pression V, ce qui permet de saisir et fixer une baguette en bois *b* de 750 millimètres de longueur à l'extrémité de laquelle on attache l'explosif en essai. Ces baguettes, en sapin de 30 millimètres sur 5 d'équarrissage, sont munies de fils de cuivre *f*, *f′* qui permettent de réunir l'amorce électrique aux crochets de la plaque de fermeture et de former ainsi un circuit fermé.

Gazomètre. — Le gazomètre mesure $2^{m},80$ de diamètre et 1 mètre de hauteur, ce qui donne une capacité de $6^{m^3},15$ environ.

Générateur de vapeur ou éjecteur. — Le générateur de vapeur utilisé pour faire fonctionner l'éjecteur est une locomobile Belleville, de la force de 12 chevaux ; un robinet placé sur le détendeur de vapeur permet de faire traverser l'éjecteur par un courant de vapeur sous une pression de 10 à 12 atmosphères ; ce dernier appareil permet de produire un vide de 150 centimètres cubes d'eau en une à deux minutes.

Exécution d'une expérience.

Avant d'exécuter une expérience, la chaudière est aérée. La bride qui ferme le trou de 100 millimètres de diamètre, placé à la partie inférieure, est enlevée ; on

envoie un courant de vapeur dans l'éjecteur et on laisse fonctionner cet appareil pendant 7 à 8 minutes ; toutes les autres issues de la chaudière étant fermées, il se produit un courant d'air traversant la chaudière dans sa longueur et de haut en bas. Cette opération terminée, on ferme toutes les ouvertures et on introduit l'explosif à essayer.

La cartouche fixée sur la baguette en sapin est munie d'une amorce allumable à l'aide d'un courant électrique; les fils de cuivre de la baguette sont reliés à la fois à ceux de l'amorce et aux crochets des petites pièces en cuivre qui traversent les bouchons en gaïac de la plaque de fermeture ; il suffit donc, pour obtenir la détonation de l'explosif, de fixer les fils de la pile aux extrémités des tiges en cuivre qui émergent au-dessus de la plaque et de fermer le circuit.

Ce dispositif permet d'attacher à l'avance sur des baguettes les explosifs à essayer: il ne reste plus alors qu'à fixer la baguette entre les deux petites équerres, à l'aide de la vis de pression, et enrouler les fils sur les crochets. Cette opération, très facile, peut être réalisée rapidement. La plaque de fermeture étant en place, la cartouche se trouve sur l'axe de la chaudière et dans le plan médian.

Les joints terminés, on fait fonctionner l'éjecteur et on suit l'ascension de la colonne d'eau dans le tube en verre relié à la chaudière à l'aide d'un tuyau en caoutchouc.

Le vide étant reconnu suffisant, on ferme le couvercle de l'éjecteur, préalablement enduit de blanc de céruse, de manière à obtenir un joint hermétique et on s'assure, par l'invariabilité de la colonne d'eau, que la chaudière ne présente pas de fuite.

Cette constatation faite, la chaudière est mise en communication avec le petit gazomètre et on ouvre, en même

temps, les robinets placés aux deux extrémités de la chaudière pour laisser pénétrer le grisou ; on suit la marche descendante de la colonne d'eau, de manière à obtenir la proportion voulue d'air et de formène.

Le grisou pénétrant dans l'air raréfié avec une vitesse de plusieurs mètres à la seconde, il se produit un premier brassage, augmenté par la rentrée d'air que l'on fait ensuite par les mêmes points, après avoir fermé la communication avec le gazomètre. Cette rentrée d'air est obtenue en enlevant les robinets placés aux extrémités de la chaudière.

La pression barométrique étant rétablie dans l'intérieur de l'appareil, on ferme tous les robinets et on remplace la bride qui fixe l'éjecteur par une bride pleine.

On peut alors exécuter un essai ; c'est à ce moment que l'on peut constater la composition du mélange gazeux, en prélevant des prises de gaz.

On attache les fils conducteurs aux petites tiges de la plaque d'introduction des pétards et on ferme le circuit. Lorsque l'explosif employé produit l'inflammation du mélange gazeux, on en est averti par l'élévation de température des parois de la chaudière, ainsi que par la pression considérable que produit immédiatement l'inflammation du mélange d'air et de formène, et qui est suivie d'une dépression lorsque la vapeur d'eau est condensée.

On avait pensé à enregistrer les pressions au moyen d'un manomètre enregistreur, analogue à celui qui avait servi dans les expériences de MM. Mallard et Le Chatelier sur les mélanges gazeux explosifs ; mais les indications du manomètre étant inutiles et allongeant les expériences, on y a renoncé.

Nature du gaz employé.

Nous avons analysé le gaz combustible produit par nos cornues et emmagasiné dans le gazomètre. Une analyse a donné :

Air	10,8
Gaz absorbables par le brome	7,9
Acide carbonique	0,0
Formène (par diff.)	81,3

L'hydrogène n'a pas été recherché.

Une autre analyse a donné une composition fort peu différente.

La présence de l'air s'explique par ce fait que, pour raison d'économie, on ne rejetait pas le gaz produit pendant la première période de l'application de la chaleur, et qui entraîne avec lui l'air dont les cornues sont remplies au commencement de l'opération.

Défalcation faite de cette quantité d'air, dont il suffit de tenir compte dans le dosage du mélange introduit dans la chaudière, notre gaz n'est pas très éloigné d'être du formène pur, et doit avoir des propriétés fort peu différentes.

La combustibilité doit être, il est vrai, un peu augmentée par la présence des hydrocarbures plus carburés absorbables par le brome, mais nous ne croyons pas que cette augmentation puisse être considérée comme très considérable. Nous nous sommes, en effet, assurés que la vitesse de propagation de l'inflammation dans un tube était sensiblement la même pour notre gaz que celle qui avait été jadis déterminée pour le grisou par MM. Mallard et Le Chatelier.

D'ailleurs, il paraît possible que le grisou des mines contienne une quantité notable de carbures d'hydrogène absorbables par le brome, et il semblait plutôt avantageux, au point de vue de la sécurité des conclusions, que le gaz avec lequel on opérait fût un peu plus combustible que celui qu'on peut rencontrer dans la pratique.

Nous avons presque constamment opéré avec un mélange formé en introduisant dans la chaudière un volume de gaz développant une pression de $1^m,18$ d'eau. Le gaz contenant environ 10 p. 100 d'air, le mélange ainsi constitué renfermait environ 10,3 de formène. C'est à peu près le mélange le plus explosif.

Nous avons constaté que le mélange formé par l'introduction d'un volume de gaz correspondant à une pression de $0^m,70$ d'eau, soit une proportion de 6,1 p. 100 de formène, développait en brûlant une faible pression et était voisin de la limite inférieure d'inflammabilité.

Nous n'avons pas constaté, au point de vue de la facilité à être enflammés par les explosifs, de différences marquées entre les mélanges tenant de 12,5 p. 100 à 6,1 p. 100 de gaz. Ceci est d'accord avec ce fait constaté par MM. Mallard et Le Chatelier pour l'hydrogène et l'oxyde de carbone, que les températures d'inflammation des mélanges que ces gaz forment avec l'oxygène ne varient pas notablement avec l'introduction de gaz étrangers, particulièrement d'azote et d'oxygène en excès.

CHAPITRE II.

EXPLOSIFS LIBREMENT SUSPENDUS AU MILIEU DE MÉLANGES GRISOUTEUX.

Nous rendrons compte dans ce chapitre des essais faits avec des explosifs librement suspendus, sans enveloppe, au milieu de mélanges grisouteux.

Le chapitre troisième sera consacré aux expériences faites, en plaçant l'explosif en vase clos.

Le chapitre quatrième contiendra nos expériences sur les amorces.

Un cinquième et dernier chapitre sera consacré aux conclusions.

Des pièces annexes contiennent le tableau résumé de nos expériences, et deux notes, purement théoriques, rédigées par MM. Mallard et Le Chatelier.

I. — Amorces.

Nous reviendrons sur la question des amorces dans un chapitre spécial. Il nous suffira ici de dire que les amorces *renforcées* à $1^{gr},5$ et 2 grammes de fulminate de mercure n'allument pas les mélanges grisouteux, tandis que les amorces renforcées à 5 grammes les allument.

Nous nous sommes presque constamment servis d'amorces renforcées à $1^{gr},5$ seules ou associées en nombre plus ou moins grand. La détonation était provoquée par un fil que portait au rouge un courant électrique.

II. — Explosifs déjà connus.

Nous avons expérimenté successivement les explosifs suivants, déjà connus et employés :

1° La poudre ordinaire de mine;

2° Le coton-poudre de guerre, d'une teneur en azote correspondant à la production de 205 centimètres cubes de bioxyde d'azote, pour 1 gramme de matière, dans l'analyse par le procédé Schlœsing; comprimé fortement en cubes de 28 grammes;

3° Le coton-poudre de mine, d'une teneur en azote correspondant à 193 centimètres cubes de bioxyde d'azote; comprimé fortement en cartouches cylindriques de 30 grammes;

4° Le coton-poudre, encore moins nitré, titrant 173 centimètres cubes de bioxyde d'azote, en cartouches comprimées de 50 grammes;

5° La dynamite n° 1 de Vonges, contenant 25 p. 100 de Randanite;

6° La dynamite n° 0 de Paulilles;

7° La dynamite à l'ammoniaque de Paulilles;

8° La dynamite-gomme de Paulilles;

9° La dynamite-gélatine de Paulilles;

Toutes ces dynamites en cartouches de 50 grammes;

10° L'explosif Favier;

11° La hellhoffite;

12° La poudre pyroxylée du Moulin-Blanc, analogue à la poudre Schulze, contenant du coton-poudre et de l'azotate de baryte; en cartouches fortement comprimées de 50 grammes;

13° Une poudre, de composition analogue, fabriquée à la poudrerie belge de Wetteren;

14° Un explosif, de composition encore analogue, formé d'un mélange de coton-poudre et d'azotate de baryte;

15° La bellite, proposée récemment par M. Lamm.

1° *Poudre de mine.* — La facilité avec laquelle la déflagration de la poudre ordinaire allume le grisou est tellement connue qu'il nous a semblé peu utile de faire porter nos recherches sur ce point.

Nous avons seulement constaté qu'une cartouche de 30 grammes de poudre suspendue au milieu d'une sorte de poche cylindrique en papier imperméable, remplie d'eau (cartouche *Settle*), a communiqué, en détonant, le feu au grisou. Les dispositifs nombreux, proposés à diverses reprises pour remédier au danger de la poudre

dans les mines grisouteuses, en bourrant avec de l'eau, paraissent ainsi condamnés d'une manière définitive.

2° *Dynamite n° 1 de Vonges et n° 0 de Paulilles.* — La dynamite de Vonges n° 1 et la dynamite n° 0 de Paulilles sont formées d'un mélange de 75 p. 100 de nitroglycérine et de 25 p. 100 de silice. Elles se sont comportées d'une façon identique. Ces explosifs ont franchement détoné à l'air libre, sous l'influence d'une amorce renforcée de $1^{gr},5$ de fulminante, en entraînant l'inflammation du mélange gazeux au milieu duquel la cartouche est suspendue. Toutes nos expériences, très nombreuses, ont donné le même résultat.

Nous avons, en outre, constaté qu'une cartouche de 50 grammes de dynamite, placée au milieu de la cartouche Settle remplie d'eau, a allumé le grisou une fois sur deux.

Dynamite à l'ammoniaque de Paulilles. — La dynamite à l'ammoniaque est un mélange, en proportions variées, de nitroglycérine, d'azotate d'ammoniaque et d'une matière carbonée destinée à utiliser, en brûlant, l'excès d'oxygène que produisent la détonation de la dynamite et celle de l'azotate.

La dynamite à l'ammoniaque de Paulilles a, en détonant, allumé les mélanges grisouteux, dès qu'ils tenaient plus de 6,1 p. 100 de formène, c'est-à-dire dès qu'ils devenaient nettement inflammables.

Cotons-poudres. — Le coton-poudre de guerre, titrant 205 centimètres cubes (*), enfermé dans de très minces étuis en laiton usités pour le service de la guerre, a allumé le grisou une fois sur trois expériences.

(*) Il correspond à peu près à la cellulose décanitrique $C^{24}H^{30}Az^{10}O^{10}$.

Le coton de mine, titrant 193 centimètres cubes (*), un peu moins fortement comprimé que le coton de guerre, et sans enveloppe, a allumé le mélange gazeux dix fois sur dix expériences, avec les plus fortes ($12^{gr},8$ p. 100) comme avec les plus faibles ($5^{gr},7$ p. 100) teneurs de formène.

Le coton titrant 173 centimètres cubes (**), assez fortement comprimé, et sans enveloppe, détonant sous l'influence de deux amorces de $1^{gr},5$, a enflammé dans la seule expérience qui ait été faite.

3° *Dynamite-gomme et dynamite-gélatine.* — La dynamite-gomme est une dissolution de coton-poudre dans la nitroglycérine, formant une sorte de gomme ou plutôt de gélatine. Le coton-poudre, en quantité relativement faible, doit être juste suffisant pour être complètement brûlé par l'oxygène en excès de la dynamite.

La dynamite-gélatine, de composition beaucoup plus variable, est formée de dynamite-gomme additionnée d'un mélange binaire tel qu'azotate de potasse ou de soude et charbon de bois ou sciure de bois.

Par un temps chaud, comme celui que nous avons eu en mai, ces explosifs ont franchement détoné. Pendant l'hiver, leur détonation a presque toujours été partielle, sinon nulle, sous l'influence d'amorces de $1^{gr},5$ et même, pour la dynamite-gélatine, de 3 grammes de fulminate.

Nous nous sommes assurés très simplement de cette détonation incomplète, en observant la compression produite dans la chaudière par la détonation de la car-

(*) Il correspond à peu près à la cellulose ennéanitrique $C^{24}H^{31}Az^{9}O^{38}$.

(**) Il est un peu moins nitré que la cellulose octonitrique $C^{24}H^{32}Az^{8}O^{36}$.

touche, lorsque la chaudière était remplie d'air, ou lorsque, la chaudière étant remplie d'un mélange grisouteux, celui-ci n'était pas allumé par l'explosif. Nous nous sommes ainsi assurés que lorsque le mélange grisouteux n'était pas allumé, la détonation de la gomme ou de la gélatine ne produisait pas une compression supérieure à quelques centimètres d'eau. La détonation de l'amorce ne produisant pas de compression sensible, la cartouche détonait donc, mais seulement d'une façon très partielle, et, dans ces conditions, n'allumait pas le gaz.

En augmentant la puissance de l'amorce, nous sommes arrivés, pour la gomme et pour la gélatine, à l'inflammation du gaz.

On peut dire que la gomme et la gélatine enflamment le grisou, au milieu duquel elles sont suspendues, toutes les fois qu'elles détonent d'une façon à peu près complète.

Ces faits nous ont conduits à étudier, d'une façon plus approfondie, le mode de détonation des explosifs à l'air libre. Nous rendrons compte plus loin de nos recherches sur ce sujet.

Hellhoffite. — Nous n'avons pas pu faire détoner la hellhoffite à l'air libre. Cet explosif est, on le sait, formé de dinitrobenzol mélangé avec une fois et demie ou deux fois et demie son poids d'acide azotique. Le mélange est fait au moment de l'emploi, ce qui nous paraît rendre bien difficile l'usage courant de cet explosif dans les mines.

Explosif Favier. — L'explosif dû à M. Favier, tel qu'il a été proposé par lui à la Commission des substances explosives, se compose essentiellement d'un mélange de 9 p. 100 de mononitronaphtaline et de 91 p. 100 d'azotate d'ammoniaque, c'est-à-dire tel que la naphtaline nitrée utilise exactement, pour brûler, l'oxygène en

excès de l'azotate. Les deux substances sont intimement mélangées et très fortement comprimées. Un trou cylindrique, percé au milieu de la cartouche, du poids de 55 grammes, contient 5 grammes d'une matière pulvérulente, qui sert de détonateur intermédiaire et contient principalement du coton-poudre et de la nitroglycérine.

L'explosif de M. Favier ne détone pas à l'air libre. Ce serait plutôt un avantage qu'un inconvénient, si l'on était assuré de sa détonation lorsqu'il est bourré dans un trou de mine, et si, dans ces conditions, on n'avait pas à craindre des ratés. Des expériences faites dans les mines pourront seules résoudre cette question. Bourré dans des tubes métalliques, suivant le procédé dont nous parlerons plus loin, cet explosif ne nous a donné que des détonations très incomplètes, même avec 5^{gr} de fulminate.

Il nous est arrivé une fois, sur deux expériences, d'allumer le mélange gazeux en faisant détoner, sous l'influence de trois amorces renforcées contenant chacune $1^{gr},50$ de fulminate, non l'explosif Favier lui-même, dans son état comprimé, mais la matière de cet explosif réduite à l'état de poudre grenue assez fine.

Il nous semble que de nouveaux essais doivent être faits sur cette substance qui, en raison des analogies qu'il présente avec l'explosif dont il va être question, ne peut être condamnée sans appel au point de vue de la sécurité.

Dans tous les cas, il serait nécessaire de modifier la nature du détonateur intermédiaire qui, à lui seul, paraît susceptible d'inflammer les mélanges grisouteux.

Bellite. — La bellite, proposée récemment par M. Lamm, serait, au dire de l'inventeur, composée de 80 parties d'azotate d'ammoniaque et de 20 parties de binitrobenzine.

Cet explosif détone complètement en vase clos, comme nous le verrons plus loin.

A l'air libre il détone incomplètement sous l'influence de 1gr,25 de fulminate. Sa détonation est encore incomplète, quoique plus importante, avec 3gr de fulminate.

Deux expériences ont été faites dans ces dernières conditions, par un jour chaud et humide, sans qu'il y ait eu inflammation du grisou.

La composition de la bellite, telle qu'elle est indiquée par M. Lamm, ne paraît pas être exacte. Des essais de pression faites dans la bombe, ont donné en effet, à la densité de chargement 0,3, une pression de 2.500kg environ, tandis que la pression théorique (d'après des calculs dont nous parlerons plus loin) devrait être, avec cette densité, de 3.300kg environ.

Le mélange de 20 parties de binitrobenzine et de 80 parties d'azotate d'ammoniaque a donné, dans les mêmes conditions, une pression de 3.800kg qui se rapproche davantage du chiffre théorique, mais qui s'éloigne considérablement de celui qui a été obtenu avec la bellite.

Une cartouche de 50gr faite avec ce mélange n'a d'ailleurs pas allumé le mélange gazeux au milieu duquel on l'a fait détoner (1 exp.).

Cotons-poudres à l'azotate de baryte. — Nous avons essayé une poudre fabriquée il y a quelques années à la poudrerie du Moulin-Blanc, et qui se trouvait dans les magasins de Sevran. D'après l'analyse de M. Bruneau, elle avait la composition :

Azotate de baryte	42,6
Coton-poudre	57,4

Une cartouche de cet explosif détonant au milieu du mélange gazeux l'a allumé.

Une poudre pyroxylée de la poudrerie de Wetteren (Belgique), qui est aussi un mélange de coton-poudre et d'azotate de baryte a de même allumé le gaz.

Poudre pyroxylée du Moulin-Blanc. — La poudre pyroxylée, fabriquée à la poudrerie du Moulin-Blanc, est un mélange composé de :

Cellulose azotique (titrant de 175cc à 185cc de bioxyde d'azote)	60
Azotate de baryte	30
Salpêtre	6
Gélose	3
Paraffine	1
	100

Cette substance, qui est vendue au public comme poudre de chasse grenée, a été employée par nous sous forme de cartouches prismatiques très fortement comprimées et paraffinées superficiellement. Elle détone assez bien à l'air libre, sous l'influence d'une amorce de 1gr,5.

Dans les quatorze essais que nous avons faits avec cette substance suspendue au milieu d'un mélange grisouteux, il ne nous est arrivé que deux fois de voir la détonation de l'explosif entraîner l'inflammation du gaz.

Ces deux expériences ont été faites par un jour très chaud et très lourd, c'est-à-dire très humide ; la chaudière, énergiquement chauffée par le soleil, était brûlante extérieurement, et nous avons constaté, dans l'intérieur, une température supérieure à 40°. C'est à ces conditions d'état atmosphérique que nous sommes tentés d'attribuer ces deux expériences en quelque sorte anormales. Nous reviendrons sur ce point.

III. — Recherche d'explosifs nouveaux n'allumant pas le grisou.

L'exemple de la poudre pyroxylée montrait qu'il n'était pas impossible de trouver un explosif qui, en détonant sans enveloppe, n'allume pas les mélanges grisouteux.

On pouvait donc chercher à fabriquer de semblables explosifs et à connaître les conditions générales auxquelles ils doivent satisfaire.

Dynamite et carbonate de soude cristallisé. — Comme on l'a vu dans l'historique, une société prussienne pour la fabrication des explosifs a songé à mêler à la dynamite le carbonate de soude cristallisé et pulvérulent.

Nous avons constaté qu'un mélange intime de dynamite n° 1 de Vonges avec du carbonate de soude cristallisé, pulvérisé très finement, n'allume pas le grisou en détonant sans enveloppe, lorsque le mélange des deux substances est fait à poids égaux (3 exp.).

Dynamite et sulfate de soude cristallisé. — On songea à remplacer le carbonate de soude par le sulfate de soude à 10 équivalents d'eau. On a constaté que le mélange de dynamite et de sulfate de soude, à parties égales, n'allume pas le grisou (1 exp.), tandis que le mélange contenant 2 parties de dynamite pour 1 partie de sulfate, l'allume (1 exp.).

Dynamite et alun ammoniacal. — Le sulfate et le carbonate de soude sont non seulement efflorescents, mais sont susceptibles aussi de devenir déliquescents avec des conditions atmosphériques qu'on peut rencontrer dans les mines; nous avons pensé à les remplacer par un sel très hydraté, très stable, et ayant l'avantage de se volatiliser à peu près complètement, en se décomposant à haute température, l'alun d'ammoniaque.

Un mélange de dynamite et d'alun à poids égaux n'a pas allumé le gaz (2 exp.).

Un mélange de 2 p. de dynamite et 1 p. d'alun n'a allumé le grisou qu'une seule fois sur 3 expériences; un mélange de 4 p. de dynamite et 1 p. d'alun l'a allumé (1 exp.).

Dynamite et chlorhydrate d'ammoniaque. — Si, dans les mélanges précédents, les substances ajoutées à la dynamite agissent en employant une partie de la chaleur de la détonation à la volatilisation de l'eau, l'emploi d'un sel hydraté n'est pas indispensable pour produire le même résultat. Il suffit que le sel soit susceptible de se décomposer à haute température, en absorbant de la chaleur; et il est avantageux, au point de vue de l'effet utile du mélange, que les produits de la décomposition soient gazeux.

Nous avons pensé au chlorhydrate d'ammoniaque, qui est très stable à la température ordinaire et se décompose en ne donnant que des gaz à température élevée. Il est nécessaire que le chlorhydrate soit très finement pulvérisé, ce qui présente quelque difficulté, et très intimement mélangé.

Avec des mélanges contenant 67 p. de dynamite et 33 p. de chlorhydrate, le gaz a été allumé.

Avec des mélanges tenant 60 p. de dynamite et 40 p. de chlorhydrate, nous n'avons eu d'inflammation qu'une fois sur 3 expériences.

Avec des mélanges à poids égaux, nous n'avons pas eu d'inflammation du gaz (3 exp.).

Dynamite et poussière de houille. — La plupart des houilles donnent aisément, lorsqu'elles sont portées à une température un peu élevée, des produits volatils. Il était donc permis de penser que les mélanges de la poussière de houille avec la dynamite, produiraient le même effet que les mélanges précédemment indiqués.

On s'est servi de poussières de trois espèces de houille différentes. L'une, venant de Blanzy, donne,

par la calcination en vase clos, 40 p. 100 de matières volatiles; la seconde, provenant de Drocourt (Pas-de-Calais), donne 27,86 p. 100 de matières volatiles; la troisième enfin, venant de Dourges (Pas-de-Calais), contient 23,60 de matières volatiles.

Des mélanges tenant 1 p. de dynamite et 1 p. de poussière de houille de Blanzy (2 exp.), 2 p. de dynamite pour 1 p. de poussière de houille (1 exp.) et même 4 p. de dynamite pour 1 de poussière (1 exp.) n'ont pas allumé le grisou.

A poids égaux, il n'y a eu inflammation ni avec la poussière de Drocourt (1 exp.), ni avec celle de Dourges (1 exp.).

Ces résultats sont intéressants, mais il n'y aurait pas lieu de chercher, dans des mélanges de dynamite et de poussière de houille, un explosif présentant quelque sécurité ; car, malgré les résultats de nos expériences, il nous semble possible que, pour des houilles un peu plus inflammables, ou dans des circonstances particulières, difficiles à préciser, la poussière de houille portée à une haute température vienne brûler à l'air. Le résultat obtenu avec le lignite rend cette réserve nécessaire.

Dynamite et poussière de lignite de couleur brune (*Braunkohle*). — Les lignites donnent encore plus de matières volatiles que les houilles.

Nous avons fait pulvériser sous les meules un lignite brun provenant d'Allemagne, qui se trouvait à la poudrerie de Sevran, et donnait 62,40 de matières volatiles.

Un mélange de 2 parties de dynamite et 1 partie de lignite a allumé le grisou.

On se rend aisément compte de ce résultat, en apparence contradictoire avec les précédents, en observant que non seulement le lignite est beaucoup plus inflammable que la houille, mais encore que sa distillation

donne naissance à une sorte de braise inflammable à basse température.

Dynamite et azotate d'ammoniaque. — Guidés par des raisons théoriques que nous exposerons plus loin, nous avons expérimenté des mélanges de dynamite et d'azotate d'ammoniaque. Ces mélanges diffèrent d'ailleurs de ceux qui sont connus sous le nom de dynamites à l'ammoniaque en ce que, n'ayant pas pour but d'accroître l'effet mécanique de l'explosif, nous ne cherchions pas, en ajoutant une matière carbonée, à utiliser l'excès d'oxygène de la dynamite et de l'azotate.

Un mélange intime de 20 parties de dynamite n° 1 de Vonges et de 80 parties d'azotate détone franchement à l'air et, dans 2 expériences n'a pas allumé le mélange gazeux.

L'azotate d'ammoniaque ne joue pas ici tout à fait le même rôle que les substances telles que le chlorhydrate d'ammoniaque, puisqu'il est lui-même un explosif et par conséquent dégage de la chaleur en se décomposant en Az,O et H^2O. Mais il en dégage moins que la dynamite, et l'effet explosif du mélange se trouve ainsi atténué. Nous reviendrons d'ailleurs sur la théorie de ces phénomènes.

Coton-poudre et chlorhydrate d'ammoniaque. — Nous avons aussi songé à mélanger le coton-poudre avec diverses substances. Le mélange est plus difficile; il a été opéré sous les meules légères de la poudrerie.

Nous avons d'abord expérimenté des mélanges de coton poudre de mine avec du chlorhydrate d'ammoniaque.

Un mélange de 80 p. de coton de mine et de 20 p. de chlorhydrate n'a pas allumé le grisou (1 seule exp.), mais un mélange de 75 p. de coton et de 25 p. de chlorhydrate l'a allumé. Il faudrait, pour arriver à une suffisante sécurité, augmenter la proportion de chlorhydrate,

mais on arrive rapidement à des substances ne détonant plus. Nous avons donc renoncé à de semblables mélanges.

Coton-poudre et azotate d'ammoniaque. — Nous avons alors eu recours aux mélanges de coton et d'azotate d'ammoniaque. MM. Sarrau et Vieille ont fait une étude complète du mélange contenant 60 p. de coton endécanitrique et 40 p. d'azotate d'ammoniaque, dans lesquels l'oxygène de l'azotate suffit, avec un très léger excès, pour achever la combustion complète du coton.

Les cartouches fabriquées, il y a quelques années, au Moulin-Blanc avec cette composition ne détonaient pas ou détonaient mal. Nous avons fait fabriquer à Sevran de nouvelles cartouches en employant, soit le coton-poudre de guerre titrant 205^{cc} de bioxyde d'azote, soit un coton beaucoup moins nitré titrant seulement 173.

Les cartouches contenant 30 parties de coton de guerre et 70 parties d'azotate ont enflammé deux fois sur trois.

Les cartouches contenant 20 parties de coton de guerre et 80 parties d'azotate, ont enflammé une fois sur deux.

Une cartouche contenant 35 parties de coton à 173 et 65 d'azotate, a enflammé le grisou.

Les cartouches contenant 20 parties de coton à 173 et 80 parties d'azotate n'ont pas enflammé le gaz. Les sept expériences faites en produisant la détonation assez franche avec deux amorces de 1^{gr},5 sont concordantes.

Il semble donc que les cartouches contenant sur 100 parties, 20 parties de coton faiblement nitré, présentent une assez grande sécurité. Il est permis de penser qu'on assurera mieux encore la sécurité, sans compromettre la détonation au moins en vase clos, en diminuant encore la proportion de coton.

En résumé, il résulte nettement de nos expériences qu'on peut, en mélangeant à un explosif des substances

qui ne détonent point par elles-mêmes ou qui produisent des effets de détonation moindres que l'explosif lui-même, atténuer en quelque sorte la puissance de celui-ci, et fabriquer ainsi des explosifs binaires qui, tout en produisant des effets mécaniques suffisants, ne provoquent plus, au moins dans la grande majorité des cas, en détonant sans enveloppe, l'inflammation des mélanges grisouteux qui les entourent.

Nous appelons aussi l'attention sur un point important. Avec les explosifs simples, tels que la dynamite, l'inflammation du grisou, si l'explosif est susceptible de la produire, se produit toujours à coup sûr.

Pour certains mélanges binaires, les phénomènes paraissent aussi bien constants; mais pour beaucoup d'autres, l'inflammation, en quelque sorte capricieuse, peut se produire tel jour et manquer tel autre. Nous verrons plus tard comment on peut expliquer cette singularité.

IV. — Recherches théoriques.

Mode d'inflammation spécial des mélanges grisouteux. — Deux des membres de la Sous-Commission, dans des recherches antérieures (*), ont évalué à 650° environ la température d'inflammation du grisou. Mais les mêmes observateurs ont fortement insisté sur le *retard considérable à l'inflammation* que peuvent présenter les mélanges de grisou avec l'air ou même avec l'oxygène. Ce retard est naturellement d'autant plus grand que la température à laquelle est porté le mélange diffère moins de 650°; à cette température même le retard peut atteindre une dizaine de secondes.

(*) Mallard et Le Chatelier. — *Recherches sur la combustion des mélanges gazeux explosifs.* — *Annales des mines*, 8e s., t. IV, p. 274 (1883).

Cela permet de comprendre la possibilité de ce fait, en apparence paradoxal, qu'au milieu d'un mélange gazeux inflammable à 650°, il peut se produire, sans que l'inflammation du mélange en résulte, des gaz dont la température est, comme nous allons le voir, supérieure à 2000°. Mais ces gaz ont été formés par la *détonation* d'un explosif, ils se produisent subitement et sous une pression très élevée; ils se détendent et se refroidissent avec une extrême rapidité (quelques millièmes de seconde), avant d'avoir eu le temps d'allumer le mélange de grisou et d'air avec lequel ils viennent en contact.

Aussi les expériences précédentes donneraient-elles un résultat tout différent si elles étaient faites au milieu d'un gaz autre que le grisou. C'est ainsi qu'une cartouche d'un mélange à parties égales de dynamite et de poussière de houille de Blanzy, qui n'allume pas les mélanges grisouteux, allume les mélanges d'air et de gaz d'éclairage (*).

Ces derniers mélanges montrent cependant encore un certain retard à l'inflammation; pour les mélanges d'air et d'hydrogène, le phénomène est bien peu marqué, s'il existe, et nous avons constaté qu'une amorce renforcée à $1^{gr},5$ de fulminate qui n'allume ni le grisou, ni le gaz d'éclairage, allume l'hydrogène.

Température de détonation des explosifs. Formules qui permettent de la calculer. — On est habitué à ne considérer les explosifs qu'au point de vue de ce qu'on appelle leur force, c'est-à-dire de l'intensité des effets mécaniques qu'ils peuvent produire. Nous avons ici à les considérer à un point de vue différent. L'élément capital,

(*) Les expériences avec le gaz d'éclairage sont commencées; elles ne sont pas encore achevées.

pour nous, ce n'est pas la force développée, mais la température produite. Nous sommes ainsi amenés à chercher à calculer la température de détonation d'un mélange dont on donne la composition, la loi de sa décomposition et les données thermochimiques qui la caractérisent.

La marche de ces calculs est bien connue. Comme il nous importait d'obtenir des chiffres aussi voisins que possible des températures réelles de détonation, nous avons tenu compte de l'accroissement des chaleurs spécifiques des gaz, qui a été établi par les expériences de MM. Berthelot et Vieille et par celles de MM. Mallard et Le Chatelier. Nous nous sommes servis des formules linéaires données par ces derniers, pour l'acide carbonique, la vapeur d'eau et les gaz dits parfaits (gaz simples, oxyde de carbone, acide chlorhydrique, etc.) (*).

Nous avons appliqué ces calculs à de nombreuses substances explosives, et particulièrement aux mélanges de dynamite et d'azotate d'ammoniaque, de cellulose endécanitrique avec l'azotate d'ammoniaque, enfin de cellulose octonitrique avec l'azotate d'ammoniaque. Les résultats sont représentés graphiquement par les courbes (*fig.* 5, 6 et 7). Pour chacun des trois mélanges ci-dessus, nous donnons deux courbes, ayant toutes les deux pour abscisses les poids d'azotate qui existent dans dix parties en poids du mélange. L'une des courbes a pour ordonnées les températures de détonation t, l'autre la quantité f, qui définit en quelque sorte la puissance de l'explosif et qui est représentée par l'expression

$$f = \frac{v_0 T \times 1{,}033}{\varpi \times 273},$$

(*) Voir, à la suite du rapport, la note théorique rédigée par MM. Mallard et Le Chatelier (Note A).

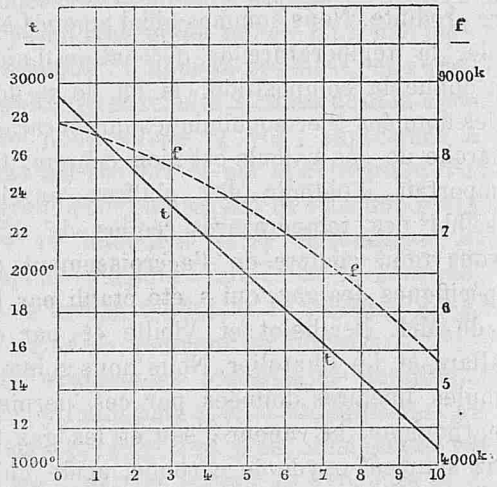


Fig. 5. — Dynamite et azotate d ammoniaque.

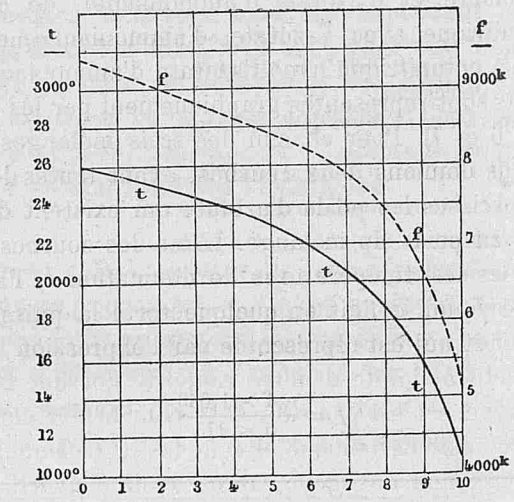


Fig. 6. — Cellulose endécanitrique et azotate d'ammoniaque.

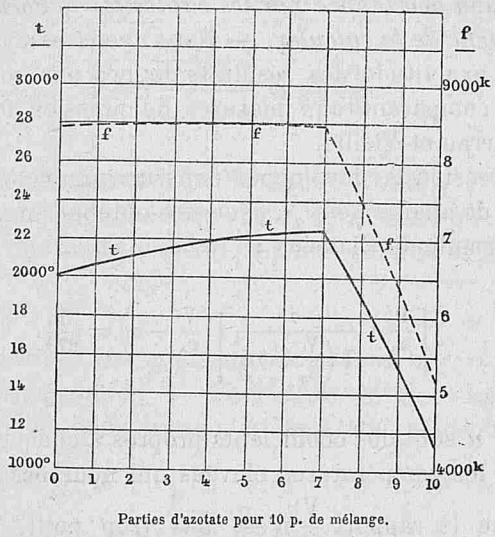


Fig. 7. — Cellulose octonitrique et azotate d'ammoniaque.

dans laquelle

v_0 est le volume des gaz produits par l'explosion, ramenés à 0° et à la pression 760^{mm} de mercure;
ϖ le poids de ces gaz;
T la température absolue de l'explosion.

Avec les mélanges de dynamite et d'azotate d'ammoniaque, la décomposition se fait avec excès d'oxygène, et les gaz sont complètement brûlés.

Avec les mélanges de celluloses azotiques et d'azotate d'ammoniaque, on a admis un mode de décomposition qui est indiqué dans la note de MM. Mallard et Le Chatelier (note A) jointe à notre rapport. Lorsque la quantité d'oxygène n'est pas suffisante pour brûler complètement, en acide carbonique et eau, les gaz combustibles, on suppose que l'oxygène, après avoir converti tout le carbone en oxyde de carbone, se partage entre cet oxyde et l'hydrogène.

Pression développée par les explosifs. — Formules qui permettent de la calculer. — Nous avons essayé de contrôler l'exactitude des résultats donnés par nos calculs en les comparant aux mesures de pression faites par MM. Sarrau et Vieille.

La pression P, développée dans un volume V, sous la densité de chargement Δ, peut être obtenue en se servant de la formule de Clausius :

$$\left[\frac{P}{p_0}+\frac{c}{T\left(\frac{V}{v_0}+\beta\right)^2}\right]\left(\frac{V}{v_0}-u\right)=\frac{T}{273},$$

où c, β, u sont des coefficients propres à chaque gaz.

Pour les températures élevées qui nous occupent, et tant que le rapport $\frac{V}{v_0}$ n'est pas trop petit, le terme $\frac{c}{T\left(\frac{V}{v_0}+\beta\right)^2}$ est tout à fait négligeable.

Quant au coefficient u, qu'on désigne sous le nom de *covolume*, il est à peu près le même pour tous les gaz, comme cela résulte des expériences de M. Amagat et des calculs de M. Sarrau, et on peut le prendre égal à 0,001 (*).

On a donc

$$\frac{P}{p_0}\left(\frac{V}{v_0}-u\right)=\frac{T}{273}.$$

Si l'on remarque qu'avec la densité de chargement Δ, on a

$$V=\frac{\varpi}{\Delta},$$

(*) Voir la note A.

cette formule devient

$$P=\frac{\frac{p_0 v_0 T}{\varpi\times 273}\Delta}{1-\frac{u v_0}{\varpi}\Delta}=\frac{f\Delta}{1-\alpha\Delta},$$

formule connue, dans laquelle les cofficients f et α peuvent être calculés théoriquement, de manière qu'on peut comparer les chiffres théoriques aux chiffres expérimentaux.

Comparaison des pressions théoriques avec les pressions expérimentales. — Pour faire cette comparaison plus aisément, nous avons mis l'équation précédente sous la forme

$$\frac{P}{\Delta}=\alpha P+f.$$

La ligne qui a $\frac{P}{\Delta}$ pour ordonnées et P pour abscisses doit être une droite dont le coefficient angulaire est α et l'ordonnée à l'origine est f.

La *fig.* 8 donne le tracé des droites représentées par cette équation, pour l'azotate d'ammoniaque, la dynamite, le coton-poudre, le mélange de 60 p. d'azotate d'ammoniaque et de 40 p. de coton de guerre, l'explosif Favier, la cellulose endécanitrique et l'acide picrique.

Chacune des droites a été tracée avec le coefficient angulaire α calculé. La droite en points longs de la figure est la droite théorique, la droite pleine est celle qui passe le mieux possible, toujours avec le même coefficient angulaire α, par les points expérimentaux.

La différence entre la droite théorique et la droite expérimentale est, pour l'azotate d'ammoniaque ainsi que pour l'explosif Favier et pour le mélange de coton et d'azotate, inférieure aux erreurs possibles d'observation

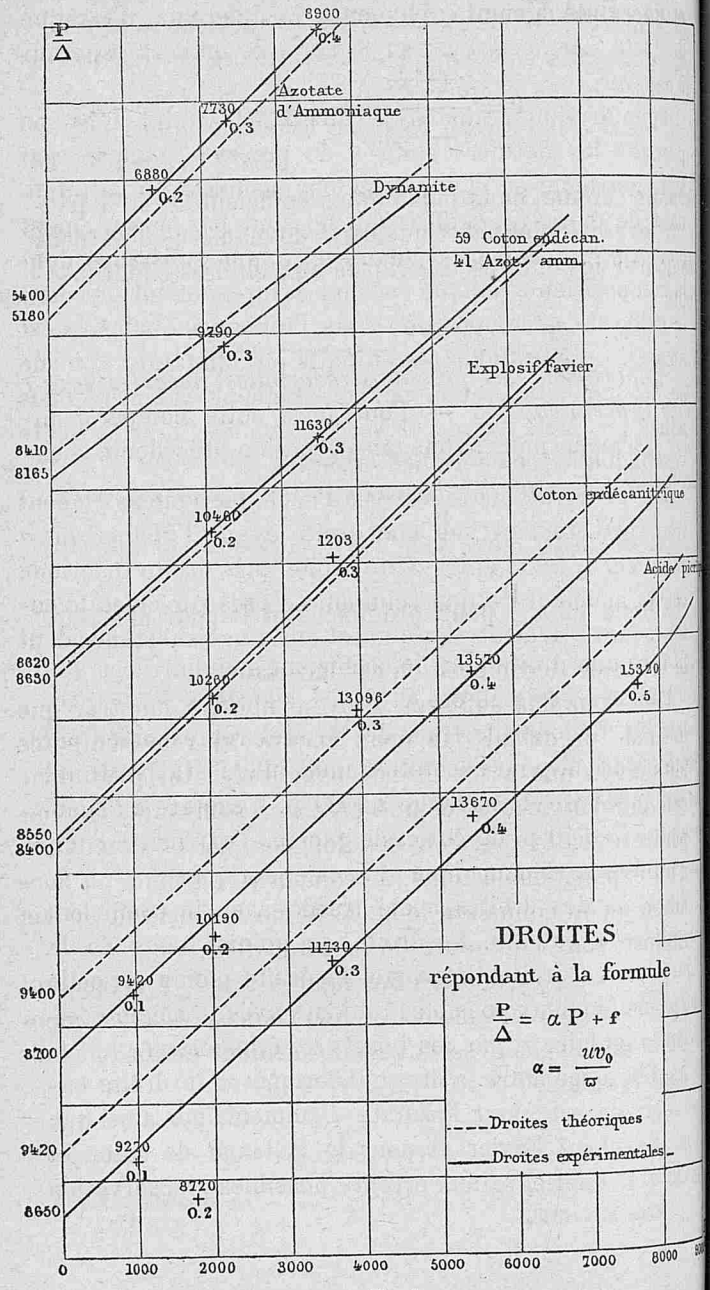


Fig. 8.

et de calcul. Pour la dynamite, la différence n'est que de 1/30. Cet accord est supérieur à ce qu'il était permis d'espérer.

Pour le coton-poudre, la différence atteint 1/10, en prenant les derniers chiffres de pression indiqués par MM. Berthelot et Vieille dans leur mémoire sur le fulminate de mercure, chiffres qui ne sont pas parfaitement concordants. Mais on a affaire ici à une substance dont la composition chimique est mal assurée, et surtout dont le mode de décomposition sous l'influence explosive est incertain. Les calculs ont été faits en admettant le mode de décomposition, non pas directement observé, mais admis par MM. Sarrau et Vieille, comme étant la limite vers laquelle tend le mode observé.

Les observations relatives à l'acide picrique se placent très correctement sur une droite ayant l'inclinaison α calculée. L'écart entre cette droite et la droite théorique est du même ordre que celui qui se présente avec le coton-poudre. L'acide picrique est aussi une substance dont le mode de décomposition est incertain.

Ces exemples suffisent, croyons-nous, à montrer que le mode de calcul que nous employons représente les faits avec une assez grande exactitude. On peut donc calculer d'avance, avec une précision suffisante, la température et la pression développées par la détonation d'un explosif quelconque, de composition connue, à condition qu'on connaisse le mode de décomposition de cet explosif sous l'influence de la détonation.

Les courbes calculées des figures 5 à 7, représentent donc assez correctement les phénomènes, si la décomposition de l'explosif se fait conformément au mode admis dans le calcul.

V. — Étude expérimentale du mode de détonation des explosifs à l'air libre.

Détonation incomplète des explosifs à l'air libre. — L'expérience a montré qu'un mélange contenant 67 p. de dynamite et 33 de chlorhydrate enflamme le grisou ; qu'un mélange contenant 40 p. 100 de chlorhydrate l'enflamme rarement ; enfin, qu'un mélange contenant 50 p. 100 de chlorhydrate, ne l'enflamme pas. Or, en nous reportant à la courbe qui représente les températures de détonation de ces mélanges, nous trouvons que le mélange qui contient 33 p. 100 de chlorhydrate développerait une température de 1.500° ; celui qui contient 40 p. 100 une température de 1.100° ; celui qui contient 50 p. 100 une température de 395° ; si la décomposition pouvait chaque fois être supposée complète. Cette supposition est d'ailleurs certainement inexacte pour le mélange à 50 p. 100, puisque, à la température de 395°, le chlorhydrate n'est pas décomposé. En admettant l'exactitude de l'hypothèse pour les autres mélanges, on arriverait à conclure que la température que les gaz de l'explosion ne doivent pas dépasser pour allumer le grisou, est inférieure à 1.600°. Nous verrons plus loin que cette conclusion est inexacte.

On doit conclure de là que les explosifs, surtout ceux qui sont formés de mélanges binaires, ne se décomposent pas toujours à l'air, tant s'en faut, d'une manière complète.

Procédé d'expérimentation. — Il nous a semblé intéressant d'étudier ce fait avec précision. Nous avons, à cet effet, mesuré la quantité de chaleur développée dans la détonation d'un explosif à l'air libre, en transformant, en quelque sorte, notre chaudière en calorimètre. Nous faisons détoner, dans la chaudière fermée et remplie

d'air, une cartouche exactement pesée. Un manomètre à eau permet d'observer, à des intervalles de temps connus, à partir du moment de la détonation, l'excès de pression $P' - P$ de l'air de la chaudière sur la pression initiale. Une courbe représentant ces observations permet d'obtenir, par une extrapolation, la pression développée au moment même de la détonation, laquelle est directement inobservable à cause du choc imprimé à cet instant à l'eau du manomètre. La figure 9 montre des exemples des courbes ainsi tracées. La signification précise des courbes figurées sera indiquée plus loin.

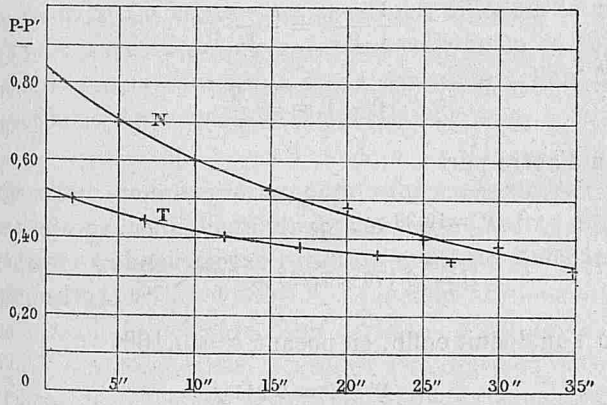


Fig. 9.

N, courbe des pressions pour une cartouche de 50^{gr} de dynamite, sans enveloppe.
T, courbe pour une cartouche de 50^{gr} de dynamite bourrée dans un tube d'étain de 25^{mm}/40^{mm}.

Les mesures ainsi faites sont évidemment assez grossières ; elles suffisent cependant pour atteindre le but que nous avons en vue.

Le volume de la chaudière étant de 10^{m3},170, le volume des gaz développés par l'explosion de la cartouche (dont le poids est de 50 ou de 100 grammes) est relativement insignifiant. L'augmentation de pression de l'air

dans la chaudière est donc dû, à très peu près uniquement, à l'élévation de la température de cet air, portée de t' à t par l'effet de la chaleur Q que développe la détonation. Si l'on appelle ϖ le poids de l'air de la chaudière, c sa chaleur spécifique à volume constant, on a

$$\varpi c(t'-t) = Q.$$

D'ailleurs, P′ et P étant les pressions évaluées en mètres d'eau, après et avant la détonation, $T = t + 273$ la température absolue de l'air avant l'explosion, P sa pression en eau, on a

$$\frac{P'-P}{P} = \frac{t'-t}{T};$$

d'où

$$P'-P = \frac{P}{T}\cdot\frac{Q}{\varpi c}.$$

On a d'autre part

$$P = 10{,}33 \times \frac{H}{760},$$

$$H = 10.170 \times 1{,}293 \times \frac{273}{T} \times \frac{H}{760};$$

d'où l'on déduit enfin, en posant $c = 0{,}168$,

$$P'-P = 0{,}017\,Q,$$

ou

$$Q = 58{,}4\,(P'-P).$$

Résultat expérimental pour la dynamite. — Elle détone à peu près complètement à l'air libre. — Considérons d'abord la dynamite. Nous avons trouvé (courbe N, *fig.* 9), qu'une cartouche de 50 grammes de dynamite de Vonges à 75 p. 100, détonant à l'air libre, développe une pression

$$P'-P = 0{,}83.$$

On en déduit

$$Q = 48{,}5,$$

soit, pour 100 grammes,

$$Q = 97.$$

Or, on peut évaluer à 1.110 calories la chaleur produite par la décomposition complète de la dynamite, soit $55^{cal},5$ pour 50 grammes. Mais la silice absorbe une certaine quantité de chaleur qui est représentée (la température de détonation de la dynamite étant égale à 2.900° et la chaleur spécifique de la silice étant 0.19) par 138 calories. Si l'on admet que cette quantité de chaleur n'est pas immédiatement restituée à l'air de la chaudière, la quantité de chaleur Q ne serait plus, pour 10 grammes, que de 97,2. Ce nombre est assez peu différent de celui qu'on a observé expérimentalement pour qu'on en puisse conclure que la détonation de la dynamite à l'air libre provoque sa décomposition complète.

Résultats expérimentaux pour divers explosifs. — Si nous faisons des calculs analogues pour d'autres explosifs, nous trouverons les résultats contenus dans le tableau suivant :

	POIDS de la cartouche	POIDS du fulmin. de l'amorce	P′ — P observé en m. d'eau	Q déduit pour 100gr	Q théorique pour 100gr
	gr.				
Dynamite à 75 p. 100.	50	1,5	0,83	97,0	97,3
Coton de guerre (titrant 205cc). . . .	50	1,5	0,72	88,0	104,0
Coton de mine (à 193cc).	50	1,5	1,48	172,0	103,0
Dyn.-gomme (de Paulilles).	40	1,5	0,56	80,2	153,5
	50	1,5	0,69	80,6	
Bellite	50	1,5	0,25	29,2	100,3 (1)
	id.	id.	0,28	32,7	
	id.	3,0	0,34	39,8	
Poudre pyr. du Moulin-Blanc	50	1,5	0,445	51,0	82 dissoc. de CO
	id.	id.	0,52	60,8	
	id.	id.	0,60	70,0	
	65	id.	0,61	54,7	
58p coton, 42p azotate de bar. . . .	50	1,5	0,70	82,0	81 dissoc. de CO
20 de coton à 173cc, 80 azotate amm.	50	1,5	15	17,5	80,0
25 id. 75 id.	id.	3,0	41	48,0	91,0
35 id. 65 id.	id.	1,5	43	50,0	102,0
60 id. 40 id.	30	id.	35	68,1	96,0
80 id. 20 id.	id.	id.	63	123,0	82,0
90 id. 10 id.	id.	id.	94	183,0	76,0
20p dynamite, 80p azotate amm. . .	50	1,5	0,225	26,4	50,0
67p id. 33p alun d'amm. . . .	50	1,5	0,445	52,0	53,0 (2)
50p id. 50p chlorhydr. d'amm.	50	1,5	0,42	49,2	10,0 (3)
60p id. 40p id.	50	1,5	0,44	51,5	35,0
67p id. 33p id.	50	1,5	0,53	62,0	49,0

(1) Calculé en admettant 175 binitrobenzine, 825 azotate d'ammoniaque.

(2) Quantité de chaleur calculée en admettant la combustion complète de la nitroglycérine et la déshydratation de l'alun.

3) Ces quantités de chaleur sont calculées en admettant la décomposition du chlorhydrate $ClH + Az + H^3$ et la combustion complète de la nitroglycérine.

Ce tableau montre que la dynamite détone à peu près complètement à l'air libre, comme nous l'avons déjà dit plus haut.

Le coton-poudre de guerre (titrant 205 centimètres cubes) s'approche aussi beaucoup de la détonation complète dans les mêmes conditions.

Pour le coton-poudre de mine, ainsi que pour certains mélanges, pauvres en azotate, de coton à 173 et d'azotate d'ammoniaque et pour les mélanges de dynamite et de chlorhydrate d'ammoniaque, la quantité de chaleur dégagée par la détonation est supérieure à la quantité de chaleur théorique.

Dans la plupart des autres explosifs, la quantité de chaleur dégagée par la détonation est au contraire inférieure à la quantité théorique ; on doit en conclure que ces explosifs ne détonent que fort imparfaitement à l'air libre.

Cette détonation incomplète est sans doute due à ce que les réactions prévues par la théorie, et qui se produisent réellement en vase clos, comme nous le constaterons plus loin, n'ont pas le temps de se produire à l'air libre, dans le temps infiniment court pendant lequel les gaz sont maintenus au contact. Non seulement les réactions sont très incomplètes, mais il peut se faire des réactions toutes différentes de celles qui étaient prévues. M. Berthelot a beaucoup insisté sur cette variation possible dans la nature des décompositions et des réactions, pour l'azotate d'ammoniaque particulièrement.

On conçoit d'ailleurs que le phénomène doit être bien plus accusé encore pour les explosifs binaires, dans lesquels on suppose : 1° que la détonation d'une des deux substances entraîne celle de l'autre, et 2° que les gaz produits par ces deux détonations simultanées réagissent les uns sur les autres. Ces deux hypothèses peuvent manquer à la fois, ou la première peut se réaliser sans la seconde.

Le premier cas doit être celui des mélanges de dynamite et de chlorhydrate d'ammoniaque, qui développent une quantité de chaleur peu inférieure à celle que donne-

rait la détonation de la dynamite seule. La vitesse de décomposition du chlorhydrate est trop faible pour que cette décomposition ait le temps de se produire, et l'effet de la détonation de la dynamite est sans doute de décomposer une très faible partie du sel mélangé et de projeter le reste qui se comporte comme une matière inerte.

Nous verrons plus loin que la décomposition du chlorhydrate n'a pas davantage le temps de se faire, même lorsque l'explosif est bourré dans un tube d'étain de $25^{mm}/40^{mm}$.

L'alun d'ammoniaque, mélangé à la dynamite, semblerait se comporter autrement que le chlorhydrate, puisque la quantité de chaleur observée est presque égale à celle que l'on déduirait de la combustion de la nitroglycérine et de la déshydratation de l'alun. Nous verrons cependant plus loin qu'il y a lieu de mettre en doute l'exactitude de cette conclusion.

Ces faits expliquent d'ailleurs très bien les phénomènes capricieux que les explosifs, surtout les explosifs binaires, produisent, en détonant à l'air libre, au point de vue de l'inflammation du grisou. Lorsqu'un explosif ne détone pas complètement, les réactions que produit sa détonation ne peuvent être définies avec précision, et, sous l'influence de circonstances secondaires, peuvent varier beaucoup. Elles varieront notamment lorsque l'explosif sera sollicité à détoner par une amorce plus ou moins puissante; lorsque l'explosif, au moment de la détonation, sera porté à une température plus ou moins élevée, l'élévation de la température ayant pour résultat de rapprocher d'une détonation complète, etc.

Les anomalies rencontrées dans les expériences prussiennes et dans les nôtres reçoivent ainsi une explication satisfaisante.

On conçoit de la sorte que la sécurité d'un explosif, détonant incomplètement à l'air libre, ne peut être assurée d'une façon complète si, parmi tous les modes de décomposition possibles pour cet explosif, il s'en trouve un seul susceptible d'allumer le grisou.

Le but que l'on doit se proposer dans la recherche d'un explosif d'une sécurité parfaite, s'il en existe un, c'est donc ou bien de trouver un explosif, détonant toujours complètement à l'air sans allumer le grisou, ou bien de trouver un explosif qui ne puisse prendre en détonant partiellement aucun mode de décomposition susceptible d'allumer le grisou.

Phénomène particulier présenté par les cotons peu nitrés détonant à l'air libre. — Un fait très curieux et qui paraît paradoxal, c'est que le coton de mine comprimé allume toujours le grisou, et que le coton de guerre comprimé, bien que plus nitré, et ayant une température de détonation plus élevée, ne l'allume pas toujours. Nos expériences de détonation expliquent cette anomalie.

En effet, la détonation d'une cartouche de 50 grammes de coton de guerre a donné deux fois une compression égale à 0,72, qui correspond à très peu près, comme nous l'avons vu, à la décomposition complète du coton.

Une cartouche de 50 grammes de coton de mine a produit deux fois de suite une compression relativement énorme, que notre manomètre ne nous a permis d'enregistrer qu'imparfaitement, mais qui doit être supérieure à $1^{m},48$, correspondant à 86 calories, soit 1.720 calories pour 1 kilogramme. La décomposition du coton de mine (coton ennéanitrique) doit dégager environ (*) 1.034 calories par kilogramme (eau gazeuse), et sa chaleur de combustion complète est, d'après M. Berthelot, de 2.351 calories.

(*) Voir note A.

Il est donc parfaitement évident que les gaz provenant de l'explosion du coton de mine sont venus, après cette explosion, brûler à l'air presque complètement.

Pourquoi ce phénomène ne se produit-il pas avec le coton de guerre, dont les gaz sont combustibles aussi? Il est difficile de répondre. Tout ce que l'on peut dire, c'est qu'un équivalent d'une cellulose azotique de degré n, donne nécessairement (si l'on suppose que la décomposition ne produit que CO^2,CO,H^2O,H,Az) un volume de gaz combustible $CO + H^2$, égal à

$$\left(48 - \frac{5n}{2}\right) \times 22{,}32 \text{ (*)}.$$

Le volume du gaz combustible croît donc lorsque n diminue; il est égal à $25{,}5 \times 22{,}32 = 568{,}7$ pour le coton ennéanitrique, et à $20{,}5 \times 22{,}32 = 457{,}2$ pour le coton endécanitrique. Les gaz de la détonation du premier sont donc un peu plus combustibles que ceux de la détonation du second. Il est néanmoins singulier qu'une différence aussi faible produise un effet aussi marqué.

Quoiqu'il en soit, ce phénomène bien constaté fait immédiatement comprendre pourquoi des cotons très peu nitrés comme celui qui titre 173 centimètres cubes de bioxyde d'azote, et dont la température de détonation doit être inférieure à 2.000° environ, allument aisément le grisou lorsque le coton de guerre titrant 205, et dont la température de détonation est de 2.640° environ, ne l'allume pas toujours.

Les mélanges de coton-poudre à 173^{cc} et d'azotate d'ammoniaque contenant 90 p. et 80 p. de coton, dégagent aussi, en détonant à l'air libre, une quantité de chaleur beaucoup plus considérable que la quantité théorique. L'oxygène de l'azotate ne brûle pas assez les gaz provenant de la décomposition du coton pour que ceux-ci ne restent encore aptes à venir brûler à l'air.

(*) Voir note A.

Explication des phénomènes présentés par les mélanges de coton-poudre et d'azotate de baryte. — Poudre pyroxylée. — Le même phénomène peut nous permettre aussi de proposer une explication d'un fait qui nous a beaucoup étonnés. La poudre pyroxylée, qui contient 60 p. de coton titrant 180 centimètres cubes, 30 p. d'azotate de baryte et 6 p. d'azotate de potasse, n'allume qu'exceptionnellement le grisou, tandis que le coton seul d'une part, des mélanges plus chargés en azotate de baryte de l'autre, l'allument infailliblement.

Le coton-poudre possédant le titrage de 180, correspond à peu près au coton octonitrique; sa température de détonation est donc environ de 2.000°. Il n'allumerait pas le grisou si les gaz de la détonation ne venaient brûler à l'air; car on démontrera plus loin que la température apparente d'inflammation de grisou, sous l'influence des explosifs, est de 2.200° environ.

Si l'on mélange à ce coton de l'azotate de baryte en quantité suffisante pour brûler les gaz provenant de l'explosion, la température de la détonation s'élève à 2.550° si l'on admet la dissociation du carbonate après l'explosion. Cette température est suffisante pour allumer le grisou.

Mais si l'on abaisse la proportion d'azotate, la température est abaissée et les gaz de la détonation sont assez brûlés par l'oxygène de l'azotate pour ne plus être inflammables et pour se comporter comme ceux du coton de guerre.

On pourra donc trouver des mélanges, comme celui qui constitue la poudre pyroxylée, dont la température

de la détonation sera assez abaissée pour qu'ils n'allument pas le grisou, au moins d'une manière constante.

Force des explosifs. — Nous n'avons point parlé jusqu'ici de la force des explosifs. Cet élément n'est pas l'élément important dans les applications que nous avons en vue. Ce que l'exploitant d'une mine à grisou réclame d'abord, c'est un explosif dont la température d'inflammation soit assez basse pour que la détonation ne puisse jamais allumer le gaz. Quant à la force de l'explosif, elle est en général plus que suffisante; l'exploitant sera satisfait si l'explosif nouveau et sûr qu'on lui donnera ne lui fait pas payer l'unité de force plus cher qu'avec les explosifs actuellement en usage.

Or il est facile de montrer que non seulement cette unité de force peut ne pas coûter plus cher, mais encore que le prix en peut être notablement abaissé.

Prenons comme exemple les mélanges de dynamite et d'azotate d'ammoniaque. On voit, en examinant les graphiques de la *fig.* 5, que, pour le mélange à 80 p. 100 d'azotate, la quantité *f* qui mesure la pression obtenue est de 6.600 kilogrammes, la même quantité *f* étant égale à 9.400 pour la dynamite seule. L'effet utile du mélange est donc les trois quarts environ de celui de la dynamite. Mais si l'on compte le prix de revient de l'azotate d'ammoniaque à 1^{f},10, et celui de la dynamite à 3 francs par kilogramme; le prix de revient du mélange sera de 1^{f},48, c'est-à-dire seulement la moitié de celui de la dynamite.

Il est vrai que l'impôt uniforme de 2 francs par kilogramme modifie un peu le résultat et porte le prix à 5 francs dans ce cas, à 3^{f},48 dans l'autre. Mais le rapport de ces deux chiffres est encore plus petit que trois quarts ; et l'on pourrait sans doute augmenter encore la proportion d'azotate.

L'unité d'effet utile sera donc obtenue à moindre prix

avec l'explosif binaire considéré qu'avec la dynamite. Il est vrai qu'on ne pourra pas produire des effets d'une intensité aussi grande, mais ces effets sont inutiles et peuvent même devenir nuisibles dans l'exploitation des mines de houille, pour l'abatage de la houille par exemple.

Influence possible sur l'inflammabilité du grisou, de la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air. — Nous devons signaler enfin, en terminant, une observation qui s'est présentée à nous depuis que la température atmosphérique est devenue élevée, et qui peut avoir une certaine importance.

Il nous est arrivé deux fois, le 19 mai et le 4 juin, d'expérimenter par un temps à la fois chaud et lourd; le 19 mai surtout, nos expériences ont été faites dans la matinée, le temps était accablant et faisait présager l'orage qui a éclaté dans la soirée. Or, des explosifs qui n'ont jamais, soit avant, soit après, enflammé le grisou, l'ont enflammé ce jour-là. Je citerai la poudre pyroxylée qui a produit l'inflammation deux fois de suite, sans que cet effet ait pu être reproduit depuis.

Le 4 juin, le caractère orageux du temps était moins prononcé que le 19 mai, mais il était cependant très accusé, et le mélange de 0,67 de dynamite et 0,33 d'alun ammoniacal qui n'avait allumé ni le 24 avril, ni le 1er juin, a allumé le grisou ce jour-là. La poudre pyroxylée est cependant restée indemne.

Nous ne croyons pas que l'accroissement de la température soit la cause unique de cet accroissement d'inflammabilité du grisou, car, le 1er juin, la température était supérieure à celle du 19 mai et du 4 juin; mais le temps était très sec et l'effet en question n'a pas été observé. Nous serions tentés de croire que la vapeur d'eau, qui est en quantité considérable dans l'air par des temps

chauds et orageux, doit jouer le rôle prépondérant. Il est possible que le retard à l'inflammabilité du grisou soit diminué par l'augmentation de la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air. On sait, en effet, et un chimiste anglais, M. Dixon, a particulièrement mis en lumière ce phénomène, que l'oxyde de carbone ne se combine pas avec l'oxygène sous l'influence de l'étincelle électrique, lorsque les gaz sont parfaitement secs.

Un fait analogue pour les mélanges grisouteux aurait une grande importance pour les mines où l'air est le plus souvent saturé d'humidité. Des expériences de laboratoire qui se poursuivent actuellement, mais qui ne sont pas encore terminées, pourront seules faire le jour sur cette question.

Résumé. — Pour résumer cette première partie de nos recherches, nous pouvons dire, sans entrer de nouveau dans le détail des expériences, qu'elles démontrent qu'on peut, en mêlant certaines substances à des explosifs dont la détonation allume le grisou, abaisser assez la température de cette détonation pour que les gaz qui en résultent n'allument pas, au moins dans les conditions ordinaires, les mélanges grisouteux au milieu desquels ils détonent librement.

Parmi les mélanges expérimentés par la Commission, ceux qui paraissent les plus dignes d'examen sont :

1° La poudre pyroxylée du Moulin-Blanc, qui cependant, dans des circonstances peut-être un peu exceptionnelles, a allumé deux fois le grisou, le nombre total des essais étant de 19;

2° Le mélange de 20 de coton-poudre peu nitré avec 80 d'azotate d'ammoniaque, dont la température théorique d'inflammation est de 1.920 avec $f = 7.550$, qui n'a pas donné d'inflammation dans sept essais;

3° Le mélange de 20 de dynamite et de 80 d'azotate

dont la température théorique d'inflammation est de 1.500° avec $f = 6.260$, qui n'a pas donné d'inflammation du gaz, dans deux essais seulement, il est vrai;

4° La bellite, dont la composition n'est pas connue avec certitude, dont la détonation, difficile à l'air libre, n'est pas complète, même avec 3^{gr} de fulminate, et qui, dans ces dernières conditions, n'a été l'objet que de trois essais qui n'ont d'ailleurs pas allumé le grisou.

Avec la composition annoncée par l'inventeur, la température de détonation serait théoriquement 2.186° avec $f = 2.993^{kg}$.

5° Enfin l'explosif Favier, dont la température théorique de détonation est de 2.120°, qui ne paraît point détoner à l'air libre, même sous de fortes charges de fulminate; dont l'aptitude à la détonation dans les conditions pratiques d'emploi est mal connue; dont le détonateur intermédiaire tel qu'il a été proposé par l'inventeur, devrait être supprimé, et qui, réduit il est vrai à l'état de poudre fine, a allumé une fois le mélange gazeux.

Les essais faits avec la bellite et avec l'explosif Favier ne peuvent être considérés comme terminés. On a cru devoir mentionner ici ces deux explosifs parce que les expériences déjà faites ne leur paraissent pas défavorables et qu'ils semblent théoriquement rentrer dans la catégorie des substances incapables d'allumer les mélanges grisouteux.

La substance qui paraît la plus convenable pour atténuer la température de détonation des explosifs tels que la dynamite et le coton-poudre est l'azotate d'ammoniaque. Les autres substances que l'on peut mélanger à l'explosif, telles que le carbonate de soude hydraté, le sulfate de soude hydraté, l'alun d'ammoniaque, le chlorhydrate d'ammoniaque, ne sont décomposés que très

partiellement par la détonation, et leur effet est par là même plus incertain.

Les essais faits sur les mélanges de dynamite ou de coton avec l'azotate d'ammoniaque doivent être continués, et il est permis d'espérer qu'on pourra former avec ces substances des mélanges de proportions variées, présentant, avec de grandes garanties de sécurité, tous les degrés de forces explosives qui peuvent être regardés comme utiles dans la pratique.

CHAPITRE II.

EXPLOSIFS DÉTONANT EN VASE CLOS.

Nous nous sommes beaucoup étendus sur les phénomènes que montrent les explosifs détonant à l'air libre, quoique ce mode de détonation, pour lequel ils ne sont pas faits, doive être interdit dans l'intérieur des mines. Mais c'est évidemment dans ces conditions que les explosifs présentent le danger maximum, et qu'il est le plus aisé de les classer au point de vue de la sécurité.

D'ailleurs il peut toujours arriver accidentellement, par suite de l'imprudence, de l'inattention d'un ouvrier, ou par toute autre cause, que l'explosif employé dans les travaux soit amené à la détonation avant d'être bourré au fond du trou de mine. Le danger que présente la détonation à l'air libre, n'est donc pas purement imaginaire.

Il n'est pas moins vrai que dans l'emploi normal les explosifs doivent détoner en vase clos, et nous allons étudier maintenant les dangers qu'ils peuvent présenter dans ces conditions.

Procédé d'expérimentation. — Lorsqu'un explosif détone au fond d'un trou de mine, il se produit, si le trou ne débourre pas, des fissures plus ou moins larges dans le massif ébranlé, à travers lesquelles s'échappent les gaz provenant de la détonation. La diversité des modes suivant lesquels peut se produire cet effet est infinie, mais dans presque tous les cas, sinon dans tous, les gaz de l'explosion n'arriveront en contact avec l'air extérieur qu'après avoir produit sur la roche un certain travail mécanique.

Pour réaliser quelque chose d'analogue dans notre chaudière, mais dans des conditions certainement plus dangereuses que celles qui peuvent se rencontrer dans la pratique, nous avons suspendu, au milieu du grisou, l'explosif enfermé dans un tube métallique, en plomb ou en étain, fermé en bas, ouvert en haut. L'explosif, dans ce tube, reposait sur un tampon de 5 à 6 centimètres de glaise ou de sable, il était recouvert par une bourre d'argile, de sable ou même dans certains cas, de poussière de houille, d'une épaisseur de $0^m,10$ à $0^m,12$ en général.

La détonation faisait éclater, projetait à l'état de poussière métallique, la portion du tube avec laquelle elle se trouvait en contact. La partie inférieure du tube et la partie supérieure restaient en général à peu près intactes au fond de la chaudière.

On pouvait faire varier la nature du métal (plomb ou étain) et surtout son épaisseur. Les observations n'ont d'ailleurs été faites et n'avaient d'intérêt que pour des explosifs allumant le grisou à l'air libre.

Résultats expérimentaux. — Dans les conditions normales de détonation, l'explosif étant bien tassé contre les parois du tube et entre les deux bourres, on observa les faits résumés dans le tableau suivant :

	DIAMÈTRE intérieur et extérieur du tube en millim.	NATURE du tube	ACTION sur le mélange grisouteux
Dynamite n° 1	27 — 40	Plomb	N. (*)
—	30 — 40	Id.	I.
—	30 — 35	Id.	I.
—	25 — 40	Etain	N.
Coton-poudre de mine	32 — 42	Plomb	N.
— —	30 — 35	Id.	N.
Dynamite-gomme	25 — 40	Etain	I.
Dynamite-gélatine	27 — 40	Plomb	N.
Dynamite à l'ammoniaque	25 — 40	Etain	N.

(*) N. Non inflammation du grisou. — I. Inflammation du grisou.

En résumé, tous les explosifs, cessent sans doute d'allumer le gaz lorsque l'épaisseur des parois du tube est suffisamment grande, mais l'épaisseur susceptible de produire cet effet varie avec l'explosif.

Avec le coton-poudre de mine, un tube de plomb de $30^{mm}/35^{mm}$, ayant ainsi seulement $2^{mm},5$ d'épaisseur, suffit à empêcher l'inflammation.

Avec la dynamite n° 1, il faut un tube de plomb de 27/40 ou un tube d'étain de 25/40.

La dynamite-gélatine se comporte à peu près comme la dynamite n° 1.

Avec la dynamite-gomme, le tube d'étain de 25/40 ne suffit plus à empêcher l'inflammation du grisou, ce qui est d'accord avec la quantité considérable de chaleur développée par cet explosif, qui, parmi tous les dérivés de la dynamite, doit être considéré comme le plus dangereux.

Explication de l'effet produit, au point de vue de l'inflammation du grisou, par le tube qui enveloppe l'explosif. — Travail développé par la projection des parois du tube. — On peut se demander qu'elle est la cause de l'effet produit par le tube qui n'empêche pas en somme les gaz de l'explosion d'arriver très rapidement, et à une très haute température, en contact avec le mélange grisouteux. Il nous semble que cette cause doit être uniquement cherchée dans le refroidissement que subissent ces gaz, à la suite du travail mécanique qu'ils doivent dépenser pour imprimer une certaine force vive aux parois latérales du tube pulvérisées.

Ce travail mécanique est considérable, et nous avons pu l'apprécier d'une façon très simple en faisant détoner la cartouche, bourrée dans son tube, au milieu de la chaudière close mais remplie d'air, et en enregistrant la pression produite par la détonation, comme il a été dit plus haut. La compression initiale $P' - P$ observée donne, en la multipliant par le coefficient 58,4 (voir page 250), la quantité de chaleur Q' cédée à l'air de la chaudière après la détonation. Or cette quantité de chaleur est égale à celle Q qui est mise en liberté par la détonation, diminuée de la quantité de chaleur AU équivalant à la force vive U communiquée aux parois du tube.

Si préalablement, par la détonation du même explosif à l'air libre, on a mesuré Q, on pourra, en faisant la différence, connaître AU.

Dans ces conditions, une cartouche de 50 grammes de dynamite n° 1, a donné (*) :

A l'air libre une pression. . $P' - P = 0,83$ corresp^t. à $Q = 48,5$
Dans un tube d'étain de 25/40 $P' - P = 0,525$, $Q' = Q - AU = 30,6$

(*) Voir les courbes de pression déduites de l'observation (p. 249, *fig.* 9). On remarquera que la marche du refroidissement indiquée par la courbe qui correspond à la détonation dans le tube est plus lente que celle qui correspond à la détonation à l'air libre. La chaleur transformée en force vive, communiquée aux fragments du tube, est ramenée à l'état de chaleur par le choc

On a donc

$$AU = 17,9 \quad \text{et} \quad \frac{AU}{Q} = \frac{17,9}{48,5} = 0,37.$$

La quantité de chaleur transformée en travail par la désagrégation des parois du tube et par la projection des fragments, varie d'ailleurs avec la nature et les dimensions du tube. Toutes choses égales, elle diminue avec l'épaisseur.

En opérant toujours avec la dynamite, nous avons trouvé qu'avec un tube de plomb de $32^{mm}/42^{mm}$, la portion de chaleur absorbée par le travail mécanique est de 0,44 environ.

Avec un tube de plomb de $30^{mm}/35^{mm}$, cette portion est de 0,33.

On a donc, dans cette expérience, transformé en travail un peu plus du tiers de la chaleur totale. C'est environ la moitié de la transformation que la détente des gaz chauds provenant de la détonation de la dynamite, complètement bourrée dans un espace clos, serait théoriquement capable de produire (voir note B).

Température APPARENTE *d'inflammation des mélanges de grisou et d'air sous l'influence des explosifs.* — Les résultats expérimentaux obtenus avec la dynamite peuvent d'ailleurs nous permettre de calculer, au moins approximativement, la température que doivent posséder les gaz produits par la détonation de l'explosif pour allumer le mélange de grisou et d'air.

En effet, puisque la détente des gaz provenant de la détonation de la dynamite a perdu, en la communiquant

---

des fragments contre les parois de la chaudière, et cette chaleur est restituée graduellement à l'air de la chaudière, ce qui ralentit la marche du refroidissement.

sous forme de force vive aux parois du tube, les 0,37 de sa quantité de chaleur initiale, elle n'en conserve plus que les 0,63.

Par un calcul analogue à celui qui nous a servi pour obtenir la température de détonation, on trouve que les gaz, au moment où le tube d'étain de 25/40 a été projeté ils se trouvent en contact avec le mélange inflammable, ont une température de 2.150°. Le mélange ne s'allumant pas par ce contact, on peut dire que la température *apparente* d'inflammation est, *dans les conditions de l'expérience*, supérieure à ce chiffre.

Après la projection du tube de 30/35, la température des gaz doit être de 2.280°; or, ils allument le grisou. La température *apparente* d'inflammation du mélange de grisou et d'air serait donc, autant qu'on peut en juger par ces calculs simplement approximatifs, comprise entre 2.150° et 2.280°, soit environ 2.200°.

Si l'on fait le même calcul pour la dynamite-gomme détonant dans le tube d'étain de 25/40, on trouve que la température du gaz, après la projection des parois du tube, doit être de 2.400° environ. Aussi ces gaz enflamment-ils le mélange grisouteux.

Nous rappellerons que la valeur élevée de la température *apparente* d'inflammation du grisou, que nous venons de déduire des observations, est due, au moins en majeure partie, au retard considérable à l'inflammation que présentent les mélanges grisouteux, et à la très rapide détente des gaz provenant de la détonation des explosifs, qui amène un refroidissement extrêmement brusque. Elle ne s'applique donc qu'aux conditions expérimentales particulières pour lesquelles elle a été obtenue.

Détonation au milieu de l'eau. — Nous avons cherché quel effet on pouvait attendre des cartouches dites *Settle*,

formées, comme nous l'avons dit plus haut, d'un tube en papier imperméable, fermé en bas, qu'on peut remplir d'eau et au milieu duquel on place l'explosif. Ce tube est destiné à être placé dans le trou de mine qu'il remplit. Il a un diamètre plus grand que celui de la cartouche explosive qui est isolée des parois par des ailettes métalliques.

Nous avons déjà vu qu'en suspendant la cartouche Settle au milieu du mélange grisouteux, et plaçant au milieu de l'eau une cartouche de poudre noire, la détonation de celle-ci provoque l'inflammation du gaz extérieur.

En remplaçant la poudre noire par une cartouche de 50 grammes de dynamite, nous avons obtenu le même effet une fois sur deux expériences.

Variation du travail développé par les gaz de l'explosion, avec la densité de chargement. — Nous avons cherché quel effet pouvait produire un vide laissé entre l'explosif et le tube, ou, d'une manière plus générale, la variation de ce qu'on appelle la densité de chargement, c'est-à-dire le rapport entre le poids de l'explosif et le volume qu'il occupe dans le tube.

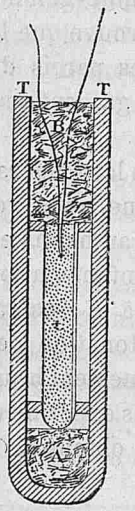


Fig. 10.

Dans ce but, nous avons tassé 26 grammes de dynamite dans une éprouvette en verre mince, d'un diamètre extérieur moindre que $0^m,025$, et nous avons placé cette éprouvette dans l'intérieur d'un tube en étain de $25^{mm}/40^{mm}$ fermé à l'une de ses extrémités, au-dessus d'un tampon d'argile de $0^m,05$ de hauteur. Le reste de la capacité du tube en étain était bourré sur $0^m,10$ à $0^m,12$ environ par de l'argile.

Ce mode de chargement est représenté dans la *fig.* 10, où *t* est l'éprouvette en verre remplie de dynamite, T T le tube d'étain, A le tampon et B la bourre d'argile.

On a obtenu, dans ces conditions, les deux courbes de variation de pression représentées par la *fig.* 11.

On en déduit, pour la pression initiale développée par les 26 grammes de dynamite détonant à l'air libre (courbe T),

$$P' - P = 0,42 \quad \text{d'où} \quad Q' = 24^c,5,$$

ce qui est d'accord avec l'expérience faite avec 50 gram.

Quant à la détonation dans l'éprouvette en verre bourrée dans le tube d'étain, elle a donné pour pression initiale

$$P'' - P = 0,33 \quad \text{d'où} \quad Q'' = 19^c,3.$$

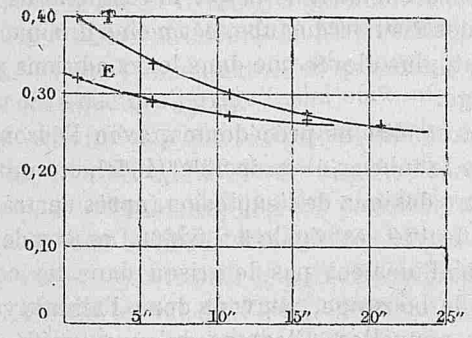


Fig. 11.

T, Courbe des pressions pour une cartouche de 26 gr. de dynamite détonant à l'air libre.

E, Courbe des pressions pour une cartouche de 26 gr. de dynamite remplissant une éprouvette en verre mince, bourrée dans le tube d'étain de $25^{mm}/40^{mm}$.

Dans ces nouvelles conditions de chargement, la quantité de chaleur AU dépensée en travail mécanique est égale à $5^{cal},2$ et le rapport de cette quantité à la quan-

tité de chaleur totale dégagée par l'explosion n'est plus que de $\frac{5,2}{24,5} = 0,21$.

Le rendement mécanique qui, avec le bourrage ordinaire était de 1/3 environ, n'est donc plus que de 1/5 environ (*).

On peut se rendre compte de cette différence en remarquant que, la densité de chargement étant diminuée, les gaz de l'explosion se détendent dans l'éprouvette en étain avant de venir presser les parois, tout en conservant leur température, puisqu'il n'y a pas de travail produit. La pression exercée par les gaz sur les parois de l'éprouvette étant moindre, ces parois sont projetées avec une moindre énergie, acquièrent une force vive moins considérable, d'où résulte une production plus faible de travail mécanique (voir note B).

Il suit naturellement de là que la température des gaz, après la destruction du tube, est moins diminuée et, par conséquent, plus élevée que dans les conditions normales de bourrage.

Dans les conditions précédentes, avec l'éprouvette en verre dans le tube en étain de $25^{mm}/40^{mm}$, on trouve que la température des gaz de l'explosion, après le travail mécanique effectué, est égale à 2.520°. Les gaz de l'explosion qui n'allumaient pas le grisou dans les conditions normales de bourrage, peuvent donc l'allumer dans les conditions nouvelles. C'est ce qu'on a vérifié avec un tube de plomb de $27^{mm}/40^{mm}$. Une cartouche de 30 grammes de dynamite, qui, bourrée dans le tube métallique à la façon ordinaire, n'allume pas le grisou, l'allume toutes les

(*) Cette expérience montre qu'on n'a pas d'avantage à placer l'explosif dans une cavité plus ou moins élargie, comme on l'a proposé souvent dans le but d'augmenter l'effet utile de cet explosif.

fois qu'elle est placée dans une éprouvette en verre et bourrée dans ce tube de plomb comme nous venons de le dire.

Par une raison tout à fait analogue, de la dynamite *versée* simplement dans un tube de plomb de $32^{mm}/42^{mm}$, puis bourrée, allume le grisou, tandis que, dans les mêmes conditions, la dynamite *tassée* ne l'allume pas.

Il faut tirer de là cette conclusion très importante dans la pratique, qu'il faut toujours tasser et bourrer avec soin bien que sans exagération, les explosifs dans le trou de mine; ils travaillent mieux et sont moins dangereux.

En faisant varier la forme du vase qui contient l'explosif, on ne modifie pas la densité de chargement, mais on fait varier le travail imposé à l'unité de volume du gaz que produit la détonation. En aplatissant le tube, par exemple, on augmente ce travail. On s'explique ainsi ce fait observé que de la dynamite enfermée dans un tube en plomb, à section circulaire de $30^{mm}/40^{mm}$, enflamme le gaz, tandis que l'inflammation ne se produit plus lorsque le même tube est aplati.

Nous venons de voir que les gaz de la détonation, au sortir du tube d'étain de 25/40 qui contient l'éprouvette en verre remplie de dynamite, doivent posséder une température de 2.500° environ. Ils n'allument pas encore le gaz, mais l'effet doit être sur le point de se produire, car, avec un tube de plomb de 27/40, l'inflammation a lieu. Nous trouverions ainsi que la température apparente d'inflammation est un peu supérieure à 2.500°. Nous l'avions, par une autre voie, trouvée comprise entre 2.150° et 2.280°. Le désaccord entre ces deux déterminations ne paraîtra pas considérable, si l'on songe aux causes d'erreur nombreuses qui peuvent les affecter. Celle que nous venons de faire en dernier lieu est en particulier fonction de variables très nombreuses, telles que les dimensions de l'éprouvette en verre, le vide laissé entre les parois de

cette éprouvette et celles du tube métallique, et même peut-être aussi la forme de ce vide. Pour ces diverses raisons, la première détermination, qui fixe la température *apparente* d'inflammation des mélanges grisouteux vers 2.200° environ, paraît mériter plus de confiance.

Mode de détonation des divers explosifs en vase clos. Recherches expérimentales. — Nous nous sommes servis des résultats donnés par la détonation des explosifs dans des tubes, pour acquérir quelques notions sur le mode de décomposition de ces explosifs en vase clos.

Si l'on fait, en effet, détoner dans la chaudière un explosif convenablement bourré dans un tube d'étain de 25/40, et si l'on mesure la compression produite, cette compression correspondra aux 0,63 environ de la chaleur développée par l'explosion, laquelle pourra ainsi être mesurée, au moins approximativement.

Nous avons ainsi obtenu les résultats contenus dans le tableau suivant :

NATURE DE L'EXPLOSIF	NATURE et dimensions du tube métallique	P′ — P observé	Q déduit en tenant compte de la fraction perdue par le travail mécanique. Pour 100 gr.	Q théorique pour 100 gr.
	mm mm			
Dynamite à 75 p. 100.	Sn 25/40	0,525	»	97,2
	Pb 32/42	0,46	»	
	Pb 30/35	0,565	»	
Dynamite-gomme (de Paulille).	Sn 25/40	0,62	115,0	153,5
Bellite	Pb 30/35	0,47	99,0	100,2
	Sn 25/40	0,51	95,0	
Poudre pyroxylée du Moulin-Blanc	Sn 25/40	0,47	87,0	82 à 100
20 Dyn. — 80 Az. ammon. . . .	Sn 25/40	0,28	51,8	50
67 Dyn. — 33 Alun d'amm. . .	Sn 25/40	0,38	71,0	33
60 Dyn. — 40 Chlorhydr. amm.	Sn 25/40	0,37	68,5	35
67 Dyn. — 33 id.	Sn 25/40	0,42	78,0	49
Tous ces explosifs ont été employés en cartouches de 50 grammes, et ont détoné sous l'influence d'une amorce de 1gr,50 de fulminate.				
Les explosifs suivants ont été employés en cartouches de 30 grammes, avec la même amorce de 1g,5.				
60 Coton à 173 — 40 Az. am.	Sn 25/40	0,30	93	96
80 id. 20 id.	id.	0,28	87	82
90 id. 10 id.	id.	0,23	71	76

Ce tableau montre que la dynamite-gomme ne détone pas complètement, même bourrée dans un tube de $25^{mm}/40^{mm}$ en étain. La détonation complète de cette substance, c'est-à-dire la combustion complète des gaz du coton par l'oxygène de la dynamite, exige des vases plus résistants, capables de maintenir ces gaz plus longtemps en contact mutuel. Il est vraisemblable que la dynamite-gomme, dans des roches peu dures et peu résistantes, ne développe qu'une partie de son énergie.

La bellite et la poudre pyroxylée détonent complètement dans le tube en étain de 25/40; la bellite détone complètement, même dans le tube de 30/35 en plomb.

Les mélanges de dynamite et de chlorhydrate d'ammoniaque détonent dans un tube d'étain de 25/40, à peu près comme ils détonent à l'air libre. La décomposition du chlorhydrate ne se fait pas ou ne se fait que très partiellement, même dans ces conditions relativement favorables. La vitesse de décomposition du chlorhydrate est trop faible.

Il en est de même pour les mélanges de dynamite et d'alun d'amoniaque.

Le mélange de 20 dynamite et 80 d'azotate d'ammoniaque détone complètement dans le tube d'étain de 25/40.

Il en est de même des mélanges de coton à 173 et d'azotate d'ammoniaque.

Effet produit par les explosifs bourrés dans un trou et allumés par la mèche. — Les explosifs détonent sous l'influence des amorces ; ils peuvent continuer à brûler, au moins en général, lorsqu'on les allume avec une flamme.

Lorsque ce second mode de décomposition est réalisé, il peut devenir la cause de dangers particuliers dans les mines à grisou. S'il est réalisé à l'air libre, la combustion du grisou en résulte, mais il est assez difficile de comprendre comment un semblable accident pourrait se produire dans la pratique.

Lorsque l'explosif est placé au fond du trou de mine, il peut être allumé sous l'influence de la mèche Bickford, si cette mèche vient en contact avec l'explosif avant de faire détoner l'amorce.

Nous avons réalisé ces conditions pour une cartouche de dynamite bien bourrée dans un tube en étain de 25/40 ; on plonge dans cette cartouche et jusqu'au fond, une mèche Bickford portant à l'extrémité une amorce de $1^{gr},5$. Le grisou est allumé. Cet effet ne se produit pas si l'on supprime l'amorce. Celle-ci a sans doute pour

effet de projeter en dehors du tube, déjà gonflé, la flamme qui la remplit entièrement.

La sécurité exige donc impérieusement, ce que demande aussi le bon emploi de l'explosif, que la mèche Bickford ne soit jamais en contact avec l'explosif.

Résumé. — Règle générale pour l'emploi des explosifs dans une mine à grisou. — On peut résumer cette partie des études de la Commission en disant que les explosifs qui travaillent sont moins dangereux que ceux qui ne travaillent point, et qu'ils sont d'autant moins dangereux qu'ils travaillent mieux. Toutes les conditions qui tendent à diminuer le travail utile de l'explosif, telles que l'absence de bourrage, ou un bourrage insuffisant, le vide laissé derrière la bourre ou entre la bourre et l'explosif, le contact entre la mèche Bickford et l'explosif, doivent être évités avec le plus grand soin.

CHAPITRE IV.

MODE D'ALLUMAGE DES COUPS DE MINES.

Amorces renforcées et non renforcées. Différence de leurs effets sur l'inflammation du grisou. Explication. — La détonation des explosifs exige l'emploi d'une amorce qui est ordinairement formée d'un petit vase cylindrique en cuivre ou en laiton, contenant généralement du fulminate de mercure plus ou moins mélangé d'autres substances.

Nous avons constaté, ainsi que nous l'avons dit en

commençant, que des amorces, dites renforcées, à $1^{gr},5$, et même 2 grammes de fulminate, n'allument pas le grisou. Les amorces renforcées à $1^{gr},5$ n'allument même pas les mélanges d'air et de gaz d'éclairage, mais elles allument les mélanges d'air et d'hydrogène.

Les amorces renforcées contenant 5 grammes de fulminate allument le grisou.

Avec des amorces non renforcées, la charge de $1^{gr},50$ suffit à produire l'inflammation des mélanges d'air et de grisou.

La principale différence entre les amorces non renforcées et les amorces renforcées, est que, dans ces dernières, le fulminate placé au fond du cylindre métallique est comme coiffé par une petite bonnette métallique portant à sa partie supérieure un orifice qui découvre le fulminate et permet d'en provoquer l'inflammation. En outre, l'épaisseur du métal est plus grande, et le fulminate, plus comprimé, a une densité plus forte.

D'après les principes dont nous avons démontré plus haut l'exactitude, les amorces renforcées, ayant une masse métallique plus grande et une densité de chargement plus forte, les gaz provenant de la détonation du fulminate, dépensent, sous forme de travail mécanique, plus d'énergie avant de venir au contact avec le gaz extérieur; ils doivent donc, comme on l'observe, allumer plus difficilement, à charge égale, les mélanges gazeux.

Si d'ailleurs on enveloppe extérieurement une amorce *non renforcée*, à $1^{gr},50$ de fulminate, des spires contiguës d'un fil de cuivre fin, on augmente le travail mécanique que les gaz de la détonation doivent produire, et nous avons constaté que, dans ces conditions, la détonation de l'amorce non renforcée n'allume plus le mélange grisouteux. Cette expérience est une nouvelle démonstration des principes que nous avons posés plus haut.

Amorces diverses. — Nous avons constaté que les amorces de Paulilles, soit celles qui détonent sous l'influence de l'électricité, soit celles qui détonent sous l'influence de la mèche Bickford, n'allument pas le grisou.

Il en est de même des amorces dites d'Abegg, détonant par l'électricité.

Quant à l'amorce Ruggieri et Scola (*), elle allume le mélange grisouteux.

Dangers que présente la mèche Bickford. — La détonation de l'amorce peut être provoquée par la mèche Bickford, et nous avons constaté que la combustion de cette mèche peut se produire au milieu d'un mélange grisouteux sans l'enflammer, pourvu, bien entendu, que l'extrémité qu'on allume soit en dehors du mélange combustible.

Les dangers provenant de l'emploi de cette mèche sont cependant bien évidents.

Elle n'est sûre qu'à condition d'être de bonne qualité, et la sécurité repose sur la perfection d'une fabrication qu'il est impossible de contrôler.

Il est une autre cause très sérieuse de danger, c'est celle qui provient de la possibilité d'une fausse manœuvre de l'ouvrier faisant pénétrer la mèche trop profondément dans la cartouche et la mettant ainsi directement en contact avec l'explosif. On a vu que, dans ces conditions, l'explosif brûlant avant de détoner, il peut se produire une projection, en dehors du trou, des gaz provenant de l'inflammation et un allumage du grisou. Cette cause de danger est d'autant plus grave qu'elle fait reposer la sé-

(*) L'amorce Ruggieri et Scola est une sorte de petite canette formée de pulvérin que la mèche, grâce à une petite quantité d'explosif, projette, de l'orifice du trou de mine non bourré, sur la cartouche placée au fond.

curité de la mine sur une manœuvre faite par un ouvrier et impossible à contrôler.

Sans parler de l'inconvénient qui résulte de l'allumage de l'extrémité de la mèche, qui ne peut être fait que dans un point de la galerie où l'absence du grisou soit bien constatée, il semble donc désirable que l'emploi de la mèche Bickford puisse être supprimée dans les mines à grisou.

Emploi de l'électricité. — On peut alors recourir à l'électricité, soit à l'électricité de tension, soit à l'électricité des courants. Sans entrer dans la discussion approfondie des divers procédés d'allumage électrique, on doit signaler les inconvénients de l'électricité de tension, qui peut donner, sur son parcours, des étincelles susceptibles d'allumer le grisou, et qui ne peut être portée qu'à une assez faible distance, lorsque les fils ne sont pas parfaitement isolés.

Il semble donc qu'au point de vue de la sécurité tout au moins, les courants à faible tension sont préférables.

Cordeaux détonants. — Nous avions songé à proposer le remplacement du fil électrique par un cordeau détonant à la nitrocellulose, qu'on aurait fait détoner au moyen d'une amorce renforcée au fulminate, placée en dehors du trou, et allumée soit par l'électricité, soit par une étoupille de friction, soit même par une mèche Bickford dont le danger serait bien moindre puisqu'alors elle ne pourrait jamais être en contact avec l'explosif. On éviterait en même temps l'inconvénient de bourrer sur une amorce qui détone par le choc, et celui d'avoir, après un raté, une cartouche munie de son amorce, au fond du trou.

Malheureusement nous nous sommes assurés que ces

cordeaux, lorsqu'ils sont de petit diamètre, ne provoquent pas, avec certitude, la détonation des explosifs peu sensibles, tels que les mélanges de cellulose peu nitrée et d'azotate d'amoniaque, la poudre pyroxylée, etc.

D'un autre côté, en augmentant le diamètre du cordeau, on risquerait peut-être de trop agrandir le canal que ce cordeau pratique dans le bourrage et qu'il dilate en détonant. Les gaz provenant de la détonation de l'explosif pourraient s'échapper par ce canal et venir provoquer l'inflammation du mélange grisouteux extérieur.

Nous avons donc renoncé à notre idée, au moins jusqu'à ce que des expériences plus complètes aient pu être faites sur ce sujet.

Amorces de friction. — M. Lauer, lieutenant-colonel du génie autrichien, a récemment proposé de faire détoner les explosifs bourrés au fond d'un trou de mine au moyen d'une amorce de friction. Cette amorce, enfoncée dans la cartouche, est mise en jeu au moyen d'un fil métallique renfermé dans un petit tube logé au milieu du bourrage.

Ce système est déjà employé exclusivement dans un certain nombre de mines autrichiennes, où on est, paraît-il, satisfait de son emploi.

Dès que nous aurons à notre disposition un certain nombre d'amorces de M. Lauer, nous les expérimenterons et nous rendrons compte de nos essais à la Commission.

CHAPITRE V.

CONCLUSIONS.

Les conclusions que les recherches de la Commission lui permettent de formuler sont les suivantes :

1° La poudre de mine, même déflagrant au milieu de l'eau, peut enflammer des mélanges de grisou et d'air.

2° La plupart des explosifs, actuellement connus sont susceptibles d'enflammer, en détonant à l'air libre, les mélanges grisouteux; la dynamite, le coton-poudre de guerre ou de mine (particulièrement ce dernier), la dynamite-gomme, la dynamite-gélatine, la dynamite à l'ammoniaque de Paulilles, sont dans ce cas.

3° Il est cependant possible de trouver des explosifs qui détonent à une température assez basse pour ne pas provoquer, au moins dans la grande majorité des cas, en détonant à l'air libre, l'inflammation des mélanges grisouteux.

Parmi les explosifs expérimentés par la Commission qui réalisent, plus ou moins parfaitement ces conditions, on peut citer :

(1) des mélanges intimes de 50 parties de dynamite avec 50 parties de carbonate de soude cristallisé, de sulfate de soude à 10 équivalents d'eau, d'alun d'ammoniaque, de chlorhydrate d'ammoniaque;

(2) la poudre pyroxylée du Moulin-Blanc;

(3) le mélange de 20 parties de dynamite à 75 p. 100, et de 80 parties d'azotate d'ammoniaque;

(4) le mélange de 20 parties de coton-poudre (titrant 173^{cc} de bioxyde d'azote) et de 80 parties d'azotate d'ammoniaque;

(5) la bellite, dont la composition n'est pas connue avec une entière certitude, et qui n'a encore été l'objet que d'un nombre insuffisant d'expériences;

(6) l'explosif de M. Favier, formé d'environ 90 parties d'azotate d'ammoniaque et de 10 parties de mononitronaphtaline, qui paraît devoir égaler la bellite au point de vue de la sécurité, mais dont le détonateur intermédiaire, tel qu'il a été soumis à la Commission des substances explosives, devrait être supprimé, et sur lequel de nouvelles expériences doivent être répétées.

4° En raison de la complexité et du peu de fixité des phénomènes qui peuvent se présenter dans la détonation des explosifs à l'air libre, il sera toujours prudent d'éviter le tirage des coups de mine, même chargés avec un des explosifs considérés comme les plus sûrs, dans un point où le mélange de grisou et d'air soit inflammable. Le choix de ces explosifs doit être considéré comme diminuant considérablement le danger de l'explosion; il ne doit pas être considéré comme le supprimant absolument.

5° Il faut toujours employer les explosifs dans les conditions qui leur permettent de développer le maximum de travail utile. L'économie et la sécurité sont d'accord pour recommander cette règle.

Il faut, en conséquence, bourrer avec soin l'explosif au fond du trou de mine, qui doit être assez profond; il faut éviter de laisser un espace vide soit en avant, soit en arrière de la cartouche, soit latéralement; il faut éviter de mettre en contact l'explosif et la mèche Bickford, si la détonation de l'amorce est provoquée par cet intermédiaire, dont le danger est d'ailleurs assez sérieux pour qu'il soit désirable de le voir remplacer par un mode d'allumage plus sûr.

La Commission n'avait pas à s'occuper de questions administratives. On voit cependant que les conclusions qui précèdent tendent à l'abandon dans les mines à grisou de la poudre de mine, et même à la mise en suspi-

cion de la dynamite ordinaire, de la dynamite-gomme et de la dynamite à l'ammoniaque, telle qu'elle est actuellement fabriquée; la dynamite-gomme paraissant être la plus dangereuse de toutes ces substances.

Les explosifs qui paraissent les plus recommandables au point de vue de la sécurité sont des mélanges binaires d'un explosif tel que la dynamite, le coton-poudre, la binitro-benzine avec l'azotate d'ammoniaque. Le mode de fabrication de ces mélanges, la manière dont on pourra les soustraire à l'influence de l'humidité atmosphérique, la durée plus ou moins grande de leur résistance à cette influence devront être expérimentés. Il faudra aussi soumettre à des essais pratiques l'effet utile de ces mélanges, la manière dont ils se comporteront dans l'abatage des roches et particulièrement de la houille. L'étude de ces questions nécessitera des recherches dont la plupart ne pourront se faire que sur les mines mêmes et par les soins des ingénieurs qui les dirigent.

La Commission émet le vœu que l'Administration des Poudres fasse fabriquer un certain nombre de cartouches de ces divers mélanges explosifs, pour être distribuées aux ingénieurs qui voudront bien se charger de les essayer au point de vue pratique.

Ces essais terminés, il restera la question de la fabrication en grand. Pour quelques-uns des mélanges qui paraissent présenter d'assez grandes garanties de sécurité, ceux de coton-poudre et d'azotate d'ammoniaque, par exemple, l'Administration des Poudres a le monopole de leur fabrication.

L'industrie des mines n'aurait d'ailleurs qu'à gagner à ce qu'il s'établît une sérieuse concurrence dans la fabrication des explosifs, maintenant à peu près monopolisée de fait. Cet avantage sera plus grand encore lorsqu'il s'agira de mélanges dont le degré de sécurité dépendra du dosage, exact et difficile à contrôler, des matières mélangées.

La Commission émet donc le vœu que l'Administration des Poudres se mette en mesure de fournir à l'industrie les mélanges à base de coton-poudre reconnus avantageux au point de vue de la sécurité des mines à grisou.

Le 5 juillet 1888.

Le Président de la Sous-Commission, Rapporteur,

Er. MALLARD.

Adopté par la Commission dans sa séance du 5 juillet 1888.

Le Secrétaire, P. VIEILLE.

Le Président, BERTHELOT.

TABLEAU RÉSUMÉ

DES EXPÉRIENCES FAITES A LA POUDRERIE DE SEVRAN-LIVRY DE NOVEMBRE 1887 A JUIN 1888.

NOTA. — I marque qu'il y a eu inflammation du mélange gazeux par la détonation de l'explosif.
N marque qu'il n'y a pas eu inflammation du mélange gazeux.
Dans l'indication des dates, 18 XI, 1 veut dire 18 novembre, avec expérience faite dans le *premier* mélange gazeux qui ait été préparé ce jour-là.

I. — Amorces.

DATES	POIDS du fulminate	TENEUR du gaz en formène	RÉSULTAT de l'expérience	OBSERVATIONS
		1° *Amorces fulminantes* NON RENFORCÉES.		
	grammes	p. 100		
18 XI, 1	1,50	8,7	I	
23 XI, 1	id.	id.	I	
30 XI, 2	id.	8,5	I	
9 XII, 3	id.	8,7	I	
24 IV, 1	id.	10,3	I	
2 V, 2	id.	id.	I	
11 V, 1	id.	id.	I	
		2° *Amorces fulminantes* NON RENFORCÉES *frettées par l'enroulement extérieur d'un fil de cuivre.*		
2 V, 2	1,50	1,03	N	
11 V, 1	id.	id.	N	
		3° *Amorces fulminantes* RENFORCÉES.		
23 XI,2	0,25	8,7	N	
id.	0,50	id.	N	
id.	1,00	id.	N	
id.	1,25	id.	N	
29 XI, 1	1,50	8,5	N	
id.	id.	9,6	N	
17 III, 1	id.	10,3	N	
11 V, 1	id.	id.	N	
13 XI, 2	2,00	id.	N	
15 XI, 2	1,50 + 2 × 1ᵍ	0,7	N	Une amorce de 1ᵍ,5 dans une de 2 grammes.
10	3 × 1,50	10,3	N	Trois amorces de 1ᵍ,5.
16 V, 2	5,0	id.	I	
30 V, 2	id.	id.	I	
		4° *Amorces de Paulilles.*		
24 IV, 1	?	10,3	N	
id.	?	10,3	N	
		5° *Amorces Abegg.*		
9 XII, 3	?	8,7	N	
10 III, 3	?	10,3	N	

DATES	POIDS du fulminate	TENEUR du gaz en formène	RÉSULTAT de l'expérience	OBSERVATIONS
		6° *Amorce Ruggieri et Scola.*		
	grammes	p. 100		
V, 1	»	10,3	I	
		7° *Mèche Bickford.*		
IV, 2	»	10,3	N	Mèche de 0ᵐ,60 de longueur, brûlant dans le gaz, allumée à l'extérieur, portant à son extrémité une amorce de 1ᵍ,50.
IV, 1	»	id.	N	Mèche allumée extérieurem^t, ayant à son extrémité une amorce Paulilles.
V, 2	»	id.	N	Mèche plongeant dans une cartouche de fulmicoton enfermée dans un tube.
V, 1	»	id.	N	Mèche plongeant dans une cartouche de fulmicoton enfermée dans un tube.
id.	»	id.	N	Id.
V, 1	»	id.	N	Mèche plongeant dans dynam. enfermée dans un tube.

II. — Cartouches nues.

DATES	POIDS de l'explosif	NATURE de l'amorce	TENEUR de gaz en formène	RÉSULTAT de l'expérience	OBSERVATIONS
		A. — EXPLOSIFS DÉJA CONNUS.			
		1° *Dynamite n° 1 de Vonges (à 75 p. 100 de nitroglycérine).*			
	gr.		p. 100		
26 XII, 3	50	1 am. de 1ᵍ,50	7,00	I	Cartouche enveloppée de papier.
15 II, 1	id.	id.	id.	I	Id.
5 XII, 2	id.	id.	8,5	I	Id.
9 III, 2	id.	id.	8,7	I	Id.
26 III, 2	id.	id.	id.	I	Id.
11 II, 1	id.	id.	10,3	I	Id.
15 III, 2	id.	id.	id.	I	Cartouche dans tube en plomb de 27/40, fermé à une extrémité, ouvert à l'autre.
10 III, 3	id.	id.	id.	I	Cartouche enveloppée latéralement d'argile, nue aux extrémités.
17 III, 1	id.	id.	id.	I	Cartouche dans tube en plomb de 27/40. — Extrémités fermées par de légères bourres d'argile de 0,01 à 0,002.
		2° *Dynamite n° 0 de Paulilles.*			
9 II, 3	50	1 am. de 1ᵍ,50	6,1	I	
		3° *Dynamite-gomme de Paulilles.*			
5 XII, 1	50	1 am. de 1ᵍ,50	8,5	N	Détonation très douteuse.
II, 1	id.	id.	8,7	N	Id.

DATES	POIDS de l'explosif	NATURE de l'amorce	TENEUR de gaz en formène	RÉSULTAT de l'expérience	OBSERVATIONS
		3° *Dynamite-gomme de Paulilles* (suite).			
	gr.		p. 100		
26 XII, 1	50	1 am. de 1g,50	8,7	N	Détonation très douteuse.
10 II, 1	id.	id.	id.	N	Id.
18 II, 1	id.	id.	id.	N	Id. Pression développée dans la chaudière = d'eau.
12 XII, 1	id.	id.	12,4	N	Id.
12 XII, 2	id.	id.	11,1	N	Id.
15 III, 1	id.	2 am. de 2g,50	7,0	I	Cartouche dans tube en plomb de 27/40 ouvert aux bouts.
12 XII, 3	id.	1 am. de 1g,50	10,3	I	Cartouche nue.
		4° *Dynamite-gélatine de Paulilles.*			
9 XII, 3	50	1 am. de 1g,50	8,7	N	Détonation très douteuse.
28 XII, 1	id.	id.	9,6	N	Id.
12 XII, 4	id.	id.	10,3	N	Id.
12 XII, 2	id.	id.	11,1	N	Id.
12 XII, 1	id.	id.	12,4	N	Id.
13 II, 3	id.	1 am. de 2g	8,7	N	Id.
15 II, 1	id.	3 am. de 1g,50	7,0	N	Id.
15 II, 2	id.	id.	8,7	N	Id. Pression développée = 0m,01 d'eau.
13 II, 2	id.	1 am. de 2g	10,3	I	
		5° *Dynamite à l'ammoniaque de Paulilles.*			
9 II, 3	50gr	1 am. de 1g,50	6,1	N	
9 II, 2	id.	id.	8,7	I	
9 II, 1	id.	id.	10,3	I	
		6° *Fulmicoton de guerre, en cartouches prismatiques de 28 gr. dans des étuis en laiton mince.*			
28 XII, 1	28gr	1 am. de 1g,50	7,0	N	
5 XII, 2	id.	id.	8,5	N	
5 XII, 1	id.	id.	8,5	I	
		7° *Fulmicoton de mine. Cartouches enveloppées de papier.*			
23 XII, 2	30	1 am. de 1g,50	6,1	I	
23 XII, 1	id.	id.	7,0	I	
9 XII, 1	id.	id.	8,7	I	
2 XII, 2	id.	id.	id.	I	
2 XII, 1	id.	id.	id.	I	
30 XI, 1	28	id.	9,6	I	
29 XI, 2	id.	id.	id.	I	
12 XII, 2	30	id.	11,1	I	
12 XII, 1	id.	id.	12,4	I	
11 V, 2	id.	id.	10,3	I	

DATES	POIDS de l'explosif	NATURE de l'amorce	TENEUR de gaz en formène	RÉSULTAT de l'expérience	OBSERVATIONS
		8° *Fulmicoton titrant 173 cent. cubes de bioxyde d'azote.*			
	gr.		p. 100		
1 VI, 4	30	2 am. de 1g,50	10,3	I	
		9° *Poudre pyroxylée du Moulin-Blanc. En cartouches rectangulaires de 50 grammes, fortement comprimées.*			
11 V, 2	50	1 am. de 1g,50	10,3	N	Dans un étui en laiton mince.
id.	id.	id.	id.	N	Cartouche nue.
id.	id.	id.	id.	N	Id.
11 V, 2	id.	id.	id.	N	Id.
23 V, 1	id.	id.	id.	N	Id.
id.	id.	id.	id.	N	Id.
23 V, 2	id.	id.	id.	N	Id.
1 VI, 1	id.	id.	id.	N	Id.
1 VI, 3	id.	id.	id.	N	Id.
1 VI, 3	id.	id.	id.	N	Id.
1 VI, 5	id.	id.	id.	N	Id.
1 VI, 2	id.	id.	id.	N	Id.
19 V, 3	id.	id.	id.	I	Cartouche nue. Tempér. du gaz de la chaudière = 40°. Temps lourd.
10 V, 4	id.	id.	id.	I	Id. id.
		10° *Fulmicoton à l'azotate de baryte.*			
9 V, 1	30	1 am. de 1g,50	10,3	I	Cartouche nue.
		11° *Fulmicoton de* WETTEREN, *à l'azotate de baryte.*			
9 V, 2	?	1 am. de 1g,50	10,3	I	
		12° *Explosif Favier.*			
10 III, 1	40	2 am. de 1g,50	10,3	N	Cartouche fabriquée à Sevran avec le mélange indiqué par M. Favier. Détonation très douteuse.
10 III, 2	id.	3 am. de 1g,50	id.	I	Id. id.
		13° *Helloffite.*			
15 III, 2	?	1 am. de 1g,50	»	»	La cartouche ne détone pas.
		14° *Bellite.*			
10 II, 1	50	1 am. de 1g,50	8,7	N	Détonation très douteuse.
15 II, 2	id.	id.	id.	N	Id. Pression développée = 0,035 d'eau.
30 V, 1	id.	id.	10,3	N	Id.
1 VI, 3	id.	id.	id.	N	Détonation très douteuse. Explosif chauffé à 40°.
4 VI, 4	id.	2 am. de 1g,50	id.	N	Pression développée = 0,24 d'eau. Température du gaz de la chaudière = 35°.
id.	id.	id.	id.	N	Pression développée = 0,30 d'eau. Température du gaz de la chaudière = 35°.

DATES	POIDS de la matière ajoutée à la dynamite sur 100 de mélange	POIDS de l'explosif	NATURE de l'amorce	TENEUR de gaz en formène	RÉSULTAT de l'expérience	OBSERVATIONS
			B. — MÉLANGES DIVERS.			
			a. — **Mélanges à base de dynamite.**			
			1° *Mélanges avec carbonate de soude cristallisé.*			
		gr.		p. 100		
27 III, 1	Vol. égaux	25	1 am. de 1g,50	10,3	N	Dans étui en laiton.
Id.	50 carb.	100	id.	id.	N	Id.
			2° *Mélanges avec sulfate de soude à 10 équivalents d'eau.*			
17 III, 2	50 p. sulfate	45	1,50	10,3	N	Dans étui en laiton.
17 IV, 1	33 sulfate	id.	id.	id.	I	
			3° *Mélanges de dynamite et d'alun d'ammoniaque.*			
24 IV, 1	50 alun	100	1 am. de 1g,50	10,3	N	Dans étui en fer-blanc mince.
11 V, 3	id.	id.	id.	id.	N	Dans étui en laiton.
24 IV, 1	33 alun	id.	id.	id.	N	Id.
1 VI, 4	id.	id.	id.	id.	N	Id.
4 VI, 1	id.	id.	id.	id.	I	
28 VI, 1	25 alun	id.	id.	id.	I	Id.
			4° *Mélanges avec le chlorhydrate d'ammoniaque.*			
20 IV, 1	50 chlor.	100	1 am. de 1g,50	10,3	N	Dans étui en laiton.
24 IV, 1	id.	id.	id.	id.	N	Dans étui en fer-blanc.
11 V, 2	id.	id.	id.	id.	N	Dans étui en laiton.
1 VI, 4	40 chlor.	id.	id.	id.	N	Id.
1 VI, 5	id.	id.	id.	id.	N	Id. Pression développée = 0m,50 d'eau.
4 VI, 2	id.	id.	id.	id.	I	Id.
1 VI, 1	33 chlor.	id.	id.	id.	I	Id.
			5° *Mélanges avec la poussière de combustibles minéraux.*			
20 IV, 3	50 pouss.	90	1 am. de 1g,50	10,3	N	Dans étui en laiton. Poussière de houille de Blanzy.
11 V, 2	id.	id.	id.	id.	N	Id.
30 V, 2	id.	id.	id.	id.	N	Dans étui en laiton. Poussière de houille de Drocourt (Pas-de-Calais).
30 V, 2	id.	id.	id.	id.	N	Dans étui en laiton. Poussière de houille de Dourges (Pas-de-Calais).
20 IV, 3	33 pouss.	id.	id.	id.	N	Dans étui en laiton. Poussière de houille de Blanzy.

DATES	POIDS de la matière ajoutée à l'explosif sur 100 de mélange	POIDS de l'explosif	NATURE de l'amorce	TENEUR de gaz en formène	RÉSULTAT de l'expérience	OBSERVATIONS
			5° *Mélanges avec la poussière de combustibles minéraux* (suite).			
		gr.		p. 100		
11 V, 3	25 pouss.	30	1 am. de 1g,50	10,3	N	Dans étui en lait. Pouss. de houille de Blanzy.
30 V, 1	50 pouss.	100	id.	id.	I	Dans étui en laiton. Poussière de lignite brun (Braunkohle).
			6° *Mélanges avec l'azotate d'ammoniaque.*			
4 VI, 2	80 azot.	100	1 am. de 1g,50	10,3	N	Dans étui en laiton.
4 VI, 2	id.	id.	id.	id.	N	Id.
			b. — **Mélanges à base de fulmicoton.**			
			1° *Mélanges avec le chlorhydrate d'ammoniaque, du coton-poudre de mine.*			
30 V, 2	25 chlorh.	50	1 am. de 1g,50	10,3	I	Sous-enveloppe. Température des gaz de la chaudière = 40°. Temps orageux.
30 V, 1	20 chlorh.	62,5	id.	id.	N	Id.
30 V, 2	12,5 chlorh.	50	id.	id.	I	Id.
			2° *Mélanges avec l'azotate d'ammoniaque.*			
			α. — Coton-poudre de guerre titrant 205 cent. cubes de bioxyde d'azote.			
4 VI, 2	70 azotate	50	1 am. de 1g,50	10,3	N	
id.	id.	id.	id.	id.	I	
4 VI, 5	id.	id.	id.	id.	I	
4 VI, 3	80 azotate	id.	id.	id.	N	
4 VI, 3	id.	id	id.	id.	I	
			β. — Coton-poudre de mine titrant 193cc de biox. d'azote (Cart. probablement humides.)			
30 V, 4	50 azotate	50	1 am. de 1g,50	10,3	N	Détonation douteuse. Température des gaz de la chaudière = 40°.
id.	id.	id.	id.	id.	I	Id.
30 V, 1	id.	id.	id.	id.	N	Détonation douteuse.
30 V, 1	id.	id.	id.	id.	N	Id.
30 V, 2	id.	id.	2 am. de 1g,50	id.	N	Id.
30 V, 2	id.	id.	3 am. de 1g,50	id.	N	Id.
			γ. — Coton-poudre titrant 173 cent. cubes de bioxyde d'azote.			
4 VI, 3	65 azotate	50	1 am. de 1g,50	10,3	I	
4 VI, 2	80 azotate	id.	id.	id.	N	Press. dével. dans la chaudière = 0,10 d'eau.
id.	id.	id.	id.	id.	N	Id. = 0,20 d'eau.
id.	id.	id.	id.	id.	N	Id. = 0,20 d'eau.
id.	id.	id.	id.	id.	N	Id. = 0,20 d'eau.
28 VI, 1	id.	id.	id.	id.	N	Id. = 0,20 d'eau.
id.	id.	id.	id.	id.	N	Id. = 0,20 d'eau.
id.	id.	id.	id.	id.	N	Id. = 0,20 d'eau.

III. Cartouches enveloppées.

Les cartouches sont en général enfermées dans des tubes fermés à une extrémité.

L'explosif repose sur un tampon en argile de $0^m,5$ à $0^m,6$. — Il est bourré par une bourre d[e] de $0^m,10$ à $0^m,12$.

La teneur du gaz en formène est 10,3.

DATES	NATURE de l'explosif	POIDS de l'explosif	NATURE de l'amorce	RÉSULTAT de l'expérience	NATURE du tube	DIAMÈTRE int. et ext. du tube en millim.	OBSERVATIONS
		gr.					
22 II, 1	Dyn. n° 1 de Vonges à 75 % de nitrogl.	50	1 am. de 1g,50	N	»	»	Cart. enveloppée d'[illegible]
13 III, 3	id.	id.	Cordeau déton.	I	»	»	Id.
17 III, 2	id.	id.	1 am. de 1g,50	I	»	»	Id.
2 V, 1	id.	id.	id.	N	Étain	25-40	
11 V, 2	id.	id.	id.	N	id.	id.	
12 II, 1	id.	id.	id.	N	id.	id.	
12 IV, 1	id.	id.	id.	N	id.	id.	
15 III, 3	id.	id.	Cordeau déton.	N	Plomb	27-40	
17 III, 2	id.	id.	1 am. de 1g,50	N	id.	id.	
27 III, 1	id.	id.	id.	N	id.	id	
Id.	id.	id.	id.	N	id.	id.	
28 III, 1	id.	id.	id.	N	id.	32-42	
17 IV, 2	id.	id.	id.	I	id.	30-40	
2 V, 1	id.	id.	id.	I	id.	30-35	
6 IV, 1	id.	id.	id.	I	Verre épais	»	
17 IV, 2	Dynamite à 45 %	40	id.	N	Étain	25-40	
1 V, 2	Dynamite-gomme de Paulilles	50	id.	I	id.	id.	
17 III, 3	id.	id.	id.	I	Plomb	27-40	
15 III, 2	Dynamite-gélatine de Paulilles	id.	id.	N	id.	id.	
15 III, 3	id.	id.	id.	N	id.	id.	
20 IV, 2	Dynamite à l'amm. de Paulilles	id.	id.	N	Étain	25-40	
20 IV, 3	id.	id.	id.	N	»	»	
20 IV, 1	Dynamite n° 2 de Paulilles	id.	id.	N	Étain	25-45	
12 IV, 2	Dynamite n° 3 de Paulilles	id.	id.	N	id.	id.	
2 V, 2	Cot.-poud. de mine	60	id.	N	Plomb	32-42	

[illegible]	NATURE de l'explosif	POIDS de l'explosif	NATURE de l'amorce	RÉSULTAT de l'expérience	NATURE du tube	DIAMÈTRE int. et ext. du tube en millim.	OBSERVATIONS
		gr.					
V, 2	Cot.-poud. de mine	50	1 am. de 1g,50	N	Plomb	30-35	
V, 2	id.	30	id.	N	id.	id.	
V, 2	id.	id.	id.	N	id.	id.	
III, 1	id.	id.	id.	N	Cartouche dans un trou percé dans un bloc de bois.		
V, 1	Bellite.	50	id.	N	Plomb	30-35	Pression = 0,40 environ.
IV, 2	Explosif Favier.	60	id.	N	Plomb	27-40	Détonation très douteuse.
IV, 2	id.	id.	id.	N	Étain	25-40	Id.
V, 3	id.	id.	id.	N	id.	id.	Id.
VII, 1	id.	id.	1 am. de 2g	N	Plomb	30-40	Id.
VII, 1	id.	id.	1 am. de 5g	N	Id.	id.	Id. Pression développée = 0,12 d'eau environ.
V, 2	Coton-poudre paraffiné à 10 p. 100.	35	1 am. de 1g,50	N	Étain	25-40	Pression = 0,20 environ.
V, 1	Coton poudre à l'azotate de baryte du Moulin-Blanc.	30	id.	N	Plomb	30-35	

Expériences sur l'influence de la densité de chargement.

[illegible]							
VIII, 1	Dyn. n° 1 de Vonges	50	1 am. de 1g,50	N	Plomb	27-40	
VIII, 1	id.	30	id.	I	id.	id.	Dyn. dans éprouv. en verre.
III, 3	id.	id.	id.	I	id.	id.	Id.
III, 3	id.	id.	id.	I	id.	id.	Id.
V, 2	id.	id.	id.	N	Étain	25-40	Id.
V, 3	id.	id.	id.	N	id.	id.	Id.
V, 1	id.	50	id.	I	Plomb	32-42	Dynamite *non tassée.*
IV, 1	id.	id.	id.	N	id.	id.	Dynamite *tassée.*
III, 2	id.	30	id.	I	id.	30-40	Tube *rond.*
III, 2	id.	id.	id.	N	id.	id.	Tube *aplati.*

Expériences sur L'ALLUMAGE DES EXPLOSIFS PAR LA MÈCHE.

[illegible]							
III, 2	Dyn. n° 1 de Vonges	50	Fil métall. porté au rouge par l'électricité.	N	Plomb	27-40	*Allumage par fil incandescent.*
III, 2	id.	id.	id.	N	id.	id.	Id.
V, 2	id.	id.	Mèche Bickford plongeant dans cartouche.	N	Étain	25-40	
III, 2	id.	id.	Mèche Bickford enfoncée dans cartouche. Portant 1 amorce de 1g,50 à son extr.	I	id.	id.	

DATES	NATURE de l'explosif	POIDS de l'explosif	NATURE de l'amorce	RÉSULTAT de l'expérience	NATURE du tube	DIAMÈTRE int. et ext. du tube en millim.	OBSERVATIONS
Expériences sur L'ALLUMAGE DES EXPLOSIFS PAR LA MÈCHE (suite).							
		gr.					
3 V, 2	Cot.-poud. de mine	15	Mèche Bickford.	I	Fulmicoton placé sur la mèche, sans enve		
3 V, 2	id.	50	id.	N	Étain	25-40	
3 V, 2	id.	id.	id.	N	id.	id.	
2 V, 2	id.	id.	id.	N	id.	id.	
2 V, 2	id.	60	Mèche B. plongeant dans cartouche et portant à son extrémité 1 am. de 1^{g},50.	N	id.	id.	
4 [V,]	id.	Du coton placé à l'air libre, au fond d'un tube de plomb, et allumé par mèche Bickford, brûle sans émettre de flamme.					
id.	id.	Dans la même expérience, le coton brûle avec flamme					

IV. — Expériences sur les cartouches SETTLE.

Les cartouches explosives sont placées au milieu d'un tube en papier imperméable rempli d'eau (cartouches Settle)

15 III, 3	Poudre de mine (mine ronde).	24	1 am. de 1^{g},50	I	
9 XII, 2	Dyn. n° 1 de Vonges	50	id.	N	
27 VI, 1	id.	id.	id.	I	

V. — Expériences sur les poussières de houille.

14 IV, 3	Dyn. n° 1 de Vonges	50	1 am. de 1^{g},50	N	Cartouche dans tube. Étain 25/40. — Bourre 0,13 de *Poussière de houille de Blanzy.*
17 IV, 1	id.	id.	id.	N	Id. Id.
1 VI, 5	Poudre pyroxylée	id.	id.	N	Cartouche placée dans cartouche *Settle,* re plie de *poussière de houille de Blanzy.*
24 IV	Dyn. n° 1 de Vonges	Une cartouche de 100^{gr} de dynamite n° 1, enveloppée de poussière houille, *détonant à l'air libre,* sous l'influence d'une amorce de 1^{g} *n'allume pas* la poussière.			
id.	id	Une cartouche de 100^{gr} de dynamite n° 1, enveloppée de poussière houille, *et enflammée à l'air libre* par mèche Bickford, *allume* la poussi			
24 IV	id.	Une cartouche de 50 gr. placée dans une cartouche Settle remplie de pou sière de houille, et détonant sous l'influence d'une amorce de 1^{g},50 donné exactement la même pression en centimètres d'eau que la cart che de dynamite nue de même poids.			

EXPÉRIENCES DE DÉTONATION DANS LA CHAUDIÈRE CLOSE.

DATES de l'expérience	NATURE de l'explosif	MODE D'EMPLOI de l'explosif	POIDS de l'explosif	NATURE de l'amorce	PRESSION initiale développée par la détonation. En centim. d'eau
			gr.		
28 IV	Dynam. n° 1 de Vonges.	Cartouche nue.	50	1 am. de 1^{g},5	83
id.	id.	Bourrée dans tube Sn 25/40.	id.	id.	52,5
id.	id.	id. Pb 32/42.	id.	id.	46
8 VI	id.	id. Pb 30/35.	id.	id.	56,5
28 IV	id.	Versée dans tube de verre mince de 14^{mm} diam. extér.	26	id.	42
id.	id.	Tube de verre mince bourré dans tube Sn 25/40.	id.	id.	33
25 V	Dyn.-gom. de Paulilles.	Nue.	40	id.	56
		id.	50	id.	69
		id.	id.	id.	70
		Dans tube Sn 25/40.	id.	id.	62
id.	Coton de guerre.	Nue.	id.	id.	72
id.	id.	id.	id.	id.	72
id.	Coton de mine.	Nue.	id.	id.	»
id.	id.	id.	id.	id.	148 ?
4 VI	Bellite.	Nue.	id.	2 am. de 1^{g},5	25
8 VI	id.	id.	id.	id.	34
id.	id.	id.	id.	1 am. de 1^{g},5	28
id.	id.	Dans tube Sn 25/40.	id.	2 am. de 1^{g},5	51
4 VI	id.	Dans tube Pb 30/35.	id.	1 am. de 1^{g},5	47
9 V	Poudre pyroxylée.	Nue.	65	id.	61
25 V	id.	id.	50	id.	52
id.	id.	id.	id.	id.	44,5
8 VI	id.	id.	id.	id.	60
id.	id.	Dans tube Sn 25/40.	id.	id.	47
26 V	Coton à l'az. de baryte.	Nue.	id.	id.	70
8 VI	Coton à l'az. de soude. Parties égales.	id.	id.	id.	52
id.	30 coton de guerre. 70 azotate ammon.	id.	id.	id	46
18 VI	90 coton à 173 c. c. 10 azotate ammon.	Nue.	30	id.	94
		Dans tube Sn 25/40.	id.	id.	23

DATES de l'expérience	NATURE de l'explosif	MODE D'EMPLOI de l'explosif	POIDS de l'explosif	NATURE de l'amorce	PRESSION développée par la détonation en centièmes d'eau
			gr.		
23 VI	80 coton à 173 c. c. 20 azotate ammon.	Nue. Dans tube Sn 25/40.	30 id.	1 am. de 1g,5 id.	63 28
id.	60 coton à 173 c. c. 40 azotate ammon.	Nue. Dans tube Sn 25/40.	id. id.	id. id.	35 30
id.	35 coton à 173 c. c. 65 azotate ammon.	Nue.	50	id.	43
9 VI	25 coton à 173 c. c. 75 azotate ammon.	id.	id.	2 am. de 1g,5	41
9 VI	67 dynamite. 33 chlorhydr. d'amm.	Nue. Dans tube Sn 25/40.	50 id.	1 am. de 1g,5 id.	53 42
id.	60 dynamite. 40 chlorhydr. d'amm.	Nue. Dans tube Sn 25/40.	id. id.	id. id.	44 37
id.	50 dynamite. 50 chlorhydr. d'amm.	Nue. Dans tube Sn 25/40.	id. id.	id. id.	42 37
9 VI	67 dynamite. 33 alun d'ammon.	Nue. Dans tube Sn 25/40.	50 id.	1 am. de 1g,5 id.	44,5 38
18 V	20 dynamite. 80 azotate ammon	Nue. Dans tube Sn 25/40.	50 id.	1 am. de 1g,5 id.	24 28

NOTE A.

NOTE THÉORIQUE SUR LE CALCUL DES TEMPÉRATURES DE DÉTONATION ET LA FORCE DES EXPLOSIFS.

Par MM. MALLARD et LE CHATELIER.

Calcul théorique de la température de détonation. — Si C est la chaleur spécifique à volume constant, moyenne entre 0° et $t°$, des produits gazeux de détonation d'un certain poids d'un explosif; si Q est la chaleur de décomposition correspondant à ce poids et au mode de décomposition réalisé dans la détonation, la température t est donnée par la formule

$$(1) \qquad Ct = Q.$$

Le chaleur spécifique C n'est pas constante avec la température comme l'ont démontré les expériences de MM. Berthelot et Vieille (*) et les nôtres (**).

Si l'on admet que la valeur de C, à toute température, est représentée par une expression linéaire

$$(2) \qquad C = a + bt,$$

l'équation précédente devient

$$at + bt^2 = Q.$$

Pour connaître t, il faut connaître a, b et Q, ce qui suppose connue la loi de la décomposition. Cette hypothèse étant réalisée, les nombreuses recherches de MM. Berthelot, Sarrau et Vieille font connaître Q. Quant à a et b, la décomposition des explosifs donnant, en général, naissance à des gaz condensés tels que CO^2 et H^2O et à des gaz non condensés, dits *parfaits*, tels que CO, ClH, et les gaz simples, on peut les déduire des expériences que nous avons données dans le mémoire déjà cité pour

(*) *C. R.*, t. XCVIII (1884).
(**) *C. R.*, t. XCII (1882), et *Ann. des mines*, 8e s., t. IV (1883).

les chaleurs spécifiques moléculaires de ces gaz, à volume constant, et moyennes entre 0° et t°. Ces expressions sont, en petites calories (gramme-degré)

Pour. . . . . CO^2(*) $c = 6{,}26 + 0{,}0037\,t$,
Pour. . . . . H^2O $c = 5{,}61 + 0{,}0033\,t$,
Pour les gaz parfaits $c = 4{,}80 + 0{,}0006\,t$.

S' le poids équivalent de l'explosif se décompose suivant la formule

$$\alpha\,CO^2 + \gamma\,H^2O + \lambda\,P,$$

P représentant une molécule d'un gaz parfait, les coefficients a et b de l'équation (2) seront respectivement

$$a = 6{,}26\,\alpha + 5{,}61\,\beta + 4{,}8\,\lambda,$$
$$b = 0{,}0037\,\alpha + 0{,}0033\,\beta + 0{,}0006\,\lambda;$$

et si Q est la chaleur de décomposition du poids ϖ, la température t sera donnée par l'expression

$$(3) \qquad t = \frac{-a + \sqrt{a^2 + 4b\,Q}}{2b}.$$

Formule de Clausius. — Covolumes. — Clausius a lié la pression P, le volume V, la température absolue T, d'un gaz qui occupe le volume v_0 sous la pression p_0, à la température absolue 273, par la relation

$$\left[\frac{P}{p_0} + \frac{c}{T\left(\frac{V}{v_0} + \beta\right)^2}\right]\left(\frac{V}{v_0} - u\right) = \frac{T}{273},$$

qui, avec les températures et les pressions très élevées que nous considérons, peut se réduire très sensiblement, pourvu que $\frac{V}{v_0}$ ne soit pas trop petit, à

$$(1) \qquad \frac{P}{p_0}\left(\frac{V}{v_0} - u\right) = \frac{T}{273}.$$

Le covolume est donné, pour un très petit nombre de gaz, par les déductions mathématiques qu'a tirées M. Sarrau des expériences de M. Amagat (*). Il a obtenu les valeurs suivantes :

Hydrogène	0,000887
Azote	0,001359
Oxygène	0,000890
Acide carbonique	0,000866
Formène	0,001091
Éthylène	0,000967

Il est remarquable que, pour des gaz aussi différents, par toutes leurs propriétés, que l'hydrogène et l'acide carbonique par exemple, les valeurs de u sont extrêmement voisines. On est ainsi naturellement porté à croire, comme le remarque M. Bouty (**), que les covolumes de tous les gaz sont identiques. Le coefficient u est, en effet, assez difficile à calculer, en partant des nombres expérimentaux. Ce qui le prouve le mieux, c'est que M. Sarrau, en partant des expériences de M. Amagat, a trouvé pour l'acide carbonique $u = 0{,}000866$, et, plus tard, lorsqu'il a voulu tenir compte des expériences de Regnault sur la vapeur saturée, de MM. Cailletet et Hautefeuille sur la densité de l'acide carbonique liquide, il a admis $u = 0{,}00115$ (***), qui se rapproche, mais en sens contraire, de la moyenne 0,00101 des six valeurs de u tirées, pour différents gaz, des expériences de M. Amagat.

On ne s'écartera sans doute pas beaucoup de la vérité en admettant que, pour tous les gaz, u a la même valeur; et en prenant cette valeur égale à 0,001. C'est la supposition faite dans les calculs qui suivent.

Calcul de la force explosive. — On déduit de (1)

$$(2) \qquad P(V - uv_0) = \frac{1{,}033\,v_0\,T}{273},$$

P étant exprimé en kilogrammes par m^2.

Si le gaz considéré possède le poids ϖ, sa densité Δ sera $\Delta = \frac{\varpi}{V}$, ce qui donne

$$V = \frac{\varpi}{\Delta}.$$

Dans les expériences sur les pressions développées par les explosifs, Δ est ce qu'on appelle la densité de chargement.

(*) Nous avons proposé pour la chaleur spécifique de l'acide carbonique différentes expressions donnant toutes la même valeur à 2000°. Nous accordons ici la préférence à l'expression linéaire qui conduit à des calculs plus simples.

(*) *C. R.*, t. XCIV, p. 639, 718, 845 (1882).
(**) Jamin et Bouty, *Cours de physique*, Complément, p. 103.
(***) *C. R.*, t. CI, p. 1145 (1885).

Introduisant cette expression de V dans (2), il vient

$$P\left(\frac{\varpi}{\Delta} - uv_0\right) = \frac{1{,}033\, v_0 T}{273},$$

ou

$$P = \frac{\dfrac{1{,}033\, v_0 T}{273\,\varpi}\Delta}{1 - \dfrac{uv_0}{\varpi}\Delta};$$

ou enfin

$$P = \frac{f\Delta}{1 - \alpha\Delta}, \tag{3}$$

en posant

$$f = \frac{1{,}033\, v_0 T}{273\,\varpi}, \tag{4}$$

$$\alpha = \frac{uv_0}{\varpi}. \tag{5}$$

Les deux coefficients f et α sont caractéristiques de chaque explosif; on peut, pour simplifier le langage, donner à f le nom de *force explosive* de l'explosif; α sera son *covolume*.

Mode de décomposition d'un explosif. — Le mode de décomposition d'un explosif, sous l'influence de la détonation, n'est en général connu avec certitude que lorsque cet explosif contient assez d'oxygène pour brûler complètement les éléments combustibles C, H, qui entrent dans sa composition. On peut citer comme rentrant dans ce cas, la Nitroglycérine $C^6H^{10}Az^6O^{18}$, la Nitromannite $C^6H^8Az^6O^{18}$, l'Azotate d'ammoniaque $Az^2O^3H^4$ et certains mélanges formés avec deux substances dont l'excès d'oxygène de l'une suffit à brûler complètement le carbone et l'hydrogène de la seconde; je citerai le mélange de Fulmicoton endécanitrique et d'Azotate d'ammoniaque $C^{24}H^{29}Az^{11}O^{42} + 20{,}5\,Az^2O^3H^4$. Il suffit d'admettre alors que l'explosion produit la décomposition complète des deux substances, et la réaction ultérieure qui conduit à la combustion complète de l'explosif binaire. Ces suppositions se vérifient en général, au moins en vase clos.

Lorsque l'explosif ne contient point assez d'oxygène pour sa combustion complète, mais qu'il en contient plus que la quantité nécessaire pour la combustion de C à l'état de CO, on peut admettre qu'après la détonation il ne se forme que des composés oxygénés, que le carbone brûle complètement pour CO, et qu'il se fait une certaine répartition de l'oxygène restant entre CO et H.

Nous allons d'abord étudier les conséquences auxquelles conduirait cette hypothèse.

Si l'explosif est représenté par la formule

$$C^p H^{2q} O^r Az^{2s},$$

la loi de décomposition sera exprimée d'une manière générale par

$$\alpha CO^2 + \beta CO + \gamma H^2O + \delta H^2 + s\,Az^2.$$

On pose immédiatement les équations :

$$\alpha + \beta = p,$$
$$\gamma + \delta = q,$$
$$2\alpha + \beta + \gamma = r;$$

qui conduisent aisément à :

$$\alpha = r - p - q + \delta,$$
$$\beta = 2p + q - r - \delta,$$
$$\gamma = q - \delta;$$

d'où l'on conclut :

1° Que le volume des gaz formés à 0° est constant, quel que soit le mode de décomposition, et égal à

$$v = (p + q + s) \times 22^{lit},32;$$

2° Que la somme des volumes des gaz parfaits, CO, H^2, Az^2 est aussi constant, et égal à

$$(2p + q - r + s) \times 22{,}32;$$

3° Que la quantité de chaleur à volume constant Q_g (eau gazeuse) dégagée par la décomposition, en appelant F la chaleur de formation de la substance à partir des éléments, est

$$Q_g = 68{,}2r - 41{,}9p - 9{,}5q + 10\delta + 0{,}54\,s - F,$$

soit, A étant une constante indépendante du mode de décomposition

$$Q_g = A + 10\delta.$$

La chaleur de décomposition (eau liquide), est

$$Q_l = A - 0{,}8\delta,$$

presque indépendante de δ, c'est-à-dire du mode de décomposition.

Comme δ ne peut être négatif, on a une valeur maxima de δ qui est la plus petite des deux quantités q et $2p + q - r$, et une valeur minima qui est ou zéro, ou $r - p - q$, si cette expression est négative.

On peut, en l'absence d'expériences précises, à peu près impossibles à faire, à cause des réactions mises en jeu pendant le refroidissement, prendre pour la variable δ une valeur moyenne

entre ses valeurs maxima et minima. Le mode de décomposition serait ainsi fixé.

Tout ce qui précède repose sur l'hypothèse que les produits de la décomposition sont simplement des produits d'oxydation, et qu'il ne se forme pas, pendant la détonation, des hydrocarbures tels que le formène CH^4, l'acétylène C^2H^2, etc., ou tout autre composé.

MM. Sarrau et Vieille, dans leurs belles recherches sur la décomposition des explosifs (*), ont en effet trouvé que les gaz restant dans la bombe, après la détonation du fulmicoton endécanitrique, sont presque exclusivement formés de produits oxydés, pour des densités de chargement variant de 0,0098 à 0,3; le formène n'apparaissant, pour la densité de chargement 0,3, qu'en quantité extrêmement faible.

Ils admettent que, pour les densités de chargement usitées, la décomposition du coton endécanitrique doit se faire suivant la formule

$$12\,CO^2 + 12\,CO + 6\,H^2O + 8{,}5\,H^2 + 5{,}5\,Az^2.$$

En revanche, ils ont trouvé que pour des celluloses moins azotées, il restait, dans les produits de la décomposition, après explosion, des quantités notables de formène, et même, pour le fulmicoton à 3 équivalents d'azote (sur 17 éq. d'hydrogène), du carbone azoté et de l'ammoniaque.

Malheureusement ces résultats, si intéressants qu'ils soient, ne donnent pas, d'une manière certaine, ce qu'il nous importerait de connaître, c'est-à-dire la composition des gaz au moment même de l'explosion, composition dont on a seule à tenir compte dans le calcul de la chaleur de décomposition, de la température de détonation, et des coefficients f et α.

Les analyses ne peuvent en effet être exécutées qu'après refroidissement, c'est-à-dire à un moment où des réactions ultérieures complexes peuvent avoir modifié plus ou moins profondément la nature des produits.

En l'absence de toutes données positives, nous admettons celles qui résultent des hypothèses exposées plus haut, et qui ne paraissent pas s'écarter beaucoup de la réalité, au moins pour les fulmicotons fortement nitrés, l'acide picrique, etc.

Mode de décomposition des celluloses nitrées. — Il ne sera point inutile d'étudier plus particulièrement l'application de ces hypothèses aux celluloses nitrées, à cause de l'importance de ces explosifs.

(*) *Mémorial des poudres et salpêtres*, t. II, p. 126.

La composition d'une cellulose nitrée quelconque peut être représentée par

$$C^{24}H^{40-n}Az^nO^{20+2n}.$$

Le maximum de n serait 12; dans la pratique, n ne dépasse pas 11.

On caractérise ordinairement un fulmicoton, par le volume, en centimètres cubes, de bioxyde d'azote dégagé par gramme dans l'analyse par le procédé Schlœsing. On a la correspondance suivante entre ce volume et le nombre n de la formule précédente.

	n	Vol. du bioxyde d'azote.
Coton endécanitrique.	11	214 c. c.
— déca —	10	203
— ennéa —	9	190
— octo —	8	178
— hepta —	7	162
— hexa —	6	146
— penta —	5	128
— tétra —	4	108

Nous nous sommes servis, dans nos calculs, des résultats expérimentaux donnés par MM. Sarrau et Vieille pour la combustion du coton endécanitrique. Ces savants ont trouvé qu'avec la densité de chargement 0,023, et la formule de décomposition

$$15CO + 9CO + 5{,}5H^2 + 9H^2O + 5{,}5Az^2,$$

la réaction dégage 1.230 calories (eau liquide), ce qui donne pour la chaleur de formation du fulmicoton, à partir de ses éléments gazeux

$$F = + 624.$$

M. Berthelot a trouvé, d'autre part, que, pour fixer onze équivalents d'acide azotique sur la cellulose, suivant la formule

$$C^{24}H^{40}O^{20} + 11AzO^3H - 11H^2O,$$

il se dégage une quantité de chaleur égale à 125,4. Cela donne pour la chaleur de formation A du coton $C^{24}H^{40}O^{20}$,

$$A + 11 \times 46{,}1 - 11 \times 69 + 125{,}4 = 624,$$

d'où

$$A = 800.$$

On déduit de là pour la chaleur de formation d'un fulmicoton contenant n équivalents d'azote

$$F_n = 800 + 41{,}6n - 69n + 11{,}4n$$

ou

$$F_n = 800 - 16n.$$

Toutefois, nous ferons remarquer que ces nombres sont en contradiction avec le chiffre trouvé, il y a deux ans, par MM. Berthelot et Vieille, pour la chaleur de formation de la cellulose, par la méthode sûre de la combustion dans l'oxygène. Ces savants ont trouvé pour $C^6H^{10}O^5 = 162^{gr}$, $A = 227^{c},2$, d'où l'on déduit pour $C^{24}H^{40}O^{20}$, $A = 908$ au lieu de 800. On en déduirait, pour la chaleur de formation du fulmicoton endécanitrique, 732 au lieu de 624.

Nous signalons cette discordance, que de nouvelles expériences peuvent seules faire disparaître, et dont on ne pourrait pas chercher la cause dans une erreur dans l'analyse des produits de la décomposition du fulmicoton endécanitrique sous la densité de chargement 0,023. On trouve en effet aisément pour la quantité de chaleur Q (eau liquide) correspondant à la simple oxydation du carbone et de l'oxygène, suivant une équation représentée par

$$\alpha CO^2 + \beta CO + \gamma H^2O + \delta H^2 + \varepsilon Az^2;$$
$$Q = 1.858,4 - 0,8\delta - F.$$

Si l'on admet $Q = 1.230$ et $F = 732$, il vient

$$1.858,4 - 0,8\delta = 1.962,$$

équation impossible, quel que soit δ. Il faudrait donc supposer une autre réaction, telle qu'une combinaison de carbone avec l'hydrogène, qui n'a pas été constatée par l'observation.

Quoiqu'il en soit, si l'on admet les nombres de MM. Sarrau et Vieille avec la chaleur de substitution de l'acide azotique donnée par M. Berthelot; si l'on admet de plus la formation exclusive de produits oxydés, et une formule de décomposition moyenne entre celles qui correspondent au minimum et au maximum de l'hydrogène libre, on peut, pour une cellulose nitrée de degré n, poser la formule de décomposition

$$\alpha CO^2 + \beta CO + \gamma H^2O + \delta H^2 + \frac{n}{2} Az^2,$$

avec

$$\alpha = -24 + \frac{5n}{2} + \delta,$$
$$\beta = 48 - \frac{5n}{2} - \delta,$$
$$\gamma = 20 - \frac{n}{2} - \delta$$

La chaleur de décomposition à volume constant Q (eau gazeuse) est

$$Q = 157,4n - 631 + 10\delta.$$

Le volume V des gaz fournis par la réaction est constant, quel que soit n, et quel que soit δ, et égal à

$$V = 44 \times 22,32.$$

Tableau des températures de détonation et des forces explosives de divers explosifs. — Le tableau suivant a été calculé en partant des données et des hypothèses qui viennent d'être exposées.

On y désigne constamment par :

- Q la chaleur dégagée par la décomposition de l'équivalent, l'eau étant supposée gazeuse; exprimée en grandes calories (kilogr.-degré);
- Q_k la même chaleur pour 1 kilogramme;
- F la chaleur de formation de l'équivalent à partir des éléments;
- ϖ le poids, en kilogrammes, de la portion de l'équivalent qui se réduit en gaz par la détonation;
- ϖ' le poids total de l'explosif;
- v_0 le volume, en litres, des gaz formés par la détonation, ramenés à 0° et 760mm
- t la température de détonation;
- Δ' la densité *apparente* de chargement, c'est-à-dire le rapport $\frac{\varpi'}{V}$ entre le poids de l'équivalent et le volume qu'aurait l'éprouvette si la charge qu'elle contient était un équivalent;
- Δ la densité *réelle* de chargement, c'est-à-dire le rapport entre le poids ϖ des gaz formés et le volume V occupé par ces gaz dans l'éprouvette. Si v est le volume des composés solides, entrant dans la composition de l'explosif, ou formés par la détonation, on a

$$\Delta = \frac{\varpi}{\frac{\varpi'}{\Delta'} - v};$$

- P la pression en kilogrammes par centimètre carré, produite par la décomposition de l'explosif en vase clos, sous la densité apparente de chargement Δ (*);
- f la force de l'explosif donnée par l'expression $F = \frac{1,033\, v_0\,(t + 273)}{273\,\varpi}$;
- α le covolume représenté par l'expression $\frac{u v_0}{\varpi}$, dans laquelle u est supposé constant et égal à 0,001.

(*) Ces nombres expérimentaux sont empruntés aux expériences de MM. Sarrau et Vieille.

Q	Q_k	t	f	α	Δ'	P	

A. — Explosifs simples.

I. — DYNAMITE A 75 POUR 100.

$C^6H^{10}Az^6O^{12} = 6CO^2 + 5H^2O + O + 3Az^2$, $\varpi = 454$, $\varpi' = 605$.

671,2	1.109	2.940°	8.490	0,71	0,3	2.279 (1)	

II. — AZOTATE D'AMMONIAQUE.

$Az^2H^4O^3 = Az^2 + O + 2H^2O$, $\varpi = 80$.

							$\frac{P}{\Delta}$
30,4	380	1.130°	5.180	0,976	0,2 (2)	1.376	6.880
					0,3	2.319	7.730
					0,4	3.560	8.900

III. — ACIDE PICRIQUE.

$C^{12}H^6Az^6O^{14} = CO^2 + H^2O + 11CO + 2H^2 + 3Az^2$, $\varpi = 458$.

347,5 (3)	759	2.620°	9.600	0,877	0,1	927 (4)	
					0,2	1.744	
					0,3	3.549	
						3.500	moy.
						3.510	3.504
						3.456	
					0,4	5.467	

IV. — FULMICOTONS.

1° *Coton endécanitrique.*

$C^{24}H^{29}Az^{11}O^{42} = 10{,}75\,CO^2 + 13{,}25\,CO + 7{,}25\,H^2O + 7{,}25\,H^2 + 5{,}5\,Az^2$, $\varpi = 1.143$.

1.172,3	1.026	2.650°	9.490	0,86	»	»	

Avec la formule de MM. Sarrau et Vieille, on aurait

$12CO^2 + 12CO + 6H^2O + 8{,}5H^2 + 5{,}5Az^2$.

							$\frac{P}{\Delta}$
1.184,8	1.037	2.660°	9.530	0,86	0,1 (5)	942	9.420
					0,2	2.039	10.190
					0,3	3.927	13.090
					0,4	5.430	13.570

(1) *Sarrau et Vieille.* — Mémoire sur les manomètres à écrasement (*Mémorial des poudres et salpêtres*, t. I, p. 415). — On a pris l'écrasement 6,50 observé avec un piston de 4 kilogr.; on en a déduit P par la formule $P = 541 + 535\,\frac{t}{2}$.

(2) Rapport sur les explosifs Favier fait à la Commission des substances explosives par M. Vieille le 7 juillet 1887.

(3) Déduit de la chaleur de formation $F = +98{,}2$.

(4) Ces nombres nous ont été communiqués par MM. Sarrau et Vieille; ils n'ont été qu'incomplètement publiés dans les *Comptes rendus* [*C. R.*, vol. CV, p. 1223 (1887)].

(5) *Mémorial des poudres*, t. II, p. 8 (1885). — *Berthelot et Vieille*, Sur les propriétés explosives du fulminate de mercure.

Q	Q_k	t	f	α	Δ'	P	

2° *Coton octonitrique.*

$C^{24}H^{32}Az^8O^{36} = 6CO^2 + 18CO + 6H^2O + 10H^2 + 4Az^2$, $\varpi = 1.003$.

727,6	722	2.064°	8.630	0,974	»	»	

V. — NITROMANNITE.

$C^6H^8Az^6O^{18} = 6CO^2 + 4H^2O + 3Az^2 + O^2$, $\varpi = 452^{gr}$.

55,4	1.450	3.250°	9.210	0,691	0,1	1.481 (1)	
					0,2	2.585	

B. — Explosifs binaires.

I. — BELLITE = 80 azotate d'ammoniaque + 20 p. binitrobenzine.

On admet la formule 0,175 binitrobenzine + 0,825 azotate, qui donne l'oxygène suffisant pour une combustion complète.

$C^6H^4(AzO^2)^2 + 10Az^2H^4O^3 = 11Az^2 + 22H^2O + 6CO^2$, $\varpi = 968^{gr}$.

973,8	1.006	2.190°	8.000	0,869	»	»	

II. — EXPLOSIF FAVIER.

$21{,}5(Az^2 + O + 2H^2O) + C^{10}H^7AzO^2$, $\varpi = 1.893$.

1.831,7	6	2.120°	8.400	0,926	0,2	1.886	
						2.253	2.051
						2.014	
					0,3	3.687	
						3.560	3.623

III. — MÉLANGES DE DYNAMITE ET D'AZOTATE D'AMMONIAQUE (2).

$C^6H^{10}Az^6O^{18} + mAz^2H^4O^3 + 151^{gr}$ silice
$= 6CO^2 + (5 + 2m)H^2O + (0{,}5 + \frac{m}{2})O^2 + (3 + m)Az^2$,

$Q = 671{,}2 + m \times 30{,}4$.

$\varpi' = 605 + 80m$, $\varpi = 454 + 80m$.

a. — $m = 29{,}2$, **0,20 dyn, + 0,80 azotate**.

$\varpi' = 2.941^{gr}$, $\varpi = 2.790^{gr}$.

1.558,9	530,1	1.500°	6.260	0,934	»	»	

(1) Ces deux nombres, dont le second donnerait un $\frac{P}{\Delta}$ plus petit à la densité 0,2 qu'à la densité 0,1, sont inconciliables. Le caractère très brisant de la nitromannite a sans doute faussé les observations.

(2) Voir la *fig.* 5.

Q	Q_k	t	f	α	Δ'	P

b. — $m = 7{,}81$, **0,505 dyn. + 0,495 azotate.**

$\varpi' = 1.229^{gr},8$, $\varpi = 1.078^{gr},8$.

908,6	739	2.000°	7.440	0,865	»	»

IV. — MÉLANGES DE FULMICOTON ET D'AZOTATE D'AMMONIAQUE.

A. — COTON ENDÉCANITRIQUE (1).

a. — Mélange donnant la combustion complète du coton.

$M = C^{24}H^{29}Az^{11}O^{42} + 20{,}5\,Az^2H^4O^3 = 24\,CO^2 + 55{,}5\,H^2O + 26\,Az^2$, $+ \varpi = 2.783$.

0,41 coton + 0,59 azotate.

3.117	1.421	2.420°	8.630	0,847	0,2 0,3	2.092 (2) 3.488

b. — $M + mAz^2H^3O^4$, $\varpi = 2.783 + 80m$.

$Q = 3.117 + 30{,}4m$.

1° $m = 24{,}24$, *0,242 coton + 0,758 azotate.*

$\varpi = 4.863^{gr}$.

3.854	816	2.000°	7.580	0,881	»	»

2° $m = 134{,}9$, *0,084 coton + 0,916 azotate.*

$\varpi = 13.575^{gr}$.

7.218	532.0	1.500°	6.370	0,954	»	»

B. — COTON OCTONITRIQUE ET AZOTATE D'AMMONIAQUE.

a. — Mélange donnant la combustion complète du coton.

$C^{24}H^{32}Az^8O^{36} + 28\,Az^2H^4O^3$,

0,310 fulmicoton + 0,690 azotate, $\varpi = 3.248^{gr}$

3.382	1.041	2.265°	8.460	0,879	»	»

b. — $C^{24}H^{32}Az^8O^{36} + 5{,}4\,Az^2H^4O^3$.

0,70 fulmicoton + 0,30 azotate, $\varpi = 1.440$.

1.273,3	884	2.170°	8.620	0,933	»	

(1) Voir la *fig.* 6.

(2) Recherches expérimentales sur la décomposition du coton-poudre, par MM. Sarrau et Vieille. — Etude n° 3 (Archives de la Commission des substances explosives).

— On a calculé P, en partant des écrasements, par la formule $K_0 + K\frac{\varepsilon}{2}$, que MM. Sarrau et Vieille n'avaient pas encore établie lors de la rédaction de ce travail.

Q	Q_k	t	f	α	Δ'	P

c. — $C^{24}H^{32}Az^8O^{36} + 50{,}4\,Az^2H^4O^3$

0,20 fulmicoton + 0,80 azotate, $\varpi = 5.040$.

4.083	810	1.930°	7.610	0,915	»	»

V. — COTON OCTONITRIQUE ET AZOTATE DE BARYTE.

Mélange donnant la combustion complète du coton.

$C^{24}H^{32}Az^8O^{36} + 5{,}60\,Az^2O^6Ba$ $\left\{\begin{array}{l}\varpi' = 2.469{,}6,\\ \varpi = 1.612{,}8,\end{array}\right.$

0,405 fulmicoton + 0,595 azotate.

1.983,4	803	2.648°	7.590	0,686	»	»

VI — DYNAMITE-GOMME.

Mélange, à combustion complète, de nitroglycérine et de fulmicoton endécanitrique.

$C^{24}H^{31}Az^9O^{38} + 51\,C^3H^5Az^3O^9$, $\varpi = 12.630^{gr}$.

19.511	1.545	3.220°	9.360	0,709	»	»

Ce sont les calculs précédents et quelques autres que nous ne rapportons pas ici, comme présentant moins d'intérêt, qui ont permis de tracer les courbes représentées par les figures 5, 6 et 7. Ces courbes montrent la manière dont varient la température de détonation et la force explosive f pour des mélanges, en proportions variées, de dynamite ou de fulmicoton avec diverses substances susceptibles de se décomposer sous l'influence d'une température élevée.

Comparaison, avec l'expérience, des pressions calculées et des pressions expérimentalement déterminées. — Les nombres calculés pour les températures de détonation et les forces explosives f, reposent sur des données calorimétriques qu'on peut considérer comme certaines; sur les formules de décomposition des explosifs qui ne sont connues avec certitude que lorsque l'explosif est complètement brûlé; enfin sur les valeurs des chaleurs spécifiques gazeuses déduites de nos expériences. Il est très intéressant de comparer les résultats du calcul avec les observations de MM. Sarrau et Vieille sur les pressions développées par les gaz

qui proviennent de la décomposition des explosifs en vase clos.

On peut, en effet, déduire ces pressions de la formule

$$(1) \qquad P = \frac{f\Delta}{1-\alpha\Delta},$$

lorsque f est connu. Mais il intervient alors un autre coefficient α, qui n'est point connu avec certitude. De plus, l'expression précédente, qui n'est autre que celle de Clausius, n'a jusqu'à présent été vérifiée que pour des pressions relativement faibles et des températures plus élevées.

La vérification tentée portera donc sur quatre éléments :

1° L'exactitude de la loi d'accroissement des chaleurs spécifiques que nous avons admise et celle de l'indépendance constatée par MM. Berthelot et Vieille, ainsi que par nous, jusque vers 16 à 17 atmosphères seulement, des chaleurs spécifiques et de la pression;

2° L'exactitude de l'expression (1) qui se déduit immédiatement de l'expression de Clausius;

3° L'exactitude de la valeur 0,001 que nous avons assignée au covolume, et que nous avons supposée la même pour tous les gaz;

4° L'exactitude du mode de décomposition de l'explosif, admis dans les calculs.

Pour cette vérification, nous avons mis l'expression (1) sous la forme

$$(2) \qquad \frac{P}{\Delta} = \alpha P + f.$$

Étant données les pressions expérimentales P sous des densités de changement Δ variées, calculant $\frac{P}{\Delta}$, et considérant les P comme les abscisses et les $\frac{P}{\Delta}$ comme les ordonnées d'une ligne, cette ligne, si les théories sont exactes, doit être une droite dont le coefficient angulaire $\alpha = \frac{uv_0}{\varpi}$ dépend uniquement du covolume, et dont l'ordonnée à l'origine f dépend de la température de détonation à laquelle elle est proportionnelle, et du volume gazeux qui dépend lui-même de la loi de décomposition.

Les points expérimentaux, ayant pour abscisses P et pour ordonnées $\frac{P}{\Delta}$ doivent se placer sur cette droite théorique.

Si les chaleurs spécifiques gazeuses et la loi de décomposition

admises pour les calculs théoriques ne sont pas exactes, mais si la loi du covolume l'est, les points expérimentaux doivent se placer sur une droite; enfin si de plus la valeur admise pour le covolume est exacte, ce qui suppose l'exactitude de la loi de décomposition, cette droite doit avoir l'inclinaison définie par le coefficient angulaire théorique α.

Sur la *fig.* 8, p. 246, on a, pour divers explosifs, placé les points expérimentaux déduits des expériences de MM. Sarrau et Vieille, sur un canevas dans lequel l'échelle des abscisses est la même que celle des ordonnées. Pour comprendre toutes les données relatives aux divers explosifs sur la même feuille et éviter la confusion, l'origine des ordonnées est différente pour chaque explosif.

On a tracé ensuite, en traits pleins, les droites ayant le coefficient théorique α qui passent le mieux possible par les points expérimentaux.

Ce qui ressort tout d'abord de l'examen de la figure, c'est que les points expérimentaux, si l'on élimine ceux qui, n'ayant aucune relation avec les autres, sont évidemment fautifs, s'écartent fort peu, de part et d'autre, des lignes ainsi tracées.

Pour l'azotate d'ammoniaque par exemple, les deux observations se placent exactement sur une droite d'inclinaison α. Il en est de même pour le mélange de coton et d'azotate d'ammoniaque qui donne des produits complètement brûlés.

Pour le coton-poudre et l'acide picrique l'accord est aussi très satisfaisant. Il l'est surtout d'une façon remarquable pour l'acide picrique qu'on a observé jusqu'à la pression énorme de 7.760 kilogrammes.

Conséquences relatives à la loi du covolume et à la valeur de ce coefficient. — Il résulte donc de ce premier point que la formule du covolume vérifiée depuis les plus basses pressions jusqu'à 10 ou 20 atmosphères est encore vraie pour des pressions qui dépassent 7.500 atmosphères. L'identité du covolume pour tous les gaz, que nous avons admise, et la valeur de 0,001 attribué à ce covolume, sont aussi vérifiées d'une manière aussi satisfaisante que possible, car la nature des gaz brûlés est très différente pour l'acide picrique d'une part qui ne contient que 1 volume de vapeur d'eau et 1 volume d'acide carbonique contre 16 volumes de gaz parfaits, et de l'autre pour le coton à l'azotate qui contient 24 volumes d'acide carbonique, $55^{vol},5$ de vapeur d'eau contre 26 de gaz parfaits.

Il résulte donc des expériences de MM. Sarrau et Vieille que les choses se passent, des pressions les plus basses jusqu'aux pressions de 7 à 8.000 atmosphères, comme si les molécules gazeuses avaient un volume invariable, le même pour toutes, et à très peu près égal au millième du volume gazeux à zéro sous la pression 760.

Conséquences relatives à la variation, avec la température et la pression, des chaleurs spécifiques des gaz condensés. — Sur la *fig.* 8, à côté de la droite en traits pleins qu'on peut appeler la droite expérimentale, on a tracé en points longs, une autre droite, ayant la même inclinaison α, et ayant pour ordonnée à l'origine la valeur de f trouvé par le calcul.

L'écart entre les deux droites, expérimentale et théorique, est représenté par les différences des ordonnées à l'origine de chacune d'elles.

Les deux droites sont très peu différentes l'une de l'autre pour l'azotate d'ammoniaque ; la différence des deux ordonnées à l'origine, 5.400 et 5.180, est de 220, soit une erreur relative de 4 p. 100 environ. Cette différence peut être considérée comme insignifiante.

Pour la dynamite, on n'a qu'une seule expérience. La droite théorique est au-dessus de la droite expérimentale de $8.410 - 8.165 = 245$, soit une erreur relative de 3 p. 100, qu'on peut aussi considérer comme sans importance.

Pour le coton au nitrate, la superposition des deux droites est presque parfaite. La droite théorique est au-dessous de la droite expérimentale de $8.680 - 8.630 = 50$, soit une erreur relative de 0,57 p. 100, qui est de l'ordre des erreurs accidentelles.

Pour le coton endécanitrique, la différence est plus grande ; la droite théorique est au-dessus de la droite expérimentale de $9.490 - 8.700 = 790$, soit une erreur relative de 8,4 p. 100.

Pour l'acide picrique, la différence est encore plus grande ; la droite théorique est encore au-dessus de la droite expérimentale, et d'une quantité égale à $9.600 - 8.650 = 950$, soit une erreur relative de 10 p. 100.

Il résulte donc de cette comparaison que, pour les corps qui donnent par leur décomposition très peu de gaz parfaits, comme la dynamite ($0^v,24$ de gaz parfaits pour 1^v total), ou le coton ammoniacal ($0^v,248$ de gaz parfaits pour 1^v total), l'accord entre la théorie et l'observation est très satisfaisant, l'écart ne dépassant pas 3 p. 100.

On peut en conclure que les expressions des chaleurs spécifiques de l'acide carbonique et de la vapeur d'eau déduites de nos expériences antérieures, doivent être sensiblement exactes ; que ces expressions peuvent s'étendre jusque vers 3.000° ; enfin qu'elles sont encore indépendantes de la pression, même lorsque cette pression atteint 3 à 4.000 atmosphères.

Conséquences relatives à la réalité de la variation, avec la température, de la chaleur spécifique des gaz simples ou non condensés. — Les droites théoriques pour le coton et l'acide picrique dépendent de la loi admise pour la formule de décomposition et, principalement au moins, de la loi d'accroissement des chaleurs spécifiques des gaz parfaits, qui présente une importance toute spéciale, car la réalité de l'accroissement elle-même reste douteuse pour beaucoup de physiciens.

Pour le coton endécanitrique, la formule de décomposition admise paraît assez bien établie ; elle résulte des analyses faites par MM. Sarrau et Vieille, sur les gaz provenant de la détonation. Il est vrai que ces gaz, pendant le refroidissement, ont pu réagir mutuellement, de telle sorte que la composition observée peut être assez différente de la composition au moment de la détonation. Toutefois, il peut paraître établi qu'il ne se forme pas de composés hydrocarburés en proportion notable. La formule de décomposition doit être alors, comme nous l'avons établi plus haut, représentée par l'expression :

$$(-1,5+\delta)CO^2+(2,5,5-\delta)CO+(14,5-\delta)4^2O+\delta H^2+5,5Az^2.$$

Le nombre δ ne peut varier que de $\delta=0$ à $\delta=14,5$; la quantité de chaleur, expérimentalement constatée ne peut pas varier. Dans ces conditions, la valeur de f ne peut varier que de 9.170 à 9.440.

Ces nombres laissent toujours subsister dans le même sens l'écart entre la droite théorique et la droite expérimentale.

La droite théorique a été calculée en admettant un certain accroissement, faible d'ailleurs, de la chaleur spécifique des gaz simples, résultant de la formule $4,8 + 0.0006\,t$. Si l'on n'admettait pas cet accroissement, la température de détonation serait de 2.820° et $f = 10.060$. Le f expérimental est de 8.700 ; la différence serait de 1.360, soit une erreur relative énorme de 15,5 p. 100.

L'accroissement de la chaleur spécifique des gaz parfaits résulte donc, avec certitude, des expériences de MM. Sarrau et Vieille.

Conséquences relatives au taux d'accroissement, avec la température, de la chaleur spécifique moléculaire des gaz simples ou non condensés. — Le taux d'accroissement 0,0006 par degré de cette chaleur spécifique a été déduit de nos expériences, sur ce point assez divergentes, parce que cette valeur se présentait comme la différence de quantités variables elles-mêmes. Nous avions trouvé pour ce coefficient une valeur maxima 0,0012 et une valeur minima 0,0003. La valeur admise 0,0006 était une certaine moyenne que nous ne présentions d'ailleurs qu'avec réserve.

Il est naturel de chercher quelle serait la valeur qu'il faudrait attribuer à cet accroissement pour faire coïncider la droite théorique avec la droite expérimentale. Le calcul est simple, et de la valeur expérimentale de $f = 8.700$, on tire $t = 2.437$, et, pour les gaz simples, l'expression

$$4{,}8 + 0{,}0014\,t.$$

Ce taux d'accroissement paraît un peu fort. Il est plus grand que celui qui se déduit de l'expérience de MM. Berthelot et Vieille avec le cyanogène brûlant pour CO, et qui est de 0,0011.

La formule de décomposition de l'acide picrique est assez mal connue. MM. Sarrau et Vieille, d'après l'analyse des gaz provenant de la détonation, donnent les formules suivantes :

$\Delta = 0{,}1$ $\quad 1{,}37CO^2 + 10{,}50CO + 0{,}122CH^4 + 2H^2 + 0{,}75H^2O + 3Az^2$

$0{,}2$ $\quad 2{,}50CO^2 + 8{,}60CO + 0{,}870CH^4 + 0{,}87H^2 + 0{,}37H^2O + 3Az^2$

$0{,}5$ $\quad 3{,}12CO^2 + 7{,}62CO + 1{,}190CH^4 + 0{,}50H^2 + 0{,}25H^2O + 3Az^2$

Le fait saillant qui résulte de ces analyses, c'est la présence du formène en quantité notable et croissante avec la densité de chargement. Ce gaz influe beaucoup, comme le remarquent MM. Sarrau et Vieille, sur la quantité de chaleur de la décomposition. Avec les nombres donnés, cette quantité de chaleur serait de :

	Calories.
$3{,}12 \times 94{,}0$	293,3
$7{,}62 \times 25{,}8$	196,6
$1{,}19 \times 18{,}5$	22,0
$0{,}25 \times 58$	14,5
	526,4
Chaleur de form. de l'acide	98,2
	428,2

Avec ce nombre on peut calculer la température de détonation. Il est vrai qu'on ne connaît pas le taux d'accroissement de la chaleur spécifique du formène avec la température, mais cette donnée n'ayant que peu d'influence, on peut prendre le même taux que pour l'acide carbonique. On trouve ainsi que l'analyse de MM. Sarrau et Vieille, relative à la densité de chargement 0,5, conduirait à une température de détonation $t = 3.300°$, à un $f = 10.410$, à un $\alpha = 0{,}77$.

Or une droite ayant l'inclinaison représentée par cette nouvelle valeur de α, ne peut plus passer à la fois par tous les points expérimentaux, comme on peut s'en assurer sur la figure 8. De plus, la droite, menée par le point observé qui correspond à la densité 0,3, et ayant l'inclinaison $\alpha = 0{,}77$, donne un $f = 9.420$ qui s'éloigne beaucoup de 10.410. Les analyses de MM. Sarrau et Vieille ne concordent donc pas avec leurs observations de pression, si on les considère comme représentant la composition des gaz au moment de la détonation; et il est très vraisemblable que les gaz analysés avaient déjà subi des transformations multiples pendant le refroidissement.

Quoi qu'il en soit, si l'on admet la loi de décomposition que nous avons admise en supposant que la décomposition ne donne lieu à aucun carbure, on peut, comme nous l'avons fait pour l'acide carbonique, chercher quel taux d'accroissement de la chaleur des gaz parfaits amènerait la coïncidence entre les droites expérimentale et théorique.

On trouverait ainsi, pour la température de détonation $t = 2.227°$ et pour la chaleur spécifique des gaz parfaits

$$c = 4{,}8 + 0{,}0013\,t.$$

Le taux d'accroissement ne différerait pas beaucoup de celui qu'on déduit des expériences faites avec le fulmicoton.

Ce qui résulte en tous cas de cette discussion, c'est la réalité incontestable de l'accroissement de la chaleur spécifique des gaz parfaits avec la température. Quant au taux de cet accroissement, supposé linéaire, il paraît être plus fort que celui (0,0006) que nous avions admis, et même plus fort que celui (0,0011) qui résultait des expériences de MM. Berthelot et Vieille.

Malheureusement l'incertitude du mode de décomposition du fulmicoton et de l'acide picrique ne permet pas de tirer des conclusions absolument certaines sur la valeur exacte de ce coefficient.

NOTE B.

SUR LA QUANTITÉ DE CHALEUR QUI PEUT ÊTRE TRANSFORMÉE EN TRAVAIL PAR LA DÉTENTE ADIABATIQUE D'UN GAZ.

Par MM. MALLARD et LE CHATELIER.

La solution de la question que nous nous proposons de traiter ici est bien connue dans le cas où l'on suppose constante la chaleur spécifique des gaz. On sait que, dans ce cas, si l'on appelle

T_0 la température *absolue* initiale du gaz,
T la température *absolue* finale du gaz,
P_0 la pression initiale,
P la pression finale,
V_0 le volume initial,
V le volume final,
Q la quantité de chaleur équivalant au travail effectué par la détente adiabatique de P à p,
c la chaleur spécifique du gaz à volume constant,
c' la chaleur spécifique du gaz à pression constante,

on a

$$\frac{V}{V_0}=\left(\frac{P_0}{P}\right)^{\frac{c}{c'}} \qquad \frac{T_0}{T}=\left(\frac{P_0}{P}\right)^{\frac{c'-c}{c'}}$$
$$Q=c\,(T_0-T).$$

On peut très aisément former des équations analogues, naturellement un peu plus complexes, lorsque la chaleur spécifique à volume constant est fonction de la température.

Supposons que la température reste assez grande et $\frac{V_0}{V}$ relativement assez considérable pour que l'équation de Clausius puisse être réduite à l'expression

$$(1) \qquad P(V-uv_0)=RT=\frac{10.330\times v_0}{273}T,$$

u étant le covolume et v_0 le volume du gaz considéré à 0° et 760^{mm};
P étant exprimé en kilogrammes, V et v_0 en mètres cubes.

On en tire par différentiation

$$(2) \qquad dV=R\frac{dT}{P}-RT\frac{dP}{P^2};$$

Les gaz suivant une loi de détente adiabatique, on a, A étant l'équivalent calorifique du kilogrammètre,

$$(3) \qquad APdV=-CdT$$

C étant la chaleur spécifique *vraie* de la masse de gaz considérée.

Des équations (1) et (2), il vient aisément

$$(4) \qquad \left(1+\frac{C}{AR}\right)\frac{dT}{T}-\frac{dP}{P}=0.$$

Si la chaleur spécifique *moyenne*, à volume constant, de la masse du gaz, entre 0° et t^0 est exprimée par

$$c=a+bt$$

on aura, pour la chaleur spécifique vraie, à t

$$C=a+2bt=a+2b\,(T-273)$$

ou, en prenant

$$a'=a-2b\times 273,$$
$$C=a'+2bT.$$

Transportons cette valeur de T dans l'équation et intégrant, il vient définitivement

$$(5) \qquad \left(1+\frac{a'}{AR}\right)\text{l. nép. } T+\frac{2b}{AR}T-\text{l. nép. } P=\text{ const.}$$

Si l'on supposait la chaleur spécifique constante et égale à c, on aurait $b=o$, $a'=c$, et l'équation se réduirait à

$$\frac{T_0}{T}=\left(\frac{P_0}{P}\right)^{\frac{AR}{AR+c}}.$$

D'ailleurs, si l'on se reporte à la valeur de R, on verra que AR est la quantité de chaleur équivalent au travail de dilatation du gaz, sous la pression atmosphérique pour une variation de température de 1°; on a donc $AR=c'-c$, ce qui ramène l'expression à la forme connue

$$\frac{T_0}{T}=\left(\frac{P_0}{P}\right)^{\frac{c'-c}{c'}}.$$

En portant dans (4) la valeur de P tirée de (1), on aurait aisément une équation entre V et T; il est inutile de l'écrire.

Quant à la quantité de chaleur Q dépensée par le gaz pour produire la détente de P_0 à P, elle correspond à la perte d'énergie interne du gaz de T_0 à T, et a pour expression

$$(6) \qquad Q = at_0 + bt_0^2 - (at + bt^2),$$

en appelant t_0 et t les températures, comptées à partir de o^0, qui correspondent respectivement aux températures absolues T_0 et T.

La formule (5), quand on y introduit les logarithmes vulgaires et qu'on détermine la constante en écrivant que l'expression est vérifiée pour la pression et la température initiales P_0 et T_0, prend la forme

$$(7) \qquad \log \frac{P}{P_0} = \left(1 + \frac{a'}{AR}\right) \log T + M \cdot \frac{2b}{AR} T - k,$$

en posant

$$k = \left(1 + \frac{a'}{AR}\right) \log T_0 + M \cdot \frac{2b}{AR} T_0,$$

M étant le log. vulg. de e.

Lorsque l'on a déduit de l'équation (7) la valeur de $T = t + 273$, pour une détente $\frac{P}{P_0}$ donnée, on calcule la quantité de chaleur Q_u utilisée par la détente, au moyen de l'expression

$$Q_u = Q - (at + bt^2).$$

C'est ainsi qu'on a formé le tableau suivant. On y a admis une détente de 1/10000, qui ferait tomber, à la pression atmosphérique, les gaz supposés originairement donnés à une pression de 10.000 kilogrammes. On y indique, pour quatre explosifs, le poids ϖ de l'unité de volume supposée égale à $22^{lit},32$; les coefficients a et b de l'expression de la chaleur spécifique de l'unité de volume; la température initiale t_0 de détonation; la température finale t, après la détente de 1/10000; la chaleur Q_d dépensée pendant la détente par unité de poids; la chaleur Q_k représentant l'énergie calorifique développée par la détonation de 1 kilogramme. On a placé en regard les coefficients f calculés dans une note précédente.

	ϖ	a	b	t_0	t	Q_d	Q_k	f
	gr.							
Acide picrique. . . .	25,45	4,93	0,00092	2.560°	69°	724	737	9.420
Coton endéc.	25,97	5,30	0,00181	2.636°	304°	945	1.168	9.460
Nitroglycérine. . . .	31,31	5,68	0,00281	3.170°	978°	1.128	1.478	9.320
40 coton endécan. +60 azot. ammon.	26,37	5,50	0,00273	2.450°	502°	993	1.121	8.720

L'inspection de ce tableau montre que a varie peu d'un explosif à un autre; que b varie, au contraire, beaucoup; qu'à mesure que b augmente, la température t finale augmente aussi, et le rapport $\frac{Q_d}{Q_k}$, de l'énergie Q_d utilisée par la détente à l'énergie totale Q_k, diminue.

Pour les explosifs dont les gaz sont peu brûlés, et qui contiennent par conséquent beaucoup de gaz parfaits, la détente utilise presque entièrement l'énergie disponible.

Ce tableau montre, en outre, combien différent est l'ordre dans lequel les explosifs peuvent être classés, suivant l'usage auquel on veut les employer.

S'il s'agit de produire simplement dans une roche des fissures qui permettront un déblaiement ultérieur, c'est la pression développée par l'explosif dans le trou de mine qui a l'importance prépondérante, et c'est la valeur de f qui sera l'argument du classement.

Dans les mines, c'est évidemment la valeur de f qu'il faut surtout prendre en considération.

Si, au contraire, il s'agit de déblayer et de projeter une grande masse de terre, c'est la valeur de Q_d qui deviendra l'élément essentiel.

Les exemples précédents montrent que, bien que Q_d puisse être, notamment pour les explosifs complètement brûlés et à température élevée de détonation, assez différent de Q_k, la différence n'est pas cependant assez considérable pour que l'énergie totale Q_k rapportée au kilogramme, ne puisse être prise comme la mesure de ce qu'on pourrait appeler le pouvoir *déblayant* de l'explosif.

On voit en somme qu'un explosif peut restituer, par détente, à peu près toute l'énergie qu'il tient accumulée. Le résultat expérimental trouvé par la Sous-Commission, qui égale au tiers environ de l'énergie totale de l'explosif, l'énergie transformée en

travail par la détonation dans un tube d'étain de 25 millimètres sur 40 millimètres, montre que, dans ces conditions, on est encore bien loin d'utiliser toute la portion de l'énergie calorifique disponible.

Nous terminons en remarquant que l'équation (7) justifie le résultat expérimental obtenu par la Sous-Commission qui a constaté que la température des gaz, après la projection des parois d'un tube donné, tel que le tube d'étain de 25/40 par exemple, est d'autant plus élevée que la densité de chargement est plus faible. En effet, la densité de chargement abaisse la pression initiale P_0, sans changer ni la température initiale T_0, ni par conséquent le coefficient k. La pression finale P, qui, dans le cas des expériences de la Sous-Commission, était la pression atmosphérique, restant aussi la même, le rapport $\frac{P}{P_0}$ augmente quand la densité de chargement diminue, et il résulte de l'équation (7) que la température finale T augmente aussi.

COMMISSION DES SUBSTANCES EXPLOSIVES

SOUS-COMMISSION SPÉCIALE

RAPPORT SUPPLÉMENTAIRE

SUR L'ÉTUDE DES QUESTIONS

RELATIVES A

L'EMPLOI DES EXPLOSIFS

EN PRÉSENCE DU GRISOU

Dans son rapport du 5 juillet dernier, la Commission annonçait que les expériences seraient continuées de manière à résoudre, autant que possible, certaines questions restées encore douteuses. Les mois de juillet, août, septembre et octobre ont été employés à ces nouvelles recherches dont on va faire connaître le résultat.

I. — EXPLOSIFS EN PRÉSENCE DE MÉLANGES D'AIR ET DE GAZ D'ÉCLAIRAGE.

Il a paru intéressant d'expérimenter avec des mélanges gazeux inflammables dans lesquels le formène est remplacé par le gaz d'éclairage. Il est en effet utile que des essais semblables à ceux qui ont été faits à la pou-

drerie de Sevran-Livry par la Commission puissent être répétés sans trop de difficultés, soit pour constater le degré de sécurité d'un explosif nouveau, soit pour s'assurer que les explosifs fournis par l'industrie donnent bien le degré de sécurité qu'ils doivent posséder. Il serait donc très désirable que ces essais pussent être faits en substituant le gaz d'éclairage au formène dont la fabrication en quantités un peu considérables est difficile et coûteuse.

Les mélanges les plus explosifs d'air et de gaz d'éclairage contiennent environ 15 à 16 p. 100 de ce gaz. La puissance de notre éjecteur ne nous permettait pas de préparer de semblables mélanges dans notre chaudière. On s'est contenté d'opérer avec des mélanges tenant 10,3 p. 100 de gaz, ce qui suffisait parfaitement pour le but qu'on se proposait. On a vu d'ailleurs que l'inflammabilité varie peu, entre certaines limites inférieures et supérieures, avec le dosage du mélange.

On a cherché, comme on l'avait fait pour les mélanges d'air et de formène, à déterminer, pour les mélanges d'air et de gaz d'éclairage, ce que nous avons appelé la température apparente d'inflammation sous l'influence de la détonation des explosifs.

On a fait éclater, au milieu du mélange gazeux, des tubes d'étain de $25^{mm}/40^{mm}$ dans lesquels on avait bourré successivement 50 grammes d'explosifs divers.

On a essayé dans ces conditions les mélanges tenant 10 coton et 90 azotate, 20 coton et 80 azotate, 30 coton et 70 azotate. Aucun de ces mélanges n'a allumé le gaz. Il était inutile d'expérimenter avec les mélanges tenant une proportion plus considérable de coton, car d'une part le mélange à 30 p. 100 de coton est celui qui donne la combustion complète et la température la plus élevée; d'autre part, en augmentant la proportion de coton, les gaz provenant de la détonation auraient été combustibles et auraient pu venir s'inflammer au contact du mélange gazeux.

On a ensuite essayé les mélanges de dynamite et d'azotate d'ammoniaque. Les mélanges tenant successivement 60, 70, 80, 90 de dynamite n'ont pas allumé le mélange gazeux en détonant dans le tube d'étain de 25/40. La dynamite non mélangée d'azotate a au contraire produit cette inflammation en détonant de la même façon.

Les gaz provenant de la détonation du mélange de 90 de dynamite et 10 d'azotate, après avoir accompli le travail nécessaire pour briser le tube et en projeter les débris, ne conservent plus, comme on l'a démontré dans le rapport du 5 juillet, que les 0,63 de la quantité de chaleur primitive. On en déduit que la température des gaz, lorsqu'ils arrivent en contact avec le mélange gazeux extérieur est environ de 2.070°. On a calculé précédemment que la dynamite, dans les mêmes conditions, donne des gaz à la température de 2.150°; la température apparente d'inflammation d'un mélange d'air et de gaz d'éclairage, contenant 10 p. 100 de ce gaz, serait donc de 2.100° environ. On avait trouvé 2.200° avec les mélanges d'air et de formène.

Il faut faire, au sujet de cette température, ainsi déterminée d'une manière grossièrement approximative, les mêmes réserves qui ont été déjà faites dans le premier rapport lorsqu'il s'agissait du formène.

Quoiqu'il en soit, on voit que l'inflammabilité des mélanges d'air et de gaz d'éclairage n'est pas, dans les conditions de nos expériences, beaucoup plus considérable que celle des mélanges d'air et de grisou. On pourrait donc, sans trop d'exagération, imposer aux explosifs destinés à être employés dans les mines à grisou la condition de ne pas allumer, au moins dans la grande majorité des cas, les mélanges d'air et de gaz d'éclairage au milieu desquels ils détonent à l'air libre.

Cette conclusion pouvait d'ailleurs, jusqu'à un certain point, être prévue par l'expérience faite en mai 1887 au laboratoire de l'École des mines, et dont il a été rendu compte à la Commission. On avait constaté qu'une amorce renforcée, tenant $1^{gr},5$ de fulminate et détonant dans une bombe de 4 litres de capacité, n'allume ni le mélange tenant 10 p. 100 de formène, ni le mélange tenant 15 p. 100 de gaz d'éclairage, tandis qu'elle allume le mélange tenant 30 p. 100 d'hydrogène.

II. — INFLUENCE DE LA VAPEUR D'EAU SUR L'INFLAMMABILITÉ DES MÉLANGES GRISOUTEUX.

Certains effets capricieux des explosifs détonant à l'air libre avaient porté à penser que l'inflammabilité du gaz pouvait varier avec certaines circonstances, et particulièrement avec l'humidité de l'air. Les expériences entreprises dans le laboratoire n'ont pas confirmé cette hypothèse, et n'ont pas permis de constater de différence appréciable entre l'inflammabilité des mélanges plus ou moins humides.

III. — ÉTUDES SUR LE MODE DE DÉTONATION DES EXPLOSIFS.

On a montré, dans le précédent rapport, tout l'intérêt que présente, au point de vue de nos recherches, l'étude d'une question, encore imparfaitement connue, malgré les mémorables travaux de MM. Berthelot, Sarrau et Vieille, celle du mode de détonation des explosifs.

D'une part, il est important, pour les nombreux explosifs qu'on peut songer à réaliser, de pouvoir constater avec quelque précision, l'aptitude plus ou moins grande à la détonation; car une aptitude trop imparfaite devrait *a priori* faire rejeter l'emploi de la substance.

D'autre part, la température de la détonation est un des éléments les plus importants de la sécurité, et elle dépend essentiellement du mode de décomposition.

Enfin, le mode de décomposition d'une même substance explosive varie avec les circonstances dans lesquelles s'opère la détonation. Il n'est sans doute pas le même, au moins nécessairement, lorsque la substance détone à l'air libre ou lorsqu'elle détone dans un vase résistant, et les conditions de sécurité peuvent varier beaucoup d'un cas à l'autre.

Sans espérer résoudre d'une façon complète ces questions délicates, jusqu'ici peu étudiées, il nous a semblé intéressant de multiplier nos recherches sur ce point. Nous avons pu ajouter ainsi un certain nombre de faits nouveaux à ceux qui ont été exposés dans le premier rapport, et, pour plus de clarté, nous allons résumer ici à la fois et les uns et les autres.

Nous commencerons par faire connaître les procédés expérimentaux que nous avons employés et dont le principe a déjà trouvé place dans notre premier travail.

Procédés expérimentaux.

Pour connaître la quantité de chaleur dégagée par la détonation d'un explosif, nous produisons cette détonation dans notre chaudière close, et nous mesurons, au moyen d'un manomètre à eau, la pression que développe l'élévation de température intérieure due à la détonation. La température baisse assez rapidement par le refroidissement; en observant pendant quelques secondes la marche de ce refroidissement, on peut, par une extrapolation admissible, connaître la pression développée au moment même de la détonation, avant que le refroidissement ait commencé à se produire. Cette pression P étant ainsi connue en mètres d'eau, on déduit de la capa-

cité de la chaudière ainsi transformée en calorimètre à air, que la quantité de chaleur Q développée dans la chaudière a pour expression :

$$Q = 58{,}4\,P.$$

Détonation à l'air libre. — Lorsque l'explosif détone à l'air libre, Q est la quantité de chaleur développée par la détonation. C'est, en effet, ce que confirment les expériences suivantes faites avec des substances dont le mode de détonation à l'air libre peut être considéré comme bien connu.

NATURE DE L'EXPLOSIF	POIDS de l'explosif	PRESSION P en m. d'eau	Q DÉDUIT pour 100 gr.	Q théorique pour 100 gr.
Nitromannite.	25gr	0,61	142	145,0
Dynamite n° 1 de Vonges.	50	0,83	97	97,2(*)
90 dyn. 10 azot. amm. . .	25	0,41	96	91,3
80 — 20 — . . .	id.	0,38	89	85,4
70 — 30 — . . .	id.	0,34	79	79,4
60 — 40 — . . .	30	0,36	70	73,5

(*) Pour cet explosif et pour ceux qui suivent, les quantités de chaleur théorique ont été calculées en admettant que la chaleur communiquée à la silice de la dynamite n'est pas restituée immédiatement à l'air ambiant.

La concordance entre les nombres des deux dernières colonnes est assez satisfaisante si l'on songe aux incertitudes inévitables de ces expériences, auxquelles on ne s'est d'ailleurs pas attaché à donner toute la précision dont elles seraient susceptibles.

Détonation dans des vases résistants. — Lorsqu'on fait détoner l'explosif bourré dans un tube métallique résistant, on a montré, dans le premier rapport, que la quantité de chaleur communiquée à l'air de la chaudière, dans l'instant précis qui suit immédiatement la détonation, est égale à la chaleur de détonation diminuée de celle qui équivaut au travail mécanique représenté par la rupture du tube et la projection de ses fragments.

Pour déduire de la quantité de chaleur q observée dans notre calorimètre à air, la quantité de chaleur Q réellement développée par la détonation, il faudrait connaître le rapport $\frac{q}{Q}$. Ce rapport varie nécessairement avec la nature et les dimensions du tube. Il varie aussi avec la nature de l'explosif. Le tableau suivant montre cependant que, au moins pour les explosifs dont le mode d'action n'est pas trop différent, $\frac{q}{Q}$ reste, pour un même tube, à peu près indépendant de la nature de l'explosif. Les expériences relatées dans ce tableau ont, d'ailleurs, été faites avec des substances dont on était assuré que la détonation était complète dans le tube métallique, de sorte que Q était connu avec certitude.

NATURE de l'explosif	POIDS de l'explosif	P	Q déduit pour 100 gr.	Q théorique pour 100 gr.	$\frac{q}{Q}$	$\frac{q}{Q}$ moyen
1° *Tubes d'étain de* 25mm/31mm.						
Dynamite.	50gr	0,69	81	97,2	0,83	0,80
80 dyn. 20 az. amm. .	id.	0,59	69	85,4	0,80	
70 — 30 —	id.	0,53	62	79,4	0,78	
2° *Tubes d'étain de* 25mm/40mm.						
Dynamite.	50	0,52	61	97,2	0,63	0,67
90 dyn. 10 az. amm. .	id.	0,52	61	91,3	0,66	
80 — 20 —	id.	0,51	60	85,4	0,69	
70 — 30 —	id.	0,47	55	79,4	0,69	
3° *Tubes d'étain de* 25mm/45mm.						
Dynamite.	50	0,48	56	97,2	0,58	0,61
70 dyn. 30 azot. . . .	id.	0,44	51,4	79,4	0,65	
4° *Tubes de plomb de* 30mm/35mm.						
Dynamite.	50	0,56	65,4	97,2	0,67	0,67
5° *Tubes de plomb de* 32mm/42mm.						
Dynamite.	50	0,46	53,8	97,2	0,55	0,55

Les expériences de cette nature ne peuvent d'ailleurs être qu'approximatives, car nous avons montré que la quantité de chaleur transformée en travail varie avec la manière dont l'explosif est tassé dans le tube, et, quel que soit le soin qu'on y apporte, il est impossible de répondre que le tassement se fait toujours de la même façon.

Quoi qu'il en soit, on voit que, au moins pour les explosifs que nous aurons à expérimenter, on peut se rendre compte, d'une manière assez précise, de la manière dont un explosif détone dans un tube, ou, pour parler plus exactement, de la quantité de chaleur qu'il développe en détonant ainsi, en multipliant la quantité de chaleur observée q par l'inverse du rapport $\frac{q}{Q}$ inscrit au tableau précédent et se rapportant au tube employé.

Recherches expérimentales.

Lorsque l'onde explosive se propage à travers une substance susceptible de la transmettre, cette propagation s'accompagne de certaines réactions chimiques qui constituent ce qu'on nomme la décomposition de l'explosif. Pour étudier le mode de cette décomposition, il faut distinguer deux classes d'explosifs :

1° Les explosifs simples ou formés d'une seule substance chimique ;

2° Les explosifs binaires ou en général multiples, formés du mélange intime de deux ou plusieurs substances.

Nous allons étudier successivement chacune de ces deux catégories.

1° Explosifs simples.

Lorsque l'explosif simple contient assez d'oxygène pour sa combustion complète, on sait que le mode de décomposition, sous l'influence de l'onde explosive, correspond en général à cette combustion même.

Les expériences rapportées plus haut et concernant la nitromannite et la dynamite montrent en effet une parfaite concordance entre la quantité de chaleur déduite de cette règle et celle qui a été expérimentalement observée.

L'azotate d'ammoniaque doit, comme explosif, être rangé dans cette catégorie. Mais cette substance possède une aptitude à la détonation beaucoup moins grande que celle des précédentes, et nous ne croyons même pas que la détonation en ait encore été directement constatée. En l'employant à l'état sec et pulvérulent et la bourrant dans un tube d'étain de $25^{mm}/45^{mm}$, nous avons obtenu la détonation franche d'une cartouche de 50 grammes sous l'influence d'une capsule contenant $1^{gr},50$ de fulminate. La quantité de chaleur dégagée a été de 27 calories pour 100 grammes, tandis que la théorie exige 38 calories pour le mode de décomposition représenté par la formule

$$Az^2H^4O^3 = Az^2 + H^3O + O.$$

L'onde explosive n'a donc pas parcouru toute la cartouche, ou plutôt il s'est produit un autre mode de décomposition. M. Berthelot a, on le sait, particulièrement insisté sur les nombreux modes de décomposition que peut prendre l'azotate d'ammoniaque.

Lorsque l'explosif ne contient pas assez d'oxygène pour la combustion complète de tous ses éléments, le mode de décomposition que produit l'onde explosive est peu connu. Si l'explosif contient du carbone et si l'oxygène est insuffisant pour le brûler entièrement à l'état d'oxyde de carbone, on peut admettre que l'oxygène est employé tout entier à former de l'oxyde de carbone, le reste du carbone restant libre. Le mode de décompo-

sition est exprimé par la formule

$$C^p H^{2q} O^r Az^{2s} = rCO + C^{p-r} + H^{2q} + Az^{2s}.$$

C'est le mode de décomposition qui a été observé par MM. Berthelot et Vieille pour l'azotate de diazobenzol, si l'on néglige des produits secondaires qu'on peut croire dus à des réactions postérieures à la détonation.

Lorsque l'oxygène est plus que suffisant pour transformer tout le carbone en oxyde de carbone, l'excès d'oxygène se partage entre l'oxyde de carbone et l'hydrogène suivant une loi encore inconnue. MM. Mallard et Le Chatelier ont montré, dans une note jointe au précédent rapport, que, quelle que soit cette loi, on ne s'écartait pas beaucoup de la vérité en admettant que, dans ce cas, la quantité d'hydrogène restée libre après la décomposition est la moyenne entre les quantités minima et maxima qu'il est permis de supposer.

Lorsque les gaz produits par la décomposition de l'explosif sont combustibles, ils peuvent venir brûler dans l'air extérieur. Toutefois cette combustion, postérieure à la détonation proprement dite, ne se produit pas dans tous les cas. En effet, la Commission n'a pas constaté la combustion, par l'air extérieur, des gaz que produit la détonation, à l'air libre, de la cellulose endécanitrique (fulmicoton de guerre), tandis qu'elle a constaté ce phénomène pour les gaz produits par la détonation à l'air libre des celluloses ennéanitrique (coton de mine) et octonitrique.

La Commission a d'ailleurs constaté qu'un abaissement de température des gaz de la détonation peut supprimer cette combustion ultérieure. En effet, si les gaz provenant de la détonation du coton octonitrique viennent brûler à l'air lorsqu'ils détonent sans enveloppe résistante, ils ne brûlent plus lorsque la détonation a lieu dans un tube d'étain de 25/40 ou même dans un tube d'étain de 25/31. La détonation est même incomplète dans ces conditions. C'est ce que montre le tableau suivant :

		POIDS de la cartouche	POIDS du fulminate	PRESSION en mètres d'eau	Q déduit pour 100 gr.	Q calculé pour 100 gr.
Coton octonitrique.	Nue	30gr	1gr,5	0,52	100cal	72cal (*)
Id.	Sn 25/31	50	id.	0,39	53	id.
Id.	Sn 25/40	id.	id.	0,28	52	id.

(*) Ce nombre descendrait à 63 si l'on admettait, ce qui n'est pas invraisemblable, que la décomposition, sous l'influence de l'onde explosive, entraîne la combustion complète de l'hydrogène du coton octonitrique.

2° Explosifs binaires.

On peut distinguer deux cas principaux :

1° Les gaz produits par la décomposition simultanée des deux substances mélangées sont incapables de réagir les uns sur les autres ;

2° Les gaz produits par la décomposition simultanée des deux substances peuvent réagir les uns sur les autres.

Dans chacun de ces deux cas, nous aurons à distinguer la détonation à l'air libre sans enveloppe et la détonation dans une enveloppe plus ou moins résistante.

1er CAS. — *Gaz de la détonation ne pouvant pas réagir mutuellement.*

La Commission a étudié les mélanges de *dynamite et d'azotate d'ammoniaque*, ainsi que ceux de *dynamite et d'alun d'ammoniaque*.

Mélanges de dynamite et d'azotate d'ammoniaque.

1° *Détonation à l'air libre.* — On a fait détoner dans la chaudière, à l'air libre, des mélanges dans lesquels l'azotate d'ammoniaque se trouve en proportions graduelle-

ment croissantes à partir de 10 p. 100. Les résultats sont consignés dans le tableau suivant :

	POIDS de la cartouche	PRESSION observée en m. d'eau	Q DÉDUIT pour 100 gr.	Q CALCULÉ pour 100 gr.
	gr.		cal.	cal.
10 dynam. 90 azotate. . .	50	0,08	9,4	44
20 — 80 — . . .	50	0,17	20	50
Id. — id. — . . .	50	0,24	28	id.
30 — 70 — . . .	50	0,30	35	56
40 — 60 — . . .	50	0,45	53	62
50 — 50 — . . .	50	0,53	61	68
60 — 40 — . . .	30	0,36	70	73

Nota. — Dans toutes ces expériences, la capsule contenait $1^{gr},50$ de fulminate.

On voit, par ce tableau, que la décomposition totale de l'explosif n'est obtenue que pour les mélanges contenant plus de 50 p. 100 de dynamite. Pour les autres mélanges, la décomposition va croissant, et même d'une manière sensiblement proportionnelle, avec la proportion de dynamite.

On n'arrive pas, dans ce dernier cas, à rapprocher notablement la décomposition de l'explosif de la décomposition théorique, en augmentant la charge de fulminate. En effet, le mélange 20 dyn., 80 azotate a donné, sous l'influence de 4 grammes de fulminate, une pression égale à $0^{m},25$, à peine différente de la pression $0^{m},24$ obtenue avec $1^{gr},50$ de fulminate.

2° *Détonation dans des vases résistants.* — En faisant détoner une cartouche de 50 grammes du mélange de 20 dyn. et 80 azotate dans le tube d'étain de $25^{mm}/31^{mm}$, on obtient une pression de $0^{m},22$ qui, en tenant compte de la quantité de chaleur convertie en travail, correspond à 32 calories. A l'air libre, on avait trouvé 28 calories, ce qui est assez peu différent.

En faisant détoner une cartouche de 50 grammes du même mélange dans un tube de $25^{mm}/40^{mm}$, on obtient 53 calories, ce qui correspond presque exactement à la décomposition complète de la dynamite et de l'azotate.

La décomposition qui, à l'air libre et dans le tube de $25^{mm}/31^{mm}$, se fait à peu près de la même façon et reste incomplète, devient donc complète dans le tube de $25^{mm}/40^{mm}$.

Mélanges divers.

La Commission avait essayé, dans les mêmes conditions, la détonation d'un mélange de 67 de dynamite et 33 d'alun d'ammoniaque. La quantité de chaleur de la déshydratation de l'alun d'ammoniaque est d'environ 350^{cal} par kilogramme. La détonation complète de la dynamite et la déshydratation complète de l'alun dans le mélange expérimenté donneraient une quantité de chaleur de 53^{cal} pour 100 grammes ; la détonation de la dynamite, l'alun restant inaltéré, donnerait 66^{cal}.

La détonation à l'air libre a donné 52^{cal}, ce qui s'accorderait avec une déshydratation totale de l'alun. Mais il est vraisemblable que c'est là une simple coïncidence, et que la détonation à l'air libre n'est qu'incomplète, car, dans le tube d'étain de 25/40, la détonation a donné 71^{cal}, c'est-à-dire à très peu près la quantité de chaleur correspondant à la détonation de la dynamite, sans la diminution qu'aurait entraînée la déshydratation de l'alun.

L'alun ammoniacal n'a donc pas le temps de se déshydrater, au moins d'une manière importante, pendant la détonation de la dynamite, même lorsque la détonation se fait dans un vase à parois résistantes. Il en serait sans doute tout autrement dans un vase complètement clos et de capacité invariable.

Nous rappellerons simplement que la Commission était arrivée à conclure que, même dans des tubes d'étain de

25/40, les mélanges de dynamite et de chlorhydrate d'ammoniaque détonent sans entraîner, en proportion notable, la décomposition du chlorhydrate.

En *résumé*, il semble résulter des faits précédents, que, lorsque l'on fait détoner un mélange de plusieurs substances dont les produits de décomposition ne réagissent pas mutuellement, les substances qui ne sont pas explosives, c'est-à-dire dont la décomposition absorbe de la chaleur, ne se décomposent que peu ou point pendant la propagation de l'onde explosive ; leur décomposition n'a lieu que dans la détonation en vase clos.

Pour les mélanges de dynamite et d'azotate d'ammoniaque, la décomposition n'est complète, à l'air libre ou dans des tubes d'étain de 25/31, que lorsque la proportion de dynamite est supérieure à 50 p. 100. Elle est complète au contraire dans des tubes d'étain de 25/40, au moins lorsque la proportion de dynamite est égale ou supérieure à 20 p. 100.

2e Cas. — *Gaz de la détonation pouvant réagir mutuellement.*

La Commission a expérimenté un grand nombre de mélanges formés en ajoutant à l'azotate d'ammoniaque une substance combustible ou se décomposant par la détonation en produits combustibles.

Détonation à l'air libre.

Mélanges de coton octonitrique et d'azotate d'ammoniaque. — Le tableau suivant donne les résultats obtenus en faisant détoner à l'air libre des mélanges, en diverses proportions, de coton octonitrique et d'azotate d'ammoniaque.

Détonation à l'air libre.

			POIDS de la cartouche	POIDS du fulminate	PRESSION en cm. d'eau	Q DÉDUIT pour 100 gr.	Q CALCULÉ (*) pour 100 gr.	OBSERVATIONS
			gr.	gr.				
10	coton octonitr.	90 azot.	50	1,5	0,25	29	41	Matière pulvérulente.
15	—	85 —	25	1,5	0,16	38	43	Id.
20	—	80 —	50	1,5	0,15	18	44	Matière comprimée, probablement humide.
	Id.		30	1,5	0,13	25	»	Mat. pulvérulente, probablement humide.
	Id.		50	1,5	0,34	40	»	Mat. pulvérulente sèche.
	Id.		50	1,5	0,38	44	»	Id.
	Id.		50	1,5	0,38	44	»	Id.
	Id.		25	4,0	0,21	49	»	Id.
25	—	75 —	50	2 am. de 1g,5	0,41	48	47	Id.
30	—	70 —	25	1,5	0,20	47	48	Id.
35	—	65 —	30	1 am. de 1g,5	0,17	33	50	Mat. pulvérulente, probabl. un peu humide.
	Id.		50	id.	0,43	50	»	Mat. comprimée sèche.
40	—	60 —	30	id.	0,27	53	52	Id.
60	—	40 —	30	id.	0,35	68	59	Id.
70	—	30 —	50	id.	0,92	107	62	Matière pulvérulente.
80	—	20 —	30	id.	0,63	123	66	Matière comprimée.
90	—	10 —	30	id.	0,94	183	69	Id.
100	—	0 —	30	id.	0,59	115	73	Matière pulvérulente.

(*) Les quantités de chaleur inscrites dans cette colonne sont calculées dans l'hypothèse de la décomposition des deux substances mélangées, sans réaction ultérieure.

Il est intéressant de comparer les quantités de chaleur directement observées avec celles qui ont été calculées dans l'hypothèse où les deux substances mélangées sont décomposées simultanément par l'onde explosive, mais où les produits de cette décomposition, les uns comburants, les autres combustibles, ne réagissent pas mutuellement.

On constate en effet que, tant que le coton n'est pas en excès, c'est-à-dire n'atteint pas 60 p. 100, les quantités de chaleur maxima, qui paraissent correspondre à la limite de la détonation, et que l'on observe pour un mélange donné en provoquant la détonation par de très puissantes amorces, sont égales aux quantités de chaleur calculées. Les choses se passent donc comme si l'onde explosive provoquait la décomposition des deux substances explosives mélangées sans que les gaz produits par cette décomposition aient le temps, avant d'être dispersés dans l'air ambiant, de réagir les uns sur les autres.

Lorsque la proportion de coton octonitrique dépasse 60 p. 100, les gaz produits par la décomposition de ce coton viennent brûler, plus ou moins complètement, au contact de l'air, et la quantité de chaleur observée est alors supérieure à celle qui résulterait même de la réaction mutuelle et complète de l'oxygène de l'azotate sur les produits gazeux de la décomposition du coton.

Mélanges de binitrobenzine et d'azotate d'ammoniaque. — Ces mélanges sont formés en mélangeant l'azotate sec et pulvérulent à la binitrobenzine fondue. Ils ont donné, en détonant à l'air libre, les résultats suivants :

Détonation à l'air libre.

	POIDS de la cartouche	POIDS du fulminate	PRESSION observée	Q déduit pour 100 gr.	Q calculé	
	gr.	gr.				
17,5 binitrobenzine, 82,5 azotate (bellite).	50	1,5	0,25	29	41	Matières pulvérulentes.
	id.	id.	0,28	33	»	
	id.	2 am. de 1,5	0,34	40	»	
10 binitrob., 90 azot.	25	1,5	0,16	37	39	

Les choses se passent encore ici comme si la limite de la détonation correspondait à la décomposition simultanée, mais sans réaction mutuelle ultérieure, des produits de cette décomposition.

Mélanges de picrate et d'azotate d'ammoniaque. — Les expériences suivantes ont été faites sur des mélanges pulvérulents et secs de picrate et d'azotate d'ammoniaque, tassés à la main dans des cylindres en papier.

	POIDS de la cartouche	POIDS du fulminate	PRESSION en m. d'eau	Q déduit pour 100 gr.	Q' calculé (*)	Q'' calculé (**)
Picrate pur. . . .	50	1gr,5	0	0	56	0
60 picr. 40 azot. .	id.	id.	0,14	16	49	15
50 — 50 —	id.	id.	0,15	18	47	19
40 — 60 —	id.	id.	0,19	22	45	23
28 — 72 —	id.	id.	0,17	20	43	27
20 — 80 —	id.	id.	0,23	27	42	30
10 — 90 —	id.	id.	0	0	40	34

(*) En admettant la décomposition simultanée des deux substances, mais sans réaction ultérieure.
(**) En admettant la décomposition de l'azote seul.

Ce tableau montre ce fait singulier que la quantité de chaleur dégagée par l'explosion croît assez régulièrement avec la proportion d'azotate, et que les choses se passent à peu près comme si l'onde explosive produisait seulement la décomposition de l'azotate sans produire celle du picrate.

Mélanges divers. — On a aussi fait détoner à l'air libre des cartouches formées par des mélanges d'azotate d'ammoniaque avec diverses substances combustibles, mais ne détonant pas à l'air libre sous l'influence des amorces, telles que la naphtaline, la colophane, le goudron de houille, les huiles lourdes du gaz. La détonation de ces mélanges à l'air libre est très incomplète et ne donne que des pressions peu considérables qui indiquent que, au moins dans le plus grand nombre des cas, l'onde explo-

sive s'évanouit avant d'avoir parcouru toute la masse de l'explosif.

Résumé. — En résumé, les mélanges formés en ajoutant à l'azotate d'ammoniaque diverses substances combustibles, explosives ou non, détonent toujours à l'air libre d'une façon très incomplète. Tantôt l'onde explosive, provoquée en un point, s'évanouit certainement avant d'avoir parcouru la masse de l'explosif; tantôt les choses se passent comme si l'onde explosive, parcourant toute la cartouche, se bornait à provoquer la décomposition des substances explosives que contient le mélange, les gaz provenant de cette décomposition étant dispersés avant de réagir mutuellement.

Détonation dans un vase massif et résistant.

Examinons maintenant les effets de la détonation dans un vase résistant.

On a essayé la détonation dans un tube d'étain de 25/31. Les résultats ont été les suivants :

Détonation dans le tube d'étain de 25/31.

	POIDS de la cartouche	POIDS du fulminate	PRESSION observée	Q déduit pour 100gr	Q calculé p. 100gr (*)	OBSERVATIONS
	gr.			cal.		
20 coton octonit. 80 azot.	50	1gr,5	0,34	50	44	Mat. pulvérulente.
90 coton octonit. 10 azot.	30	id.	0,27	66	69(**)	id.
10 binitrobenz. 90 azot.	50	id.	0,30	44	39	id.
6 naphtaline 94 azot.	id.	id.	0,26	38	»	id.
10 naphtaline 90 azot.	id.	id.	0,28	41	»	id.
10 picrate d'am. 90 azot.	id.	id.	0,22	32	39	id.
20 — 80 —	id.	id.	0,30	40	41	id.
28 — 72 —	id.	id.	0,35	51	43	id.
40 — 60 —	id.	id.	0,35	51	45	
50 — 50 —	id.	id.	0,34	50	47	
60 — 40 —	id.	id.	0,30	40	49	
100 — 0 —	id.	id.	0,13	19	56	
8 goudron. . . 92 azot.	id.	id.	0,27	39	»	Chauffé 1h à 65°.
12 — 88 —	id.	id.	0,09	13	»	Non chauffé.
10 huiles lourdes. 90 az.	id.	id.	0,20	29	»	

(*) Les quantités de chaleur sont calculées dans l'hypothèse de la décomposition simultanée des deux substances *sans réaction ultérieure.*

(**) 61 si l'on admet l'oxydation complète de l'hydrogène du coton octonitrique.

Pour les mélanges à base de coton octonitrique et de binitrobenzine, la détonation s'est faite dans le tube d'étain de 25/31 à peu près de la même façon qu'à l'air libre; la réaction mutuelle des produits de la détonation ne paraît pas s'être produite, sans doute en raison de la résistance insuffisante opposée à l'expansion des gaz. On remarquera que les gaz provenant de la décomposition du mélange 90 coton et 10 azotate ne se sont pas enflammés au contact de l'air, comme ils le faisaient après la détonation sans enveloppe.

Les mélanges de naphtaline et d'azotate, qui ne détonaient pas à l'air libre, détonent en dégageant des quantités de chaleur qu'on peut considérer comme égales à celles que dégagerait la décomposition de l'azotate seul.

La quantité de chaleur dégagée par le mélange 8 goudron — 92 azotate est très peu supérieure à celle que dégageait la décomposition de l'azotate seul, et qui est égale à 35 calories.

La quantité de chaleur dégagée par le mélange 10 huiles lourdes — 90 azotate, est un peu inférieure à celle (36^{cal}) que dégageait la décomposition de l'azotate seul.

Quant aux mélanges de picrate et d'azotate d'ammoniaque, les quantités de chaleur dégagées sont en général légèrement supérieures à celles qui résulteraient de la décomposition simultanée sans réaction mutuelle. La plupart des tubes ont éclaté d'une façon bien complète, et il ne restait dans la chaudière que le culot contenant la bourre placée au-dessus de l'explosif. Les culots des tubes contenant les mélanges 10/90 et 60/40 étaient cependant de 1 à 2 centimètres plus longs que la bourre, ce qui montre que le fond de la cartouche n'a pas détoné. Pour ces mélanges, les quantités de chaleur observées sont en effet inférieures à la quantité qui résulterait de la décomposition simultanée sans réaction mutuelle.

Les résultats obtenus par la détonation dans le tube d'étain de 25/40 sont très différents des précédents, comme le montre le tableau qui suit :

Détonation dans le tube d'étain de 25/40.

	POIDS de la cartouche	POIDS du fulminate	PRESSION observée	Q déduit pour 100^{gr}	Q calculé (*)	OBSERVATIONS
	gr.					
10 coton octonit. 90 azot.	50	1,5	0,27	49	59	Mat. pulvérul. probl^{t} un peu humide.
15 — 85 —	25	1,5	0,20	72	70	Mat. pulv. bien sèche.
20 — 80 —	»	»	0,21	84	80	id.
30 — 70 —	50	»	0,42	75	88	id.
60 — 40 —	30	»	0,30	90	96	id.
80 — 20 —	»	»	0,28	84	82	id.
90 — 10 —	»	»	0,23	69	76	id.
17 binitrob. 83 azotate (Bellite).	50	»	0,51	95	100	id.
10 binitrob. 90 azotate .	25	»	0,18	65	74	id.
9 mononitronapht. 91 az.	50	1,5	0,42	75	97	id.
6 naphtaline, 94 azotate.	id.	id.	0,38	68	94	id.
10 naphtaline, 90 azotate.	id.	id.	0,29	52	92	id.
10 picr. . . . 90 azot.	id.	id.	0,22	40	60	id.
20 — 80 —	id.	id.	0,31	56	83	id.
28 — 72 —	id.	id.	0,31	56	100	id.
40 — 60 —	id.	id.	0,36	65	94	id.
50 — 50 —	id.	id.	0,30	54	90	id.
60 — 40 —	id.	id.	0,27	48	85	id.
100 — 0 —	id.	id.	0,16	28	»	
8 goudron . . 92 —	id.	id.	0,23	41	»	Chauffé 1^{h} à 65°.
12 — 88 —	id.	id.	0,12	22	»	Non chauffé.
10 huiles lourdes. 90 az.	id.	id.	0,21	38	»	

(*) Les quantités de chaleur sont calculées dans l'hypothèse qu'après la décomposition des deux substances, les gaz réagissent complètement les uns sur les autres.

Les mélanges à base de coton octonitrique et de binitrobenzine donnent bien en détonant dans les tubes de 25/40, les quantités de chaleur correspondant à la détonation complète.

Pour les mélanges à base de mononitronaphtaline, de naphtaline ou de picrate, les quantités de chaleur sont en général beaucoup plus grandes que celles qui correspondent à la décomposition de l'azotate d'ammoniaque ou à la décomposition simultanée des deux substances, mais elles sont plus ou moins inférieures à celles qui résulteraient de la détonation complète.

Pour les mélanges de picrate, sauf pour ceux qui contiennent 10, 20 et 60 de picrate, on s'est assuré que les tubes métalliques étaient complètement brisés dans toute la partie qui contenait l'explosif, ce qui semble indiquer que toute la cartouche a détoné, bien que les quantités de chaleur observées soient très inférieures à celles qui auraient dû se développer si les réactions mutuelles des gaz produits avaient eu lieu intégralement.

Pour les mélanges à base de goudron et d'huiles lourdes, les quantités de chaleur dégagées sont à peine supérieures à celles qui résulteraient de la décomposition de l'azotate seul.

On a fait enfin quelques expériences dans des tubes d'étain de 25/45; les résultats n'ont pas été très différents de ceux qu'on avait obtenus avec les tubes de 25/40.

RECHERCHE DES EXPLOSIFS PRÉSENTANT DES GARANTIES SUFFISANTES DE SÉCURITÉ.

La Commission, dans son précédent rapport, avait posé les principes qui doivent guider dans la recherche des explosifs propres à assurer la sécurité des mines à grisou. Les expériences faites depuis la rédaction de ce rapport sont venues confirmer ces principes et permettre de les compléter sur certains points.

La Commission a constaté que des explosifs détonant dans des tubes métalliques ne cessent d'allumer les mélanges grisouteux les plus explosifs que lorsque le travail imposé aux gaz provenant de la détonation est suffisant pour abaisser la température théorique de ceux-ci au-dessous de 2.200 degrés environ. Elle en a conclu que les explosifs à employer dans les mines à grisou doivent être cherchés parmi ceux dont la température de détonation est inférieure à ce chiffre, et dont les gaz, après la décomposition, ne sont plus combustibles. Parmi les explosifs simples, on ne connaît actuellement que l'azotate d'ammoniaque qui réalise cette double condition; mais cette substance, comme on l'a vu plus haut, ne détone qu'imparfaitement lorsqu'elle est seule, et sa *force explosive* est peu considérable. Il faut donc recourir nécessairement à un explosif binaire.

La Commission a écarté de la composition des mélanges binaires susceptibles d'être employés, les substances qui, non explosives par elles-mêmes, ne sont pas combustibles. Ces substances, en effet, ne se décomposent pas, ainsi qu'on l'a vu plus haut, sous l'influence de l'onde explosive. Dans la détonation à l'air libre, elles n'agissent donc qu'en refroidissant les gaz par leur capacité calorifique, ce qui oblige à les employer en grand excès. Mais alors, dans la détonation en vase clos, la décomposition, venant à se produire, absorbe une grande quantité de chaleur et diminue trop la force de l'explosif.

Il ne reste donc plus à recourir qu'à des mélanges binaires de deux catégories. Ou bien les deux substances mélangées sont toutes deux explosives et comburantes; ou bien, l'une des substances étant explosive et comburante, l'autre, explosive ou non, est susceptible d'être brûlée par l'excès d'oxygène que donne la décomposition de la première.

Mélanges de deux substances comburantes.

Mélanges de dynamite et d'azotate d'ammoniaque. — Examinons d'abord le premier cas. Les seuls explosifs actuellement connus qui se décomposent avec excès d'oxygène, sont la nitroglycérine, la nitromannite et l'azotate d'ammoniaque. La température de détonation de la nitroglycérine est de 3.150 degrés environ; celle de la détonation de la nitromannite est à peu près la même. Il est donc impossible d'employer ces explosifs seuls ou mélangés ensemble. La nitromannite est d'ailleurs une substance dont le prix serait assez élevé. Les seuls mélanges qu'on puisse tenter sont ainsi ceux de nitroglycérine et d'azotate d'ammoniaque. La Commission a toujours employé pour ses essais la nitroglycérine à l'état de dynamite, c'est-à-dire mélangée à 25 p. 100 de silice absorbante. Dans la fabrication en grand, il y aurait lieu de voir si l'on peut supprimer la silice et se servir de l'azotate d'ammoniaque comme corps absorbant, sans risquer de voir, sous l'influence de l'humidité atmosphérique, l'eau chasser de l'azotate la nitroglycérine, faire ainsi exsuder celle-ci et rendre l'explosif dangereux à manier.

On a vu, dans le précédent rapport, que le mélange de dynamite et d'azotate d'ammoniaque, dont la température de détonation est de 2.200 degrés, contient 60 p. de dynamite et 40 p. d'azotate. Ce mélange et tous ceux qui contiennent une proportion d'azotate supérieure, peuvent donc être considérés comme présentant un certain degré de sécurité en présence du grisou, *dans l'usage ordinaire*, c'est-à-dire lorsqu'ils détonent bourrés, même légèrement, dans un trou de mine. On a pu, en effet, faire détoner à l'air libre, dans le mélange d'air et de grisou, une cartouche de 50 grammes contenant 60 p. de dynamite et 40 p. d'azotate sans produire l'inflammation du

mélange grisouteux. Ce fait est d'autant plus confirmatif des théories présentées par la Commission, que ce mélange détone complètement, comme on l'a vu plus haut, à l'air libre, et que la cartouche a ainsi développé certainement au milieu du gaz, la température de 2.200 degrés ou une température très voisine.

La sécurité dans l'emploi des explosifs bourrés au fond d'un trou est évidemment la plus importante à assurer, car il faut poser, comme règle absolument impérative, que les explosifs ne seront jamais employés autrement, et qu'on ne doit, en aucun cas et sous aucun prétexte, en produire la détonation sans enveloppe, à l'air libre. Toutefois, on peut craindre que cette règle, si impérative qu'elle doive être, vienne à être violée, soit par une faute lourde d'un ouvrier, soit par un accident, assez difficile à imaginer sans doute, mais qui n'est pas tout à fait impossible, et qu'il convient de prévoir.

Or, les expériences de la Commission, d'accord avec les expériences prussiennes, ont montré que la détonation des explosifs sans enveloppe donne lieu à des phénomènes qui ne se reproduisent pas toujours identiques à eux-mêmes. Si les substances dont la température de détonation à l'air libre est supérieure à 2.200 degrés, tels que la dynamite ou les mélanges de dynamite et d'azotate contenant plus de 60 p. de dynamite, allument toujours les mélanges grisouteux au milieu desquels ils détonent sans enveloppe, des mélanges dont la température de détonation est inférieure à 2.200 degrés peuvent, en détonant dans les mêmes conditions, sous des causes mal définies et qui paraissent même difficiles à prévoir, produire l'inflammation du gaz. Aussi, la Commission avait pris grand soin de signaler « la complexité et le peu de fixité des phénomènes qui peuvent se présenter dans la détonation des explosifs à l'air libre. »

Nous avons vu plus haut qu'en ce qui regarde les mé-

langes de dynamite et d'azotate, la détonation à l'air libre se produit toujours, au point de vue de la quantité de chaleur développée, dans des conditions bien définies. Il n'y a d'irrégularités que dans le phénomène de l'inflammation du mélange grisouteux extérieur. Il semble donc possible, sinon vraisemblable, que ces irrégularités tiennent à l'imperfection, presque impossible à éviter absolument, du mélange des deux substances. On conçoit qu'une parcelle de dynamite puisse détoner seule à la surface de la cartouche et produire l'inflammation du gaz. S'il en est ainsi, on aura d'autant plus de chances d'inflammation que la surface de la cartouche sera plus grande, c'est-à-dire que la cartouche sera plus volumineuse. On aura aussi d'autant plus de chances d'éviter l'inflammation que la quantité d'azotate sera plus considérable par rapport à celle de la dynamite. Ces deux conséquences sont d'accord avec les faits.

La Commission, pour déterminer les proportions du mélange de dynamite et d'azote qu'il convient de recommander aux exploitants de mine, a fait détoner à l'air libre des mélanges dans lesquels on augmentait graduellement la proportion d'azotate et qu'on plaçait chaque fois dans les conditions les plus dangereuses, en faisant croître le poids de la cartouche. On a obtenu ainsi les résultats suivants :

	CARTOUCHES DU POIDS DE		
	50gr	100gr	200gr
60 p. dynamite. 40 azotate	1 exp. N(*)	»	»
50 — 50 —	2 exp. N	1 exp. I	»
40 — 60 —	2 exp. N	1 exp. I	»
30 — 70 —	1 exp N	2 exp. N	2 exp. N
20 — 80 —	1 exp. N	3 exp. N	2 exp. N

(*) N veut dire *Non-inflammation*, I, *Inflammation* du mélange gazeux.

On a vu d'ailleurs qu'une cartouche de 50 grammes du mélange, 20 dyn. 80 az., a pu détoner au milieu d'un mélange d'air et de gaz d'éclairage sans l'allumer.

On peut donc considérer comme présentant de très hautes garanties de sécurité le mélange à 20 dyn. 80 az. et même le mélange à 30 dyn. 70 az.

Ces deux mélanges constituent d'ailleurs des explosifs énergiques. On a en effet :

	f (*)	Q_k
Dynamite.	8.490	1.109
30 dynamite. 70 azotate	6.750	600
20 — 80 —	6.260	530

(*) f est le coefficient que nous avons appelé dans le premier rapport la *force explosive*; Q_k est la quantité de chaleur dégagée par la détonation d'un kilogramme de substance.

La pression obtenue, en vase clos, pour le mélange 20 dyn. 80 az., à densité de chargement égale, serait donc à peu près les 0,74 de celle qu'on obtient avec la dynamite. Il est vrai que le pouvoir de déblaiement serait environ moitié moindre, mais c'est, dans les mines, l'élément qui joue le rôle le moins important.

La Commission a constaté que ces explosifs détonent complètement sous l'influence d'amorces renforcées contenant seulement 0gr,50 de fulminate.

Mélanges formés d'une substance comburante et d'une substance combustible.

Passons maintenant aux mélanges dans lesquels un des explosifs est comburant, et l'autre combustible. L'excès d'oxygène libre dans les produits de l'explosif comburant étant toujours faible, on est amené, lorsqu'on veut arriver à la combustion complète, ce qui est une

garantie nécessaire de sécurité, à employer une proportion considérable de cet explosif. Avec la dynamite et la nitromannite on serait conduit à des températures de détonation inadmissibles. Le seul explosif comburant qu'on puisse employer est donc l'azotate d'ammoniaque.

Quant à l'explosif combustible, le choix en est au contraire très grand; on peut recourir à la cellulose plus ou moins nitrée, à la binitrobenzine, à la naphtaline mononitrée, au nitrate de diazobenzol, aux divers carbures d'hydrogène solides ou liquides, etc.

Mélanges de coton nitré et d'azotate d'ammoniaque. — Après divers essais, la Commission s'est arrêtée au coton octonitrique, titrant environ 173^{cc} de bioxyde d'azote au gramme. On obtient ainsi un explosif d'un prix moins élevé que si l'on recourait à un coton plus fortement nitré, et l'on abaisse, toutes choses égales, la température de la détonation.

On avait pensé à employer ces mélanges à l'état comprimé, ce qui eût permis de les protéger plus efficacement contre l'humidité; mais des expériences spéciales ont appris que, dès que la compression atteint 25 atmosphères, l'explosif détone mal sous l'influence d'une amorce de 1^{gr},50. On s'est donc contenté de tasser la substance à la main dans des cylindres en papier paraffiné. Une seconde enveloppe, également en papier paraffiné, achève la protection de la matière contre l'humidité atmosphérique.

La combustion complète du coton octonitrique est obtenue avec le mélange 30 coton 70 azotate. C'est donc seulement à ce mélange ou aux mélanges plus chargés en azotate qu'on peut s'adresser, puisqu'on doit se poser comme condition, que, dans la détonation en vase clos, ou après le bourrage au fond du trou, les gaz de la détonation ne soient pas combustibles, c'est-à-dire ne contiennent ni hydrogène ni oxyde de carbone.

On a procédé comme pour les mélanges de dynamite et d'azotate en soumettant à des essais variés des mélanges de plus en plus riches en azotate. Les résultats ont été les suivants :

	POIDS DES CARTOUCHES			
	30 ^{gr}	50 ^{gr}	100 ^{gr}	200 ^{gr}
30 coton 70 azotate. . . .	»	»	1 exp. N.	»
20 — 80 —	»	2 exp. N.	4 exp. N. 1 exp. I.	2 exp. I.
15 — 85 —	»	»	»	2 exp. N.

Le mélange 20 coton 80 azotate présente déjà un assez grand degré de sécurité, mais la sécurité du mélange 15 coton 85 azotate est plus élevée, c'est donc ce mélange ou des mélanges encore plus chargés en azotate qu'il convient de recommander.

L'explosif est suffisamment énergique, car on a :

	f	Q_k
Dynamite.	8.490	1.109
20 coton 80 azotate	7.610	810
15 coton 85 azotate	7.000	700

A densité de chargement égale les pressions seraient, pour le mélange 15 coton 85 azotate, les 0,83 des pressions données par la dynamite. Les quantités de chaleur disponibles sont dans le rapport de 0,64 à 1.

On s'est assuré que ces mélanges détonent mal lorsque le poids du fulminate de l'amorce est inférieur à 1^{gr},5.

Mélanges de binitrobenzine et d'azotate d'ammoniaque. — Ces mélanges sont faits en fondant la binitrobenzine

et y incorporant l'azotate d'ammoniaque pulvérisé très fin. Les grains d'azotate sont ainsi enrobés en quelque sorte par la binitrobenzine ; il en résulte que ces mélanges sont moins sensibles à l'influence de l'humidité atmosphérique que les mélanges de coton et d'azotate. On les protège d'ailleurs de même par une double enveloppe de papier paraffiné.

La combustion complète est obtenue pour un mélange de 12,5 de binitrobenzine et de 87,5 d'azotate. Le mélange présenté par M. Lamm sous le nom de *bellite* paraît formé par 15 p. de binitrobenzine et 85 p. d'azotate. Les proportions possibles du mélange sont très limitées. En procédant toujours de la même façon que pour les autres mélanges, on a obtenu les résultats suivants :

	40 gr	50 gr	100 gr	200 gr
20 p. binitrobenzine 80 p. azotate.	»	»	1 exp. N.	
Bellite	1 exp. N.	1 exp. N.	1 exp. N. 1 exp. I.	
10 p. binitrobenzine 90 p. azotate.	1 exp. N.	»	1 exp. N.	2 exp. N. 1 exp. I.

On voit que le mélange de 10 p. binitrobenzine et 90 p. azotate présente un assez haut degré de sécurité, puisque nous n'avons obtenu l'inflammation des gaz qu'avec une cartouche de 200 grammes et encore une fois seulement sur deux essais. On pourrait essayer de diminuer encore la proportion de binitrobenzine, et l'essai réussirait probablement, car le mélange à 10 p. de binitrobenzine détone encore très bien sous l'influence d'une amorce de 1gr,5. Il vaudra mieux se contenter de comprimer, s'il est possible, la substance qui, dans les précédentes expériences, a été employée à l'état pulvérulent.

Ce mélange est d'ailleurs suffisamment énergique, comme on le voit par le tableau suivant :

	f	Q_k
Dynamite	8.490	1.109
12,5 binitrobenzine 87,5 azotate	8.000	1.006
10 binitrobenzine 90 azotate	6.700	750

Le mélange à 10 p. 100 de binitrobenzine détone mal sous des amorces contenant moins de 1gr,5 de fulminate.

Mélanges de mononitronaphtaline et d'azotate d'ammoniaque. — La combustion complète a lieu pour un mélange de 9,15 de mononitronaphtaline et de 90,85 d'azotate. A l'état grené, ce mélange détone, quoique d'une façon incertaine, à l'air libre. Il a, sous cet état, donné les résultats suivants dans la détonation à l'air libre au milieu du grisou :

CARTOUCHES DE		
40 gr	50 gr	100 gr
1 exp. I.	3 exp. N.	2 exp. N. (*Détonation très incomplète.*)

Mélanges de naphtaline et d'azotate d'ammoniaque. On a essayé de mélanger la naphtaline à l'azotate d'ammoniaque.

Le mélange à combustion complète tient 6 naphtaline et 94 azotate. Nous l'avons préparé en versant l'azotate sec et pulvérisé dans la naphtaline fondue. Celle-ci paraît mouiller l'azotate plus difficilement que ne le fait la binitrobenzine. Il en résulte un enrobage moins parfait et une préservation plus incertaine de l'azotate contre l'humidité. Le mélange ne détone à l'air libre que d'une façon très imparfaite. Dans le tube d'étain de 25/31, l'onde explosive produit la décomposition, mais la détonation, encore très incomplète, ne paraît correspondre

qu'à la détonation de l'azotate seul (V. tableau, p. 337). Dans le tube d'étain de 25/40, la détonation n'est pas encore complète, mais elle approche de l'être, car on a observé la production de 68 calories pour 100 grammes, tandis que la théorie exige 94 calories (V. p. 339). On peut donc croire que dans des trous de mine convenablement bourrés, la détonation sera suffisante.

Dans un trou de mine de 1 mètre de profondeur, foré à Sevran dans une terre argileuse, une cartouche de 200 grammes, bourrée avec soin, a produit une chambre de compression, dont les trois dimensions principales ont été $0^m,50$ — $0^m,49$ — $0^m,45$.

Les expériences faites dans des mélanges d'air et de grisou ont donné les résultats suivants :

CARTOUCHES DU POIDS DE			
100gr		200gr	
Pression	Résultat	Pression	Résultat
$0^m,04$	N	0,07	N
		0,10	N

L'une des deux cartouches de 200 grammes expérimentées était soumise à l'influence de trois amorces renforcées de $1^{gr},5$; malgré cela la détonation a été extrêmement faible.

Deux cartouches, l'une de 75 grammes, l'autre de 110 grammes, bourrées dans des tubes d'étain de 25/31, ont détoné franchement sans allumer le grisou.

Des essais ont aussi été faits dans des mélanges d'air et de *gaz d'éclairage;* ils ont donné les résultats suivants :

CARTOUCHES DU POIDS DE			
100gr		200gr	
Pression	Résultat	Pression	Résultat
$0^m,03$	N	»	I
0 ,03	N		

Une cartouche du poids de 50 grammes bourrée dans un tube d'étain de 25/31 a détoné franchement sans allumer le mélange gazeux.

On n'a donc pu produire, en résumé, l'inflammation du gaz intérieur avec le mélange naphtaline-azotate, qu'avec une cartouche de 200 grammes, détonant à l'air libre dans un mélange d'air et de *gaz d'éclairage*.

Le mélange naphtaline-azotate pourra donc être d'un emploi avantageux et sûr si, comme il est très vraisemblable, son aptitude à la détonation est reconnue pratiquement suffisante.

Voici d'ailleurs les données physiques et chimiques de ce mélange :

Naphtaline et azotate d'ammoniaque.

$$C^{10}H^8 + 24Az^2H^4O^3 = 10CO^2 + 52H^2O + 24Az^2.$$
$$\varpi = 2048.$$

Q	Q_k	t	f	α
1930	943	2070°	8330	0,936

Des essais faits dans la bombe par M. Bruneau, avec 1 gramme de poudre fine comme allumeur, ont donné les résultats suivants :

$\Delta = 0,2$, $P = 1.850^k$, P théor. = 2.050,
$\Delta = 0,8$, $P = 3.246$, P théor. = 3.400.

Mélanges de goudron de houille et d'azotate d'ammo-

niaque. — On a essayé un mélange de 88 p. d'azotate d'ammoniaque avec 12 p. de goudron de houille *tout venant.*

La substance détone assez mal, même dans des tubes métalliques.

Dans le grisou, avec des cartouches de 200 grammes, on n'a produit l'inflammation qu'une fois sur trois expériences.

Dans les deux expériences qui n'ont pas produit l'inflammation, la pression qui a produit la détonation est montée, une fois à 50^{cm}, une autre fois à 56^{cm} d'eau.

Pour chasser les matières les plus volatiles, on a essayé de chauffer le mélange pendant deux heures à l'étuve à 65 degrés ; deux cartouches de 200 grammes de mélange ainsi traité ont détoné dans le grisou sans l'allumer, mais sans produire une pression notable dans la chaudière.

On a essayé aussi le mélange de 8 goudron et 92 azotate, chauffé pendant une heure à 65 degrés. Les résultats de détonation ont été, dans les mêmes conditions, meilleurs qu'avec le mélange précédent.

Dans le grisou, deux expériences faites avec des cartouches de 200 grammes ont donné dans la chaudière des pressions de 0,58 et 0,60 sans allumer le gaz; une troisième expérience l'a allumé.

Mélanges d'huiles lourdes de goudron avec l'azotate d'ammoniaque. — On a essayé le mélange de 10 d'huiles lourdes et 90 d'azotate.

Comme pour le mélange 8 goudron et 92 azotate séché 1 heure à 65 degrés, la décomposition, même dans le tube d'étain de 25/40, ne paraît correspondre qu'à la décomposition de l'azotate d'ammoniaque.

Dans le grisou, deux cartouches de 200 grammes ont détoné, en produisant des pressions insignifiantes et sans allumer le gaz.

Mélanges de colophane et d'azotate d'ammoniaque. — Le mélange de 10 p. 100 de colophane et d'azotate d'ammoniaque détone mal à l'air libre, mais il paraît détoner assez bien dans des tubes métalliques. Dans le grisou, il a donné les résultats suivants :

CARTOUCHES DE	
50^{gr}	200^{gr}
1 exp. N.	2 exp. N.

Mélanges de picrate d'ammoniaque et d'azotate d'ammoniaque. — Le picrate d'ammoniaque ($C^6H^6Az^4O^7 = 246^{gr}$) peut être supposé se décomposer suivant la formule

$$6CO + H^2O + 2H^2 + 2Az^2,$$

il dégage alors 137^{cal},8 (eau gazeuze) à volume constant, pour 246 grammes, soit 560 calories par kilogramme.

Son aptitude à la détonation est médiocre, car nous n'avons pu le faire détoner à l'air libre, et il ne détone que très incomplètement dans des tubes d'étain de 25/40.

La combustion complète exige le mélange de 27,7 picrate avec 72,3 azotate d'ammoniaque. Ce mélange ne détone que très incomplètement à l'air libre. (V. le tableau de la page 335.)

Nous avons essayé dans le mélange d'air et de grisou deux mélanges, l'un contenant 10 de picrate et 90 d'azotate, l'autre contenant 20 de picrate et 80 d'azotate. Les résultats ont été les suivants :

	Cartouches de 200^{gr}	
10 picr. 90 azot. . . .	2 exp. N.	Déton. très incomplète.
20 picr. 80 azot. . . .	1 exp. I.	

Ces mélanges ont d'ailleurs un très faible intérêt pratique, car ils seraient d'un prix relativement élevé et n'auraient d'avantages ni au point de vue de la force

explosive, ni au point de vue de l'aptitude à la détonation.

Mélanges d'azotate de cuivre ammoniacal et d'azotate d'ammoniaque. — On connaît, sous le nom d'azotate de cuivre ammoniacal ou d'azotate cupro-ammonique, un sel qui répond à la formule

$$Az^2O^5CuO,\ 4AzH^3 = 256^{gr},5,$$

et qu'on obtient aisément en beaux cristaux bleu indigo, lorsqu'on évapore à sec une dissolution d'azotate de cuivre saturée par l'ammoniaque. Sous l'action de la chaleur ce sel fond, d'abord, puis au bout d'un certain temps, déflagre en fusant sans produire une détonation proprement dite.

On a étudié les propriétés détonantes de ce composé, soit seul, soit mélangé avec l'azotate d'ammoniaque. Il a été constaté que le sel, soit pur, soit mélangé à 5/3 de son poids d'azotate d'ammoniaque détone franchement sous l'influence d'une amorce au fulminate de mercure.

La densité du sel est égale à 1,87.

Il détone très faiblement sous le marteau.

La chaleur de dissolution dans l'eau est négative et égale à $60^{cal},6$ pour 1 kilogramme, soit $15^{cal},48$ pour le double poids équivalent 255,5.

La chaleur de dissolution dans l'acide azotique étendu de $2^{cal},2$, est de 53 calories par kilogramme, soit $13^{cal},54$ pour le double poids équivalent.

De cette dernière donnée, combinée avec celles qui sont inscrites dans les tableaux donnés par M. Berthelot (*Annuaire du Bureau des longitudes*, 1888), on déduit aisément la chaleur de décomposition du sel en ses éléments gazeux, CuO étant supposé inaltéré. On a en effet :

Chaleur de formation,	$4(Az + H^3)$ dissous	84,0
Id.	$(Az^2 + O^5)$ dissous.	28,6
Id.	$(CuO + Az^2O^5)$	15,0
Id.	$(Az^2O^5 + 4AzH^3)$	50,0
		177,6
Chaleur de dissolution dans l'acide azotique étendu. . . .		13,5
Chaleur de formation $(Az^6 + H^{12} + O^5 + CuO)$.		164,1

De ce nombre, combiné avec celui de la chaleur de dissolution dans l'eau on tire

$$Az^2O^5CuO \text{ diss.} + 4AzH^3 \text{ diss.} = 20^{cal},77.$$

$Az^2O^5CuO + 6H^2O$ solide $+ 4AzH^2$ gazeux
$= Az^2O^3CuO, 4AzH^3$ solide $+ 6H^2$ solide dégage $69^{cal},28$.

Les produits de la décomposition n'ont pas été étudiés. Le mode de décomposition qui dégagerait le maximum de chaleur correspondrait à la formule

$$Az^2O^5, CuO, 4AzH^3 = 3Az^2 + H^2 + 5H^2O + CuO,$$

en admettant que CuO reste inaltéré, et dégagerait $131^{cal},8$ (volume constant, eau gazeuse) pour $255^{gr},5$, soit 516 calories par kilogramme.

Lorsque le sel détone à l'air libre, on observe la production d'abondantes fumées blanches d'azotate d'ammoniaque et des vapeurs nitreuses. Le mode de décomposition qui se produit alors ne peut être connu avec certitude.

La combustion complète par l'azotate d'ammoniaque se fait suivant l'expression :

$$Az^2O^5, CuO, 4AzH^3 + \frac{1}{2}(Az^2O^5, Az^2H^8O) = 4Az^2 + 8H^2O + CuO.$$

La proportion des deux sels mélangés est donc alors

0,76 sel de cuivre pour 0,24 sel d'ammoniaque.

La quantité de chaleur dégagée par la combustion est $655^{cal},5$ par kilogramme. En suivant la marche ordinaire, et tenant compte de la chaleur spécifique de l'oxyde de

cuivre, qui est 11,22 pour CuO = 70, on trouve aisément les nombres suivants :

$$Q_k = 655{,}5, \quad t = 1{,}750^\circ, \quad f = 6{,}090, \quad \alpha = 0{,}796.$$

La température de détonation étant relativement basse, la Commission a pensé que ce mélange, soit seul, soit additionné d'azotate d'ammoniaque, pourrait constituer un explosif intéressant au point de vue de la sécurité des mines à grisou.

On a fait d'abord, dans la chaudière close et remplie d'air, les essais calorimétriques de détonation qui suivent :

	POIDS de la cartouche	NATURE de l'enveloppe	PRESSION en m. d'eau	Q déduit pour 100 gr observé	Q déduit pour 100 gr brisé	
Azot. cupr. amm.	50	Papier	0,16	19	53(*)	Sel bien sec.
Id.	id.	Sn 25/31	0,225	34	»	id.
Id.	id.	Sn 25/40	0,21	38	»	id.
Id.	id.	id.	0,19	34	»	Sel un peu humide
75 azot. cupr. am. 25 azot. am.	id.	Papier	0,21	25	67	id.
Id.	id.	Sn 25/40	0,29	52	»	id.
33 azot. cupr. am. 67 azot. am.	id.	Papier	0,00		51	id.
Id.	22,5	id.	0,03	»	»	Sel bien sec.
Id.	50,0	Sn 25/40	0,21	39	»	Sel un peu humide.
20 azot. cupr. am. 80 azot. am.	50	Sn 25/40	0,16	29	46	id.
Id.	id.	id.	0,11	20	»	Mat. sèche fondue et grenée.
Id.	id.	id.	0,10	18	»	Mat. sèche fond. et gren. à gr. plus fins
Id.	id.	id.	0,19	34	»	Mélange de subst. pulv. bien sèches.
Id.	id.	id.	0,11	20	»	Mélange de subst. compr. à 15 atm.
10 azot. cupr. am. 90 azot. am.	id.	id.	0,16	29	42	Sel un peu humide.

(*) Calculé comme les nombres suivants en supposant la décomposition complète, avec réaction mutuelle des gaz produits.

La détonation à l'air libre du sel pur, quoique ne laissant aucun résidu, comme on s'en est assuré directement, donne une quantité de chaleur beaucoup moindre que celle qui correspondrait à la détonation complète. Il se produit donc une réaction différente, ce qui est d'accord avec les fumées blanches et nitreuses signalées plus haut.

La détonation à l'air libre des mélanges avec l'azotate d'ammoniaque est aussi très incomplète, et devient même à peu près nulle lorsque la proportion de l'azotate d'ammoniaque atteint le double de celle du sel cuprique.

Dans les tubes d'étain, la décomposition est encore incomplète ; depuis le sel pur, jusqu'au mélange 10 sel 90 az. amm., la quantité de chaleur dégagée reste à peu près égale aux trois quarts de la quantité théorique. Il est à penser que, dans un trou de mine, la décomposition sera bien complète.

La fusion, de même que la compression, met obstacle à la détonation.

On s'est assuré que ces mélanges exigent, pour détoner, des capsules contenant au moins $1^{gr},5$ de fulminate.

Dans un trou de 1 mètre de profondeur, foré à Sevran au milieu d'une terre argileuse, une cartouche de 200 grammes du mélange à combustion complète a donné une chambre de compression dont les dimensions principales ont été :

$$0^m,60 - 0^m,45 - 0^m,45.$$

Dans les mêmes conditions, une cartouche de 200 grammes du mélange 33 az. cupr. amm. 66 azot., a donné une chambre de

$$0{,}30 - 0{,}30 - 0{,}30.$$

Les essais faits dans le *grisou* ont donné les résultats suivants :

	POIDS DE LA CARTOUCHE			
	100gr		200gr	
	Pression	Résultat	Pression	Résultat
Azotate de cuivre amm.	18	N	»	I
75 azot. cupr. amm. 25 azot. amm.	30	N	36	N
			30	N
			60	N
33 azot. cupr. amm. 66 azot. amm.	»	»	24	N
			12	N
20 — 80 —	»	»	4	N
10 — 90 —	0	N		

Une cartouche de 100 grammes du mélange 20 sel 80 az. amm., a détoné, dans un tube d'étain de 25/31, en donnant une pression de 22cm sans allumer le grisou.

Les essais ont donc été pleinement satisfaisants, avec détonations franches, dans le *grisou*, pour les mélanges, même les plus détonants, de sel cuivreux et d'azotate d'ammoniaque.

On a alors fait des essais dans le mélange d'air et de *gaz d'éclairage*, tenant 10,3 p. 100 de ce gaz. Les résultats ont été les suivants :

	POIDS DES CARTOUCHES, ETC.					
	62gr		100gr		200gr	
	Pression	Résultat	Pression	Résultat	Pression	Résultat
Azotate de cuivre amm. .	»	»	»	I	»	»
75 az. cupr. am. 25 az. am.	»	»	12	N	»	»
Id.	»	»	18	N	»	»
33 — 66 —	0	N (*)	»	«	»	I
Id.	»	I (**)	»	»	»	»
20 — 80 —	»	»	4	N	16	N
Id.	»	»	4	N	»	»

(*) Explosif placé dans un étui mince en laiton, que ferme un couvercle portant une douille pour le logement de la capsule.
(**) Explosif placé dans un étui mince en laiton dépourvu de son couvercle.

Le mélange 75/25 n'a pas allumé le gaz d'éclairage avec des cartouches de 100 grammes.

Le mélange 33/66 a allumé avec une cartouche de 200 grammes, et avec une cartouche de 62 grammes placée dans un étui en laiton ouvert par le haut. On a observé le fait singulier que l'inflammation du mélange gazeux se produisait seulement 1 à 2 secondes après la détonation de la cartouche.

Le mélange 20/80 n'a allumé ni avec des cartouches de 100 grammes, ni avec une cartouche de 200 grammes.

Si l'on se rappelle que ces dernières expériences étaient faites dans un mélange gazeux notablement plus inflammable que les mélanges grisouteux, et que les expériences faites dans le grisou n'ont pas donné d'inflammation, même avec les mélanges 75/25 et des cartouches de 200 grammes, il semble que l'on doive considérer le mélange d'azotate d'ammoniaque et d'azotate cupro-ammonique comme présentant des garanties de sécurité très satisfaisantes, dès que la proportion d'azotate d'ammoniaque atteint 25 p. 100.

Le mélange contenant 80 p. 100 d'azotate d'ammoniaque, qui s'est montré sûr, même dans le gaz d'éclairage avec deux cartouches de 200 grammes, détone à une température de 1.300 degrés et possède un f égal à 5.500 grammes environ.

Les essais de détonation faits dans la bombe par M. Vieille ont donné les résultats suivants :

	DENSITÉ de chargement Δ	PRESSION observée	PRESSION théorique
Azotate cupro-ammonique pur et sec.	0,2	1.402	1.355(*)
	0,3	2.221	2.240
Azot. cupro-ammon. et azot. ammon. (mélange à combustion complète).	0,2	1.455 1.490	1.450
	0,3	2.346 2.290	2.400
20 azot. cupro-amm., 80 azot. amm.	0,2	1.115	1.340
	0,3	2.143	2.260

(*) On admet que la décomposition se fait en suivant la formule $3\,Az^2 + 6\,H^2O + Cu$.

La combustion est toujours assez lente pour que les écrasements soient statiques.

L'allumage a été fait par l'intermédiaire d'une amorce de 1 gramme de poudre extra-fine ; pour en tenir compte, on a retranché des nombres observés 150 kilogr. pour $\Delta = 0,2$ et 200 kilogr. pour $\Delta = 0,3$.

CONCLUSIONS.

Les faits nouveaux que l'on vient d'exposer confirmant les conclusions du premier rapport, permettent de les préciser et de les compléter.

On sait que la température normale d'inflammation des mélanges grisouteux est de 650 degrés, mais qu'il est nécessaire que l'action de cette température soit prolongée pendant un temps assez notable pour que l'inflammation se produise.

Les nouvelles expériences, d'accord avec les anciennes, montrent que, grâce à ce retard à l'inflammation qui est caractéristique des mélanges grisouteux, grâce aussi au mélange presque instantané des gaz provenant de la détonation avec l'air ambiant et au refroidissement brusque qui en est la conséquence, les explosifs, dont la température de détonation est inférieure à 2.200 degrés environ, sont incapables d'enflammer les mélanges grisouteux, lorsqu'ils détonent dans les conditions normales de leur emploi, c'est-à-dire dans des trous convenablement bourrés. Le bourrage, fait avec soin, doit toujours être rigoureusement prescrit comme une des conditions les plus essentielles de la sécurité.

Les garanties de sécurité vont en diminuant, toutes choses égales, à mesure que le bourrage devient plus imparfait. A la limite, et lorsque la cartouche détone sans enveloppe, à l'air libre, les conditions de sécurité ne peuvent plus être formulées avec la même netteté.

La sécurité serait sans doute encore complètement assurée si l'explosif pouvait être constitué par une substance unique, dont la détonation développerait une température suffisamment basse et ne donnerait que des produits incombustibles. Malheureusement l'azotate d'ammoniaque est, jusqu'à présent, la seule substance connue qui réalise ces conditions, et l'aptitude à la détonation en paraît insuffisante.

On est donc forcé de recourir à des mélanges au moins binaires et qui, quelles que soient les précautions prises, ne sont jamais absolument intimes. Or si l'une des substances mélangées est combustible, ou, en détonant isolément, est susceptible soit de développer une température supérieure à 2.200 degrés, soit de donner des produits gazeux combustibles, on peut toujours craindre qu'une parcelle de cette substance, placée à la surface de la cartouche, vienne, au moment de la détonation, allumer le gaz extérieur. Telle est sans doute la cause

des irrégularités qui se produisent dans l'allumage du grisou par la détonation de semblables mélanges à l'air libre.

Ces allumages, en quelque sorte accidentels, sont d'autant plus à redouter que la substance qui peut les produire est en plus forte proportion, que le mélange est moins intime, et que la surface, ou, ce qui revient à peu près au même, le poids de la cartouche, est plus considérable.

Le seul moyen que l'on ait de parer à cette cause de danger, heureusement secondaire, c'est d'assurer le mieux possible l'intimité du mélange, et de diminuer, autant qu'on le peut faire sans trop abaisser l'aptitude à la détonation et la force de l'explosif, la proportion de la substance capable d'enflammer le gaz.

Il importe, en outre, de remarquer que la sécurité dans l'emploi des explosifs au sein d'une atmosphère grisouteuse, repose, comme on l'a vu plus haut, sur le mélange presque instantané des gaz de la détonation avec une masse d'air ambiant suffisante. Il serait donc dangereux de tirer des coups de mine dans un espace trop limité et avec un poids d'explosif assez grand pour que le volume de l'air ambiant soit comparable à celui des gaz de la détonation.

Ces diverses considérations justifient la règle donnée par la Commission dans son précédent rapport, et que nous croyons devoir rappeler textuellement :

« En raison de la complexité et du peu de fixité des phénomènes qui peuvent se produire dans la détonation à l'air libre, il sera toujours prudent d'éviter le tirage des coups de mine, même chargés avec un des explosifs considérés comme les plus sûrs, dans un point où le mélange d'air et de grisou est inflammable. Le choix de ces explosifs doit être considéré comme diminuant considérablement le danger de l'explosion, il ne doit pas être considéré comme le supprimant absolument. »

Les mélanges binaires auxquels, dans l'état actuel de nos connaissances, on peut recourir pour constituer des explosifs propres à assurer la sécurité des mines à grisou, contiennent nécessairement l'azotate d'ammoniaque comme un de leurs éléments et peuvent se partager en deux catégories :

I. — On peut mélanger à l'azotate d'ammoniaque une substance détonant à haute température, mais donnant des produits incombustibles, la nitroglycérine par exemple. La sécurité paraît convenablement assurée lorsque, la nitroglycérine étant employée à l'état de dynamite, la proportion de dynamite ne dépasse pas 30 p. 100. Deux cartouches de 200 grammes contenant 30 dyn. 70 azot. ont détoné très franchement à l'air libre dans un mélange grisouteux sans l'allumer. Des cartouches de 50, 100, 200 grammes du mélange contenant 20 dyn. 80 azot., n'ont pas produit l'inflammation du grisou. Une cartouche de 50 grammes du même explosif a même pu détoner à l'air libre dans un mélange d'air et de gaz d'éclairage sans l'allumer.

II. — On peut aussi mélanger à l'azotate d'ammoniaque une substance combustible par elle-même, ou donnant, en détonant, des produits combustibles.

Les mélanges de cette nature doivent satisfaire aux conditions suivantes :

Développer une température de détonation aussi basse que possible et en tous cas inférieure à 2.200 degrés ;

Ne pas donner de gaz combustibles après la détonation complète ;

Posséder une force explosive suffisante pour qu'on ne soit pas conduit à employer des poids d'explosifs trop considérables ;

Présenter une aptitude à la détonation assez grande, au moins dans un trou bourré, pour que la proportion des coups ratés soit insignifiante ;

Pouvoir être préservés, pendant un temps suffisamment long, contre toute altération;

Enfin pouvoir être livrés à l'industrie à un prix qui ne soit pas trop élevé.

Parmi les nombreux mélanges à base d'azotate d'ammoniaque remplissant plus ou moins complètement toutes ces conditions, et que la Commission a expérimentés, ceux qui semblent devoir être cités de préférence sont les suivants :

1° Les mélanges contenant au plus 75 p. 100 d'azotate cupro-ammoniaque; celui qui réalise ce maximum n'a, en détonant à l'air libre, enflammé ni le grisou avec des cartouches de 200 grammes (3 expériences), ni le gaz d'éclairage avec des cartouches de 100 grammes (2 expériences);

2° Le mélange contenant 6 p. 100 de naphtaline qui, détonant à l'air libre, n'a provoqué l'inflammation ni du grisou avec des cartouches de 200 grammes (2 expériences), ni du gaz d'éclairage avec des cartouches de 50 grammes (2 expériences), et qui n'a enflammé ce dernier gaz qu'avec des cartouches de 200 grammes;

3° Le mélange tenant 15 p. 100 de coton octonitrique qui, détonant à l'air libre, n'a pas enflammé le grisou avec des cartouches de 200 grammes (2 expériences);

4° Le mélange tenant 10 p. 100 de mononitronaphtaline qui, détonant à l'air libre, n'a, sur 5 expériences faites avec des cartouches de 60 grammes, 100 grammes et 200 grammes, allumé qu'une fois le grisou avec une cartouche de 60 grammes;

5° Le mélange tenant 10 p. 100 de binitrobenzine qui, détonant à l'air libre, n'a pas allumé le grisou avec des cartouches de 100 grammes (4 expériences), et, avec des cartouches de 200 grammes, ne l'a allumé qu'une fois sur trois expériences.

Des essais pratiques faits dans les mines, et qui se

poursuivent actuellement, permettront seuls aux exploitants de faire un choix entre les divers explosifs dont nous venons d'indiquer le principe.

Le 8 novembre 1888.

Le Président de la Sous-Commission, Rapporteur,

Er. MALLARD.

Adopté par la Commission dans sa séance du 8 novembre 1888.

Le Secrétaire, P. VIEILLE.

Le Président, BERTHELOT.

TABLEAU RÉSUMÉ

DES EXPÉRIENCES FAITES A LA POUDRERIE DE SEVRAN-LIVRY DE JUIN A OCTOBRE 1888.

A. — Expériences faites au milieu de gaz combustibles.

DATES	COMPOSITION de l'explosif (1)	POIDS de la cartouche	POIDS du fulminate	P (2)	RÉSULTAT de l'expérience (3)	OBSERVATIONS
I. — GAZ COMBUSTIBLE TENANT 0,103 DE FORMÈNE ET 0,897 D'AIR EN VOLUMES.						
	1° Amorces.					
		gr.	gr.			
9 VII,	3 am. renforcées à 1g,5 de fulminate	»	»	»	N	Une seule amorce fermée par le bouchon qui porte le fil électrique.
6 VIII, 2	Amorce du génie	»	»	»	I	
	2° Mélanges de DYNAMITE *et d'azotate d'ammoniaque.*					
30 VI, 1	10 dynam., 90 azot.	50	1,5	10	N	
30 VI, 2	20 dynam., 80 azot.	50	id.	»	N	
9 VII, 1	id.	id.	id.	»	N	
28 VII, 1	id.	100	id.	15	N	
28 VII, 2	id.	id.	id.	34	N	
30 VII, 1	id.	id.	id.	28	N	
11 VIII, 2	id.	200	id.	45	N	
11 VIII, 3	id.	id.	id.	44	N	
23 VII, 1	30 dynam., 70 azot.	50	id.	22	N	
23 VII, 2	id.	100	id.	62	N	
25 VII, 1	id.	100	id.	40	N	
11 VIII, 2	id.	200	id.	62	N	
Id.	id.	id.	id.	> 100	N	
28 VII, 1	40 dynam., 60 azot.	50	id.	»	N	
28 VII, 2	id.	id.	id.	30	N	
25 VII, 1	id.	100	id.	»	I	

(1) La cartouche est nue ou simplement enveloppée de papier, et l'explosif est pulvérulent, lorsque le contraire n'est pas expressément indiqué.

(2) P, *pression développée dans la chaudière après la détonation de la cartouche*, lorsque le gaz combustible n'a pas été enflammé. — Cette pression, exprimée en centimètre d'eau, est observée 15″ environ après la détonation; l'observation n'est qu'approximative et a seulement pour but de donner une idée de la détonation plus ou moins complète de l'explosif.

(3) I indique que le gaz combustible s'est enflammé; — N indique qu'il n'y a pas eu inflammation du gaz.

DATES	COMPOSITION de l'explosif	POIDS de la cartouche	POIDS du fulminate	P	RÉSULTAT de l'expérience	OBSERVATIONS
	2° Mélanges de DYNAMITE *et d'azotate d'ammoniaque* (suite).					
		gr.	gr.			
9 VII, 1	50 dynam., 50 azot.	50	1,5	44	N	
28 VII, 1	id.	id.	id.	»	N	
30 VI, 1	id.	id.	id.	»	I	
Id.	id.	id.	id.	»	I	
11 VII ,2	id.	100	id.	»	I	
28 VII, 1	60 dynam., 40 azot.	50	id.	48	N	
6 VIII, 1	80 dynam., 20 azot.	100	id.	»	I	
25 X, 9	100 dynam., 0 azot.	50	id.	»	I	Tube Sn 25/31.
	3° Mélanges de COTON OCTONITRIQUE *et d'azotate d'ammoniaque.*					
11 VIII, 2	15 coton, 85 azotate	200	1,5	60	N	
11 VIII, 3	id.	id.	id.	> 100	N	
23 VII, 1	20 coton, 80 azotate	50	id.	30	N	
23 VII, 2	id.	100	id.	50	N	
25 VII, 1	id.	id.	id.	28	N	
30 VII, 3	id.	id.	id.	»	N	
Id.	id.	id.	id.	44	N	
Id.	id.	id.	id.	40	N	
6 VIII, 3	id.	id.	id.	52	N	
30 VII, 2	id.	id.	id.	»	I	
11 VIII, 2	id.	200	id.	»	I	
11 VIII, 3	id.	id.	id.	»	I	
11 VII, 2	30 coton, 70 azotate	30	id.	4	N	
23 VII, 2	id.	100	id.	62	N	
25 VII, 2	40 coton, 60 azotate	100	id.	»	I	
27 VI, 2	60 coton, 40 azotate	30	id.	»	I	
9 VII, 1	100 coton, 0 azotate	30	id.	18	N	
9 VII, 2	id.	id.	id.	id.	N	
11 VII, 2	id.	id.	id.	»	I	
	4° Mélanges de COTON ENNÉANITRIQUE (*coton de mine*) *et d'azotate d'ammoniaque.*					
6 VIII, 3	15 coton, 85 azotate	100	1,5	50	N	
6 VIII, 1	id.	id.	id.	»	I	
	5° Mélanges de NAPHTALINE MONONITRÉE *et d'azotate d'ammoniaque.*					
11 VII, 1	9 napht. mononitr., 91 azotate	30	1,5	6	N	Matière pulvérulente.
9 VII 1	id.	50	id.	22	N	Id.

DATES	COMPOSITION de l'explosif	POIDS de la cartouche	POIDS du fulminate	P	RÉSULTAT de l'expérience	OBSERVATIONS
	5° *Mélanges de* NAPHTALINE MONONITRÉE *et d'azotate d'ammoniaque* (suite).					
		gr.	gr.			
9 VII, 2	9 napht. mononitr., 91 azotate	50	1,5	26	N	Matière pulvérulente.
Id.	id.	id.	3×1,5	id.	N	Id.
25 VII, 2	id.	100	1,5	0	N	Id.
30 VII, 2	id.	id.	id.	0	N	Id.
	6° *Mélanges de* NAPHTALINE *et d'azotate d'ammoniaque.*					
15 IX, 1	6 naphtal., 94 azot.	100	1,5	4	N	
Id.	id.	200	id.	7	N	
Id.	id.	id.	3×1,5	10	N	
Id.	id.	118	1,5	16	N	Dans tube Sn 25mm/31mm.
Id.	id.	75	id.	20	N	Id.
	7° *Mélanges de* BINITROBENZINE *et d'azotate d'ammoniaque.*					
2 VII, 2	10 binitr., 90 azot.	100	1,5	44	N	
6 VIII, 3	id.	id.	id.	32	N	
Id.	id.	id.	id.	32	N	
Id.	id.	id.	id.	32	N	
11 VIII, 1	id.	200	id.	0	N	
11 VIII, 3	id.	id.	id.	50	N	
11 VIII, 1	id.	id.	id.	»	I	
9 VII, 1	15 binitr., 85 azot. (bellite)	40	id.	24	N	
27 VI, 2	id.	50	id.	»	N	
9 VII, 2	id.	id.	id.	20	N	
30 VII, 2	id.	100	id.	52	N	
30 VII, 1	id.	id.	id.	»	I	
30 VI, 2	20 binitr., 80 azot.	50	id.	»	N	
25 VII, 1	id.	100	id.	50	N	
	8° *Mélanges de* PICRATE D'AMMONIAQUE *et d'azotate d'ammoniaque.*					
8 X, 1	10 picrate, 90 azot	200	1,5	18	N	
Id.	id.	id.	id.	17	N	
Id.	20 picrate, 80 azot.	id.	id.	»	I	
	9° *Mélanges de* COLOPHANE *et d'azotate d'ammoniaque.*					
10 X, 1	10 coloph., 90 azot.	200	1,5	9	N	
10 X, 2	id.	id.	id.	id.	N	
Id.	id.	id.	id.	5	N	

DATES	COMPOSITION de l'explosif	POIDS de la cartouche	POIDS du fulminate	P	RÉSULTAT de l'expérience	OBSERVATIONS
	10° *Mélanges de* GOUDRON DE HOUILLE *et d'azotate d'ammoniaque.*					
		gr.	gr.			
10 X, 1	12 goudr., 88 azot.	200	1,5	10	N	Mélange non chauffé.
Id.	id.	id.	id.	50	N	Id.
8 X, 2	id.	id.	id.	»	I	Id.
10 X, 1	id.	id.	id.	6	N	Mélange chauffé 2h à 65°.
Id.	id.	id.	id.	id.	N	Id.
Id.	8 goudron, 92 azot.	id.	id.	60	N	Mélange chauffé 1h à 65°.
Id.	id.	id.	id.	58	N	Id.
Id.	id.	id.	id.	»	I	Id.
	11° *Mélanges d'*HUILES LOURDES DE HOUILLE *avec l'azotate d'ammoniaque.*					
8 X, 2	10 huile, 90 azotate	200	1,5	0	N	
Id.	id.	id.	id.	id.	N	
	12° *Mélanges d'*AZOTATE CUPRO-AMMONIQUE *et d'azotate d'ammoniaque.*					
25 X, 1	10 az. cupr., 90 az. am.	100	1,5	0	N	
25 X, 2	20 az. cupr., 80 az. am.	200	id.	4	N	
25 X, 3	id.	100	id.	22	N	Tube Sn 25/31.
25 X, 4	33 az. cupr., 66 az. am.	200	id.	24	N	
25 X, 5	75 az. cupr., 25 az. am.	100	id.	30	N	
25 X, 6	id.	200	id.	id.	N	
25 X, 7	id.	id.	id.	36	N	
25 X, 8	100 az. cupr., 0 az. am.	100	id.	18	N	
	II. — GAZ COMBUSTIBLES TENANT 0,103 DE GAZ D'ÉCLAIRAGE ET 0,897 D'AIR EN VOLUMES.					
	1° DYNAMITE *et azotate d'ammoniaque.*					
27 VII, 2	20 dynam., 80 azot	50	1,5	22	N	
27 VII, 1	60 dynam., 0 azot.	id.	id.	34	N	Tube Pb 30/35.
27 VII, 2	70 dynam., 30 azot.	id.	id.	»	N	Id.
Id.	80 dynam., 20 azot.	id.	id.	32	N	Id.
27 VII, 1	60 dynam., 40 azot.	id.	id.	28	N	Tube Sn 25/40.
Id.	70 dynam., 30 azot.	id.	id.	36	N	Id.
Id.	80 dynam., 20 azot.	id.	id.	32	N	Id.
Id.	90 dynam., 10 azot.	id.	id.	50	N	Id.
4 V, 1	100 dynam., 0 azot.	id.	id.	»	I	Id.
27 VII, 1	id.	id.	id.	»	I	Id.

DATES	COMPOSITION de l'explosif	POIDS de la cartouche	POIDS du fulminate	P	RÉSULTAT de l'expérience	OBSERVATIONS
	2° Coton octonitrique *et azotate d'ammoniaque.*					
		gr.	gr.			
27 VII, 2	20 coton, 80 azotate	50	1,5	»	I	
27 VII, 1	10 coton, 90 azotate	id.	id.	22	N	Tube Sn 25/40.
Id.	20 coton, 80 azotate	id.	id.	28	N	Id.
Id.	30 coton, 70 azotate	id.	id.	32	N	Id.
27 VII, 2	30 coton, 70 azotate	id.	id.	26	N	Tube Pb 30/35.
	3° Naphtaline *et azotate d'ammoniaque.*					
30 X, 3	6 napht., 94 az. am.	50	1,5	3	N	
Id.	id.	id.	id.	id.	N	
27 X, 1	id.	200	id.	id.	I	
Id.	id.	50	id.	14	N	Tube Sn 25/31.
	4° Azotate cupro-ammonique *et azotate d'ammoniaque.*					
30 X, 2	20 az. cupr., 80 az. am.	100	1,5	4	N	
Id.	id.	id.	id.	4	N	
30 X, 1	id.	200	id.	16	N	
Id.	33 az. cupr., 67 az. am.	id.	id.	»	I (1)	
30 X, 2	id.	62	id.	0	N	Étui mince en laiton, avec douille pour amorce.
Id.	id.	id.	id.	»	I (2)	Étui mince en laiton, sans douille pour amorce.
30 X, 3	75 az. cupr., 25 az. am.	100	id.	12	N	
Id.	id.	id.	id.	18	N	
Id.	100 az. cupr., 0 az. am.	id.	id.	»	I	
	5° *Explosifs divers.*					
4 V, 1	50 dynamite, 50 pouss. de houille	90	1,5	»	I	
4 V, 3	Cot. ennéanitrique	30	id.	»	I	Tube Sn 25/40.
4 V. 3	Cordeau détonant au coton-poudre	»	»	»	N	0m,70 de longueur.

(1) L'inflammation se produit environ 2″ seulement après la détonation de la cartouche.
(2) L'inflammation se produit 1″ seulement après la détonation de la cartouche.

B. — Expériences de détonation dans la chaudière close et ne contenant que de l'air.

DATES	COMPOSITION de l'explosif (1)	NATURE de l'enveloppe de la cartouche (2)	POIDS de la cartouche	POIDS du fulminate	PRESSION en centim. d'eau (3)	OBSERVATIONS
	1° Dynamite *et azotate d'ammoniaque.*					
			gr.	gr.		
6 VIII, 2	10 dynam., 80 azot.	Papier	50	1,5	8	
11 VIII, 2	20 dynam., 80 azot.	Étui laiton	id.	id.	15	
6 VIII, 3	id.	Papier	id.	id.	17	
9 VIII, 21	id.	id.	id.	4,0	25	
11 VIII, 12	id.	Sn 25/31	id.	1,5	22	
9 VIII, 20	id.	Sn 25/40	id.	0,5	23	
9 VIII, 19	id.	id.	id.	1,0	26	
6 VIII, 4	30 dynam., 70 azot.	Papier	id.	1,5	30	
6 VIII, 5	40 dynam., 60 azot.	id.	id.	id.	45	
6 VIII, 6	50 dynam., 50 azot.	id.	id.	id.	53	
27 IX, 5	60 dynam., 40 azot.	Étui laiton	id.	id.	41	
27 IX, 8	id.	id.	id.	id.	40	
27 IX, 6	id.	Sn 25/31	id.	id.	45	
27 IX, 7	id.	Sn 25/40	id.	id.	37	
24 IX, 6	70 dynam., 30 azot.	Papier	25	id.	34	
24 IX, 7	id.	Sn 25/31	50	id.	53	
24 IX, 8	id.	Sn 25/40	id.	id.	47	
24 IX, 9	id.	Sn 25/45	id.	id.	45	
27 IX, 2	id.	Étui laiton	id.	id.	43	
24 IX, 3	80 dynam., 20 azot.	Papier	25	id.	38	
24 IX, 4	id.	Sn 25/31	50	id.	59	
24 IX, 5	id.	Sn 25/40	id.	id.	51	
24 IX, 1	90 dynam., 10 azot.	Papier	25	id.	41	
24 IX, 2	id.	Sn 25/40	50	id.	52	

(1) L'explosif est pulvérulent et tassé à la main, sauf indication contraire.
(2) Lorsque la cartouche est bourrée dans un tube métallique, étain (Sn) ou plomb (Pb), on donne les diamètres intérieur et extérieur du tube en millimètres.
(3) La pression initiale indiquée est déduite par une construction graphique, de l'observation de la pression à des intervalles de temps connus après la détonation (Voir le premier rapport).

DATES	COMPOSITION de l'explosif	NATURE de l'enveloppe de la cartouche	POIDS de la cartouche	POIDS du fulminate	PRESSION en centim. d'eau	OBSERVATIONS
	1° DYNAMITE *et azotate d'ammoniaque* (suite).					
			gr.	gr.		
27 IX, 9	100 dynam., 0 azot.	Papier	50	1,5	67	Amorce renforcée placée dans la douille d'amorçage de l'étui en laiton.
27 IX, 1	id.	Étui laiton	id.	id.	58	
22 IX, 4	id.	Sn 25/45	id.	id.	44	
22 IX, 5	id.	id.	id.	id.	48	
	2° COTON OCTONITRIQUE *et azotate d'ammoniaque.*					
31 VII, 9	10 coton, 90 azotate	Papier	50	1,5	25	
31 VII, 10	id.	Sn 25/40	id.	id.	27	
9 VIII, 12	15 coton, 85 azotate	Papier	id.	id.	16	
9 VIII, 14	id.	id.	id.	id.	9	Compr. à 25^{atm}.
9 VIII, 11	id.	Sn 25/40	25	id.	19	
9 VIII, 13	id.	id.	id.	id.	15	Compr. à 50^{atm}.
21 VIII, 7	id.	id.	id.	1.0	14	
21 VIII, 6	id.	id.	id.	0,5	12	
31 VII, 7	20 coton, 80 azotate	Papier	30	1,5	13	
11 VIII, 3	id.	Étui laiton	50	id.	30	
23 VII, 1	id.	Papier	id.	id.	34	
25 VII, 1	id.	id.	id.	id.	38	
25 VII, 2	id.	id.	id.	id.	38	
9 VIII, 10	id.	id.	25	id.	19	
9 VIII, 22	id.	id.	id.	4,0	21	
11 VIII, 13	id.	Sn 25/31	50	1,5	34	
31 VII, 8	id.	Sn 25/40	30	id.	21	
9 VIII, 10	id.	id.	25	id.	id.	
9 VIII, 2	id.	Papier	id.	id.	5,5	Compr. à 100^{atm}.
9 VIII, 4	id.	id.	id.	id.	12,5	Id. 75
9 VIII, 6	id.	id.	id.	id.	6	Id. 50
9 VIII, 8	id.	id.	id.	id.	12	Id. 25
9 VIII, 1	id.	Sn 25/40	id.	id.	6,5	Compr. à 100^{atm}.
VIII, 3	id.	id.	id.	id.	4	Id. 75
9 VIII, 5	id.	id.	id.	id.	11	Id. 50
IX, 10	30 coton, 70 azotate	Papier	id.	id.	19	
24 IX, 11	id.	Sn 25/31	50	id.	45	

DATES	COMPOSITION de l'explosif	NATURE de l'enveloppe de la cartouche	POIDS de la cartouche	POIDS du fulminate	PRESSION en centim. d'eau	OBSERVATIONS
	2° COTON OCTONITRIQUE *et azotate d'ammoniaque* (suite).					
			gr.	gr.		
24 IX, 12	30 coton, 70 azotate	Sn 25/40	50	1,5	42	
31 VII, 5	35 coton, 65 azotate	Papier	30	id.	17	
31 VII, 6	id.	Sn 25/40	id.	id.	26	
31 VII, 5	40 coton. 60 azotate	Papier	id.	id.	17	
31 VII, 6	id.	Sn 25/40	id.	id.	26	
31 VII, 1	70 coton, 30 azotate	Papier	50	id.	92	
31 VII, 2	id.	Sn 25/40	id.	id.	37	
21 VIII, 3	90 coton, 10 azotate	Sn 25/31	30	id.	27	
9 VII, 1	100 coton, 0 azotate	Papier	id.	id.	52	
21 VIII, 2	id.	Sn 25/31	50	id.	39	
21 VIII, 1	id.	Sn 25/40	id.	id.	28	
	3° BINITROBENZINE *et azotate d'ammoniaque.*					
11 VIII, 4	10 binitr., 90 azot.	Étui laiton	50	1,5	20	
9 VIII, 18	id.	Papier	25	id.	16	
9 VIII, 16	id.	id.	id.	id.	6	Compr. à 25^{atm}.
11 VIII, 11	id.	Sn 25/31	50	id.	30	
9 VIII, 15	id.	Sn 25/40	25	id.	18	
21 VIII, 9	id.	id.	id.	1,0	12	
21 VIII, 8	id.	id.	id.	0,5	9	
9 VIII, 15	id.	id.	id.	1,5	11	Compr. à 25^{atm}.
	4° NAPHTALINE MONONITRÉE *et azotate d'ammoniaque.*					
11 VII, 1	9 napht. mononitr., 91 azot. (Favier)	Étui laiton	50	1,5	27	
11 VII, 2	id.	Sn 25/40	id.	id.	40	
	5° NAPHTALINE *et azotate d'ammoniaque.*					
21 VIII, 5	6 napht., 94 azotate	Papier	50	1,5	5,5	
30 X, 1	id.	id.	id.	id.	5	
30 X, 2	id.	id.	200	id.	36	
18 IX, 7	id.	Sn 25/31	50	d.	26	
21 VIII, 4	id.	Sn 25/40	id.	id.	38	

DATES	COMPOSITION de l'explosif	NATURE de l'enveloppe de la cartouche	POIDS de la cartouche	POIDS du fulminate	PRESSION en centim. d'eau	OBSERVATIONS
	5° Naphtaline *et azotate d'ammoniaque* (suite).					
			gr.	gr.		
30 X, 3	6 napht., 94 azotate	Sn 25/40	50	1,5	28	
22 IX, 2	id.	Sn 25/45	id.	id.	20	
22 IX, 3	id.	id.	id.	id.	25	
27 IX, 3	id.	id.	id.	id.	29	
18 IX, 1	10 napht., 90 azot.	Papier	id.	id.	5	
18 IX, 2	id.	Sn 25/31	id.	id.	28	
18 IX, 3	id	Sn 25/40	id.	id.	29	
18 IX, 4	20 napht., 80 azot.	Papier	id.	id.	0	
18 IX, 5	id.	Sn 25/31	id.	id.	0	
18 IX, 6	id.	Sn 25/40	id.	id.	3,5	
	6° Picrate d'ammoniaque *et azotate d'ammoniaque*.					
8 X, 25	10 picrate, 90 azot.	Papier	50	1,5	0	
8 X, 26	id.	Sn 25/31	id.	1,5	22	
8 X, 27	id.	Sn 25/40	id.	1,5	22	
8 X, 22	20 picrate, 80 azot.	Papier	id.	id.	22	
8 X, 23	id.	Sn 25/31	id.	id.	30	
8 X, 24	id.	Sn 25/40	id.	id	31	
8 X, 19	28 picrate, 72 azot.	Papier	id.	id.	16	
8 X, 20	id.	Sn 25/31	id.	id.	35	
8 X, 21	id.	Sn 25/40	id.	id.	31	
8 X, 16	40 picrate, 60 azot.	Papier	id.	id.	19	
8 X, 17	id.	Sn 25/31	id.	id.	35	
8 X, 18	id.	Sn 25/40	id.	id.	36	
8 X, 13	50 picrate, 50 azot.	Papier	id.	id.	14	
8 X, 14	id.	Sn 25/31	id.	id.	34	
8 X, 15	id.	Sn 25/40	id.	id.	30	
8 X, 10	60 picrate, 40 azot.	Papier	id.	id.	14	
8 X, 11	id.	Sn 25/31	id.	id.	30	

DATES	COMPOSITION de l'explosif	NATURE de l'enveloppe de la cartouche	POIDS de la cartouche	POIDS du fulminate	PRESSION en centim. d'eau	OBSERVATIONS
	6° Picrate d'ammoniaque *et azotate d'ammoniaque* (suite).					
			gr.	gr.		
8 X, 12	60 picrate, 40 azot.	Sn 25/40	50	id.	27	
8 X, 7	100 picrate, 0 azot.	Papier	id.	id.	0	
8 X, 8	id.	Sn 25/31	id.	id.	13	
8 X, 9	id.	Sn 25/40	id.	id.	16	
	7° Huiles lourdes de goudron *et azotate d'ammoniaque*.					
8 X, 4	10 huiles lourdes, 90 az.	Papier	50	1,5	0	
8 X, 29	id.	id.	id.	id.	id.	
8 X, 5	id.	Sn 25/31	id.	id.	20	
8 X, 6	id.	Sn 25/40	id.	id.	21	
	8° Goudron de houille *et azotate d'ammoniaque*.					
8 X, 1	12 goudron, 88 az.	Papier	50	1,5	0	Le goudron n'a pas subi l'action de la chaleur.
8 X, 28	id.	id.	id.	id.	id.	
8 X, 2	id.	Sn 25/31	id.	id.	9	
8 X, 3	id.	Sn 25/40	id.	id.	12	
10 X, 3	8 goudron, 92 azot.	Papier	id.	id.	4	Séché une heure à 65°.
10 X, 5	id.	Sn 25/31	id.	id.	27	Id.
10 X, 6	id.	Sn 25/40	id.	id.	23	Id.
	9° Azotate cupro-ammonique *et azotate d'ammoniaque*.					
25 X, 5	10 az. cupro-am., 90 az.	Sn 25/40	50	1,5	16	Sel cuprique un peu humide.—Tube Sn assez complètement brisé en regard de l'explosif.
25 X, 4	20 az. cupro-am., 80 az.	id.	id.	id.	16	Sel un peu humide.—Tube Sn assez complètement brisé en regard de l'explosif.
30 X, 8	id.	id.	id.	id.	11	Matière sèche, fondue et grenée.
30 X, 9	id.	id.	id.	id.	10	Mat. sèche, fondue et grenée, à grains plus fins.
30 X, 10	id.	id.	id.	id.	16,5	Simple mélange des matières pulvérisées et sèches.
30 X, 11	id.	id.	id.	id.	1	Id. comprimé à 15 atm.

DATES	COMPOSITION de l'explosif	NATURE de l'enveloppe de la cartouche	POIDS de la cartouche	POIDS du fulminate	PRESSION en centim. d'eau	OBSERVATIONS
			gr.	gr.		
9° Azotate cupro-ammonique *et azotate d'ammoniaque* (suite).						
25 X, 6	33 az. cupro-am., 67 az.	Papier	50	1,5	0	Sel cupr. un peu humide.
30 X, 7	id.	id.	22,5	id.	4	Sel cuprique bien sec.
25 X, 5	id.	Sn 25/40	50	id.	20	Sel cupr. un peu humide. — Tube compl^{t} brisé en regard de l'explosif.
25 X, 4	75 az. cupro-am., 25 az.	Papier	50	id.	22	Sel cupr. un peu humide.
25 X, 3	id.	Sn 25/40	id.	id.	28	Id. — Tube compl^{t} brisé en regard de l'explosif.
25 X, 2	100 az. cupro-am., 0 az.	Papier	id.	id.	0	Sel un peu humide.
30 X, 4	id.	id.	id.	id.	16	Sel bien sec.
30 X, 5	id.	Sn 25/31	id.	id.	22,5	Sel bien sec.
30 X, 1	id.	Sn 25/40	id.	id.	19	Sel un peu humide.
30 X, 6	id.	id.	id.	id.	21	Sel bien sec.
10° Nitromannite.						
22 IX, 6	Nitromannite.	Papier	27	1,5	44	Fortement comprimée.
22 IX, 7	id.	id.	25	id.	62	Pulvérulente.
22 IX, 8	id.	Sn 25/31	25	id.	42	Id.
22 IX, 9	id.	id.	id.	id.	45	Id.
22 IX, 10	id.	Sn 25/40	25	id.	49	Id.
27 IX, 4	id.	id.	40	id.	78	Id.
22 IX, 11	id.	Sn 25/45	25	id.	53	Id.
11° *Explosifs divers.*						
6 VIII, 1	15 coton de mine, 85 azotate	Papier	50	1,5	37	
11 VII, 3	Azotate d'ammon.	Sn 25/40	id.	id.	2,5	
22 IX, 1	id.	Sn 25/45	id.	id.	14	
11 VIII, 10	4 am. renforcées de 1^{g},5 chaque	Sn 25/40	id.	id.	1,5	

ÉTUDE
SUR LES APPAREILS PICCARD

POUR

LA VAPORISATION DES DISSOLUTIONS SALÉES

ET SUR

L'EMPLOI DU TRAVAIL POUR OBTENIR DE LA CHALEUR

Par M. A. RATEAU, ingénieur des mines.

INTRODUCTION.

De nombreuses industries ont à faire la vaporisation d'un liquide, soit pour précipiter un sel de sa dissolution, comme dans les salines, soit pour opérer la concentration d'une liqueur, comme dans les sucreries, soit pour séparer deux ou plusieurs liquides dont les températures d'ébullition sont différentes. Cette vaporisation s'obtient généralement en chauffant directement avec du combustible. Cependant il est facile de voir que c'est là un procédé très onéreux.

Prenons, par exemple, pour fixer les idées, le cas d'une saline qui a à traiter une saumure contenant 1 kilogramme de sel pour 2^{kg},7 d'eau pure. Le but qu'on se propose c'est de séparer le sel de l'eau où il est dissout; pour cela il n'y aurait théoriquement besoin d'aucune chaleur, puisque la dissolution de 1 kilogramme de sel dans 2^{kg},7

d'eau absorbe — et que l'opération inverse dégage — environ 7 calories; mais, pour l'atteindre, on est pratiquement obligé de vaporiser l'eau, et il faut alors fournir une quantité de chaleur considérable, d'abord pour porter la liqueur à l'ébullition, ensuite pour opérer la vaporisation; c'est surtout cette seconde partie de l'opération qui est onéreuse, car il ne faut que 270 calories pour porter $2^{kg},7$ de saumure de 15 degrés à la température d'ébullition (108° à la pression atmosphérique), tandis que la vaporisation demande 1426 calories.

Sauf des pertes inévitables dans la pratique, il est assez facile de récupérer toute cette chaleur. Il suffit, pour cela, de mettre la vapeur au contact des parois de la chaudière d'évaporation. Elle lui cède sa chaleur et se condense. On obtient ainsi, pour deux opérations successives (vaporisation et condensation), le résultat cherché, c'est-à-dire, d'une part, le sel, et, de l'autre, l'eau qui le dissolvait.

Pourtant une difficulté très sérieuse se présente. La température de la vapeur n'est jamais supérieure à celle du liquide qui l'a émise, et, en l'état, il est impossible d'obtenir sa condensation au contact des parois de la chaudière d'évaporation. Pour lever cette difficulté, deux moyens peuvent être employés :

L'un est celui des *effets multiples;*

L'autre celui de la *compression de la vapeur.*

Le premier, employé depuis longtemps dans les sucreries, consiste à disposer en série plusieurs chaudières d'évaporation. Les pressions, et par conséquent aussi les températures d'ébullitions, vont en diminuant d'un bout à l'autre de la série; de sorte que la vapeur émise par une chaudière peut servir, et sert en effet, au chauffage de la suivante; et, de cette façon, il suffit de chauffer la première avec du combustible. Les chutes de pression, d'une chaudière à l'autre, sont nécessairement assez

grandes pour que les transmissions de chaleur s'effectuent, mais, malgré cela, on pourrait allonger beaucoup la série, en tenant très haute la pression dans la première et disposant un condenseur à la sortie de la dernière, si l'on n'était arrêté par d'autres conditions. Les jus sucrés, par exemple, ne pouvant, sans inconvénient, supporter des températures supérieures à 100 degrés, on est obligé de limiter à trois le nombre des chaudières de la série. On a, dans ce cas, trois effets au plus; et la consommation de combustible ne peut pas être réduite à moins du tiers de ce qu'elle est habituellement quand on chauffe directement une seule chaudière.

Le deuxième procédé, employé seulement depuis quelques années, consiste à comprimer la vapeur jusqu'à ce que sa presion corresponde à une température de vapeur saturée supérieure de quelques degrés à celle de la chaudière d'où elle sort. Elle peut alors se condenser au contact des parois de cette chaudière et fournir la chaleur nécessaire à la vaporisation. Quant aux pertes diverses, elles sont en grande partie comblées par l'apport de chaleur résultant de la transformation du travail dépensé pour la compression.

Si la force motrice est donnée par des chutes d'eau, la vaporisation peut être obtenue presque sans dépense de combustible (il en faut cependant toujours un peu, non seulement pour la mise en marche, mais encore pour la marche normale, comme nous le verrons ultérieurement). Mais si l'on n'a pas de force naturelle à sa disposition, la question se pose de savoir s'il n'est pas avantageux de brûler ce combustible pour faire du travail moteur, qui est utilisé comme il est dit ci-dessus, plutôt que de l'employer à la chauffe directe. La réponse est affirmative lorsque le combustible coûte cher, ainsi que nous l'indiquerons pages 387 et 421, et, dans ce cas, il est encore préférable de combiner les deux procédés : effets multiples et compression de la vapeur.

Le procédé d'évaporation économique par compression de la vapeur à été indiqué depuis assez longtemps déjà par Péclet (*Traité de Physique*, 3e édition, 1860, t, II, p. 253), qui en attribue la découverte à Pelletan avant 1840. Il s'applique principalement à l'extraction du sel de la saumure dans les salines qui se trouvent en pays montagneux, où il est facile de se procurer de la force motrice hydraulique. En 1855, Pierre Rittinger fit à Vienne (Autriche) des essais dans cette voie; mais il échoua complètement; le sel se déposait sur les surfaces de chauffe et y formait une croûte adhérente qui arrêtait la transmission de la chaleur, outre qu'elle était dure à enlever.

En 1876 (*), M. Piccard indiqua qu'on pouvait tourner cette difficulté en chauffant d'abord la saumure sous pression de façon qu'elle ne s'évaporât pas, puis en la portant brusquement dans une enceinte à pression plus basse, où, l'ébullition se produisant instantanément et uniformément dans toute la masse, le sel se formerait au sein même du liquide et se déposerait ensuite au fond du vase sans venir s'attacher aux parois. Aidé par MM. Weibel, Briquet et Cie, constructeurs à Genève, M. Piccard fit, en 1877, à la saline de Bex, dans le canton de Vaud, des essais desquels il résulta que la solution du problème avançait, mais qu'il fallait encore éviter un gros inconvénient : l'obstruction rapide des tuyaux de conduite par des dépôts de sel. C'est alors que M. Piccard imagina, pour opérer la circulation de la saumure, le *sas à piston* qui sera décrit plus loin; et, ainsi complété, l'appareil devint décidément pratique.

Un projet envoyé à l'Exposition universelle de 1878 y obtint une médaille d'or. M. Tibulle Collot, qui en a donné une description dans les *Études de l'Exposition*

(*) Le premier brevet Piccard date du 6 juin 1876.

de 1878 (*), commence son article en déclarant « qu'il doute fort que les données théoriques sur lesquelles il repose se changent jamais en résultats bien pratiques ». Cependant le succès obtenu à Bex était décisif et les applications ne tardèrent pas à se faire : à Ebensee, dans le Salzkammergut, en 1881; à Maixe, près de Nancy, et à Schönebeck, près de Strassfurt, en 1882; et enfin, une saline pourvue d'appareils Piccard a été installée de toutes pièces, en 1886, à Salies-du-Salat, dans la Haute-Garonne.

L'appareil dont il sera principalement question plus loin est dit : *à sel fin*. Outre celui-ci, M. Piccard a imaginé, et installé à Salies-du-Salat, un appareil *à sel gros* d'un système tout différent. On sait que, au sein d'une dissolution en *ébullition*, le sel se forme à l'état de tout petits cubes : c'est du sel fin; tandis que, si la dissolution s'*évapore tranquillement*, en présence d'une atmosphère gazeuse, comme dans les *poêles* ordinaires des salines à feu, le sel se forme à la surface du liquide et s'y maintient par capillarité jusqu'à ce que son poids soit devenu suffisant pour l'entraîner au fond; il se présente alors à l'état de trémies : c'est du sel gros. De cette distinction entre l'ébullition et l'évaporation résultent les deux sortes d'appareils Piccard. Leur emploi se trouve justifié par le fait que le sel fin est préféré dans certains pays tandis que le sel gros l'est dans d'autres.

Le présent mémoire, qui a pour but une étude approfondie des appareils Piccard, sera divisé en cinq parties.

Dans la première, je décrirai en détail le procédé d'évaporation économique par compression de la vapeur et donnerai quelques calculs y relatifs.

La deuxième se rapportera à l'appareil Piccard à sel fin.

(*) *Études sur l'Exposition de* 1878, 6e vol., p. 200. — E. Lacroix, éditeur.

La troisième contiendra quelques calculs relatifs à cet appareil.

La quatrième aura pour objet l'appareil Piccard à sel gros.

Enfin, comme conclusion, dans la cinquième partie, je parlerai du problème général de la transformation de la force motrice en chaleur.

Avant ce travail, il y a déjà eu sur les appareils Piccard quelques publications, notamment : en langue française, l'article des Études sur l'Exposition de 1878 cité ci-dessus, le numéro d'avril-mai 1885 du portefeuille économique des machines (*Portefeuille* d'Oppermann), et une note de M. l'inspecteur général des mines Haton de la Goupillière dans le *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale* (septembre 1886); en langue allemande, on trouve quelques articles dans les périodiques scientifiques : *Œsterreichische Zeitschrift* et *Berg- und Hüttenmännisches Jahrbuch;* plusieurs d'entre eux ont pour auteur M. Max von Arbesser, ingénieur à la saline d'Ebensee.

Mon travail est absolument personnel, sauf, bien entendu, la partie descriptive des appareils à sel fin et à sel gros, qui est une reproduction plus ou moins modifiée de l'article du portefeuille d'Oppermann.

En terminant cette introduction, qu'il me soit permis de témoigner toute ma gratitude à M. l'inspecteur général Haton de la Goupillière, qui a bien voulu m'indiquer le présent sujet d'étude. Je suis heureux aussi de remercier M. Piccard pour la complaisance avec laquelle il m'a fourni tous les renseignements qui pouvaient m'être utiles.

PREMIÈRE PARTIE

PROCÉDÉ DE VAPORISATION ÉCONOMIQUE PAR COMPRESSION DE LA VAPEUR.

1° *Description du procédé.*

Dans l'introduction précédente, j'ai rapidement esquissé la méthode de vaporisation économique par compression de la vapeur. Je vais ici en développer la description sur un exemple particulier, celui d'une liqueur aqueuse (ce sera le cas de la saumure) qui bout à 108 degrés sous la pression atmosphérique.

L'appareil qui sert à mettre en œuvre cette méthode est représenté schématiquement par la *fig.* 1, Pl. VI. C est une chaudière autoclave tubulée dans laquelle on met la liqueur à vaporiser. La vapeur d'eau émise par cette chaudière, à la pression de une atmosphère par exemple, est prise par le compresseur A et refoulée, à la pression de deux atmosphères par exemple, dans l'espace intertubulaire B de la chaudière C. A deux atmosphères, la vapeur d'eau, ne pouvant subsister qu'au-dessus de la température de 120 degrés, se condense au contact des porois qui la séparent de la liqueur à 108 degrés. On a ainsi une chute de 12 degrés pour produire la transmission de la chaleur.

L'eau chaude résultant de la condensation de la vapeur s'échappe de l'espace intertubulaire par le purgeur automatique P et va dans le serpentin S échauffer la liqueur d'alimentation, de sorte qu'elle est finalement rejetée à une température peu supérieure à celle qu'elle avait à l'origine, avant d'entrer dans l'appareil; la perte résultant de ce chef est ainsi considérablement atténuée. On réduit aussi la perte par rayonnement et conductibilité au minimum possible en entourant l'appareil de corps

mauvais conducteurs de la chaleur, de sciure de bois par exemple.

Malgré ces précautions, si l'on ne voulait parer à toutes les pertes qu'avec du travail mécanique, on serait amené, dans la plupart des cas, à le développer outre mesure. Il est alors nécessaire de combler le déficit en amenant dans l'espace intertubulaire, ou *condenseur*, une certaine quantité de vapeur étrangère.

Quoi qu'il en soit, l'efficacité de l'appareil, au point de vue de la vitesse de vaporisation, dépend de plusieurs facteurs. Toutes choses égales, elle est à peu près proportionnelle : 1° à la surface des parois du condenseur, *ou surface de chauffe;* 2° à la différence des températures de la vapeur saturée dans le condenseur et de la liqueur dans la chaudière. Pour une production donnée, c'est donc la surface de chauffe qui règle le travail mécanique dépensé. Celui-ci sera d'autant plus grand que la surface de chauffe sera plus petite, et réciproquement. En augmentant indéfiniment la surface de chauffe, s'il n'y avait aucune perte par rayonnement ou autre, on pourrait réduire le travail mécanique nécessaire, non pas à zéro, mais à un certain minimum; ce minimum est le travail qu'il faut dépenser pour comprimer la vapeur de la pression p dans la chaudière à la pression de vapeur saturée P correspondante à la température de la liqueur qui s'évapore. Ainsi, la vapeur d'eau émise par la liqueur citée plus haut, qui bout à 108 degrés sous la pression atmosphérique, possède cette température il est vrai, mais elle est surchauffée. Pour qu'à 108 degrés elle puisse se condenser, il faut qu'on la comprime à $1^{at},34$ au moins. Tel est le minimum de la compression dans ce cas.

Ce système de vaporisation, par le travail mécanique ne doit pas être confondu avec les différents moyens proposés pour tranformer la force motrice en

chaleur. Il y a bien un peu de cette transformation, puisque le travail mécanique donne un appoint de chaleur, mais ce phénomène est tout à fait accessoire, et il aurait lieu en sens inverse, c'est-à-dire le travail mécanique absorberait de la chaleur, que le procédé de vaporisation *économique* par compression de la vapeur n'en existerait pas moins. Ce procédé consiste, en effet, à rendre *utile* de la chaleur déjà existante en la portant au moyen de la force motrice à une température suffisamment élevée. La force motrice est *l'instrument* et non pas la chose elle-même sous une autre forme. Avec un travail minime on peut rendre utile beaucoup de chaleur. En comprimant, par exemple, de la vapeur d'eau de 1 à 2 atmosphères, on dépense un travail moteur équivalent à 26 calories, et on en rend disponibles 542.

« La transformation du travail en chaleur, bien loin d'intervenir ici pour fournir, comme dans l'appareil Beaumont et Mayer, 637 calories par litre d'eau, n'en produit, au contraire, que 26, lesquelles disparaitront dans les effets accessoires, mais auront eu pour rôle essentiel de provoquer la *régénération*, la *revivification* du stock de 637 calories qui a été fourni une fois pour toutes et reste ensuite perpétuellement en roulement.

« Le rapport de 26 à 637 étant égal à 4 p. 100, on s'explique bien facilement que si le premier système était condamné à l'impuissance, le second, auquel on ne demande plus qu'un résultat d'une importance vingt-cinq fois moindre, ait pu, au contraire, obtenir un succès aussi complet.

« Mais, dès lors, on peut faire encore un pas de plus. Il est bien clair, en effet que le thermogène de Beaumont et Mayer ne pouvait prétendre qu'à l'utilisation de forces purement gratuites, comme les chutes hydrauliques, sans emploi, sous peine de constituer un cercle vicieux évidemment absurde, si cette puissance eut dû être

préalablement réalisée à l'aide d'une dépense de combustible. Ici, au contraire, bien que les forces gratuites doivent, bien entendu, recevoir la préférence, rien n'empêchera, en chargeant un peu le prix de revient, de demander le faible appoint, auquel a été réduite toute la question, à une machine à vapeur, lorsque l'on voudra s'installer dans des conditions quelconques loin des cours d'eau (*). »

Je n'insiste pas davantage maintenant sur l'emploi de la force motrice pour obtenir de la chaleur utile. Je renvoie à la 5e partie et passe à l'application du procédé de vaporisation économique par compression de la vapeur.

Deux cas peuvent se présenter suivant qu'on a à sa disposition un moteur hydraulique où un moteur à vapeur. Pour le premier cas, l'application est simple : il suffit de faire mouvoir le compresseur par le moteur hydraulique. Mais, dans le deuxième, il faut utiliser la valeur d'échappement du moteur. On peut alors procéder de deux manières. Ou bien le moteur à vapeur remplace exactement le moteur hydraulique et on envoie la vapeur d'échappement dans un appareil à double ou à triple effet (ce que représente le croquis schématique n° 2, Pl. VI); ou bien on procède par *substitution de la vapeur*, de la manière suivante. Le compresseur ne prend qu'une partie de la vapeur issue de la chaudière d'évaporation. L'autre partie sert au chauffage d'un appareil à effet multiple et est remplacée dans le condenseur par la vapeur d'échappement du moteur. Le croquis n° 3, Pl. VI, représente cette disposition. A est la chaudière d'évaporation. La vapeur qui en sort se partage, par exemple, comme suit : deux tiers vont au compresseur, puis se mélangent à la vapeur d'échappement du moteur pour

(*) Haton de la Goupillière, *Bulletin de la Société d'encouragement*, septembre 1886, p. 461.

entrer dans le condenseur de la chaudière A ; l'autre tiers reste à la même pression et va chauffer un appareil à effet multiple. L'avantage de ce dispositif est de diminuer la quantité de vapeur à comprimer et par conséquent les volumes du compresseur et du moteur.

Ces procédés de vaporisation économique au moyen d'un moteur à vapeur et d'un appareil à effets multiples sont appliqués depuis quelques années dans les sucreries, surtout en Bohême, où ils procurent une économie de combustible atteignant 30 p. 100. Mais je n'entrerai pas dans plus de détails à ce sujet ; j'ai voulu seulement indiquer d'autres applications du procédé que celle qui fait plus spécialement l'objet de ce mémoire.

2° *Transmission de la chaleur à travers la surface de chauffe.*

La quantité de chaleur Q qui passe à travers la surface de chauffe Σ pendant le temps t peut se représenter par l'expression

$$Q = \gamma \theta \Sigma t, \tag{1}$$

où θ est la différence entre la température de la vapeur saturée dans le condenseur et la température moyenne de la liqueur dans la chaudière, et où le *coefficient de transmission* γ est la quantité de chaleur qui passe dans l'unité de temps, à travers l'unité de surface, pour une différence de un degré. L'inverse $\frac{1}{\gamma}$ de ce coefficient est la *résistance* totale opposée au passage de la chaleur. Cette résistance totale se décompose en trois parties :

résistance $\frac{1}{k}$ au contact de la vapeur avec la paroi,

résistance $\frac{e}{c}$ due à la paroi,

résistance $\frac{1}{k'}$ au contact avec la liqueur,

qui correspondent aux trois éléments de la question, savoir : nature et état du corps chauffeur, conductibilité et épaisseur de la surface de chauffe, enfin nature et état du corps chauffé.

On a donc :

$$\frac{1}{\gamma} = \frac{1}{k} + \frac{e}{c} + \frac{1}{k'}. \tag{2}$$

Étudions successivement chacune de ces trois résistances, dans l'ordre inverse de celui où elles ont été écrites précédemment.

1° Le passage de la chaleur d'une paroi à un corps fluide ambiant (liquide, vapeur ou gaz) se fait par *rayonnement* et *convection*. Le rayonnement est proportionnel au pouvoir émissif de la paroi; il est très faible. Pour la tôle ordinaire, il est seulement d'environ $0^{cal},05$ par mètre carré et par minute, pour une différence d'un degré et dans le cas d'un liquide ou d'une vapeur, il est négligeable relativement à la convection. Celle-ci, en toute rigueur, dépend des températures de la paroi et de l'enceinte; mais Dulong et Petit (*) ont trouvé expérimentalement que le coefficient de convection K varie très peu avec les températures tant que la différence ne dépasse pas 20 degrés, ce qui est le cas pour l'appareil qui nous occupe; ils ont trouvé également qu'il est indépendant de la pression si le fluide est un liquide, qu'il en est à peu près de même pour une vapeur, et que, en ce qui concerne les gaz, K est sensiblement proportionnel à la racine carrée de la pression.

Ce coefficient varie avec la vitesse de circulation du fluide contre la paroi. M. Ser (**) a vérifié qu'il est à peu près proportionnel à la racine carrée de la vitesse et il a trouvé que, pour l'eau, il est égal à 25 calories (par mètre carré, minute, degré) (*) à la vitesse de $0^{m},10$ par seconde. Ce chiffre convient évidemment aux dissolutions aqueuses, non sirupeuses; à l'eau salée par exemple.

(*) *Mémoire sur les lois du refroidissement dans le vide et dans les gaz* (1817).

(**) Ser, *Traité de physique industrielle*, p. 161.

Si le fluide est en repos, ou plutôt s'il ne se meut que sous l'influence de l'échauffement même, le coefficient de convection a une valeur à peu près déterminée, quoique cependant il varie entre certaines limites suivant que la forme de la paroi facilite plus ou moins le mouvement du fluide.

Pour l'air en repos, il est égal à $0^{cal},08$.

Pour l'eau et les dissolutions, il est inférieur à 10 calories et, dans le cas de l'appareil Piccard, il s'écarte peu de 4 calories.

La résistance $\frac{1}{k'}$ est donc d'environ $\frac{1}{4}$.

2° La résistance que la paroi offre au passage de la chaleur, d'une de ces faces à l'autre, est égale au quotient de son épaisseur par son coefficient de conductibilité. Comme on sait que, pour la tôle, ce coefficient est de 1 calorie par minute, on voit que, si la paroi a par exemple 5 millimètres d'épaisseur, la résistance $\frac{e}{c}$ est égale à 0,005 ; elle est donc négligeable devant $\frac{1}{k'}$.

3° La vapeur réchauffe la paroi par convection et le phénomène est identique, sauf le signe, au refroidissement de la paroi ; k est donc le coefficient de convection de la vapeur. Ce coefficient n'est pas exactement connu, mais on sait cependant qu'il est plus grand que 200 calories. On conclut de là que la résistance $\frac{1}{k}$ est, elle aussi, négligeable devant $\frac{1}{k'}$.

(*) Dans la suite je prendrai toujours pour unités de longueur et de temps le mètre et la minute.

Et, en résumé, nous voyons que la presque totalité de la résistance que la chaleur éprouve à son passage se trouve au contact du liquide et de la surface de chauffe; $\frac{1}{\gamma}$ diffère très peu de $\frac{1}{k'}$, c'est-à-dire de $\frac{1}{4}$. Mais ce résultat ne s'applique qu'au cas où l'appareil est propre. Il est considérablement modifié si des matières mauvaises conductrices viennent se déposer sur la surface de chauffe. A la résistance $\frac{e}{c}$, due à la paroi métallique, s'ajoute alors une résistance due à ces matières.

Dans l'appareil Piccard, c'est un mélange de gypse et de sel qui s'attache aux parois du condenseur et qui, à la fin des campagnes, arrive à constituer une croûte isolante dont l'épaisseur atteint 6 à 7 millimètres. Comme la conductibilité de ce mélange est d'environ $0^{cal},012$ (*), il en résulte que la résistance supplémentaire $\frac{1}{\gamma'}$ due au gypse dépasse $\frac{1}{2}$ et qu'elle est, par conséquent, plus grande que le double de la résistance totale qui existe quand l'appareil est propre. Si la surface de chauffe est plane $\frac{1}{\gamma'} = \frac{e'}{c'}$; mais, si elle est formée de tubes cylindriques, $\frac{1}{\gamma'}$ est plus grand ou plus petit que $\frac{e'}{c'}$, suivant que le liquide circule à l'intérieur ou l'extérieur des tubes.

Dans le premier cas, si γ' est le rayon intérieur des tubes, on trouve par le calcul (**) que la résistance supplémentaire est égale à

$$\frac{1}{\gamma'} = \left(1 + \frac{1}{2}\frac{e'}{r'}\right)\frac{e'}{c'} + \frac{e'}{r'}\left(1 + \frac{e'}{r'}\right)\frac{1}{k'}. \qquad (3)$$

C'est le cas de l'appareil de Salies, où $\gamma' = 26$ milli-

(*) Le coefficient de conductibilité du plâtre (avec nos unités) est inférieur à $0^{cal},01$, mais la présence du sel l'accroît très sensiblement.

(**) Soient (*fig.* 4, Pl. VI) :
r_0 et r' les rayons externe et interne des tubes,

r' et r_1 les rayons externe et interne des croûtes de gypse et de sel,
θ_0 et θ_1 les températures de la vapeur dans l'enceinte extérieure et du liquide dans l'enceinte intérieure,
τ_0 et τ' les temp. sur les faces externe et interne des tubes,
τ' et τ_1 id. des croûtes.

La quantité q de chaleur qui passe en une minute à travers 1 mètre de longueur de tube peut s'apprécier de quatre manières différentes.

1° Sur la face externe des tubes

$$q = 2\pi r_0 k_0 (\theta_0 - \tau_0).$$

2° De la face externe à la face interne des tubes

$$q = \frac{2\pi c'}{\log \frac{r_0}{r'}} (\tau_0 - \tau').$$

3° De la face externe à la face interne de la croûte de gypse

$$q = \frac{2\pi c'}{\log \frac{r'}{r_1}} (\tau' - \tau_1).$$

4° Sur la face interne de la croûte

$$q = 2\pi r_1 k_1 (\tau_1 - \theta_1).$$

En éliminant τ_0, τ', τ, entre les quatre équations précédentes, on a

$$q = 2\pi r' \frac{\gamma\gamma'}{\gamma + \gamma'} (\theta_0 - \theta_1),$$

avec

$$\frac{1}{\gamma} + \frac{1}{\gamma'} = r'\left(\frac{1}{r_0 k_0} + \frac{1}{c}\log\frac{r_0}{r'} + \frac{1}{c'}\log\frac{r'}{r_1} + \frac{1}{r_1 k_1}\right).$$

Si, dans cette expression, on fait $e = 0$, c'est-à-dire $r_1 = r$, on trouve la résistance $\frac{1}{\gamma}$ dans le cas où la croûte n'existe pas

$$\frac{1}{\gamma} = r'\left(\frac{1}{r_0 k_0} + \frac{1}{c}\log\frac{r_0}{r'} + \frac{1}{r' k'}\right).$$

Et, si l'on admet que $k' = k_0$, c'est-à-dire que la convection se

mètres et, où à la fin des campagnes, $e' = 6$ millimètres, et pour lequel, par conséquent, $\frac{1}{\gamma'}$ atteint la valeur

$$1{,}115\,\frac{0{,}006}{0{,}012} + 0{,}284 \times \frac{1}{4} = 0{,}63.$$

Dans le second cas, si r' est le rayon extérieur des tubes, on trouve que

$$(4) \qquad \frac{1}{\gamma'} = \left(1 - \frac{1}{2}\frac{e'}{r'}\right)\frac{e'}{c'} - \left(\frac{e'}{r'} - \frac{e'^2}{r'^2}\right)\frac{1}{k'}.$$

C'est le cas de l'appareil de Schönebeck où, à la fin des campagnes, $e' = 7$ millimètres avec $r' = 21$ millimètres et où, par conséquent, $\frac{1}{\gamma'}$ atteint 0,79.

Les deux formules précédentes montrent qu'il y aurait un avantage très sérieux à chauffer par l'intérieur des tubes, si le nettoyage mécanique n'obligeait pas à chauffer par l'extérieur.

3° *Détermination des pressions dans le vaporisateur et dans le condenseur.*

Les pressions de la vapeur dans le vaporisateur et dans le condenseur — c'est-à-dire avant et après la compression — ne sont pas arbitraires si le régime permanent

---

fait de la même façon à la surface de la croûte et à la surface du tube, on a

$$\frac{1}{\gamma'} = \frac{r'}{c'}\log\frac{r'}{r_1} + \frac{r'}{k'}\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r'}\right).$$

Dans cette expression, remplaçons r_1 par $r' - e$ et développons en série, en nous arrêtant aux termes du second ordre, nous avons finalement

$$\frac{1}{\gamma'} = \left(1 + \frac{1}{2}\frac{e'}{r'}\right)\frac{e'}{c'} + \frac{e'}{r'}\left(1 + \frac{e'}{r'}\right)\frac{1}{k'}.$$

est établi de telle sorte qu'on n'introduise dans l'appareil aucune vapeur étrangère et qu'on envoie dans le condenseur toute la vapeur issue du vaporisateur. Elles sont déterminées par deux conditions : la chaleur qui passe dans un temps donné à travers la surface de chauffe doit être égale, d'une part, à celle qui est rendue disponible par la condensation de la vapeur comprimée dans le même temps, et, d'autre part, à la chaleur qui est nécessaire à la formation de cette vapeur, dans le vaporisateur, augmentée des déperditions correspondantes.

Soient

- P et p les pressions dans le condenseur et le vaporisateur,
- θ_1 et θ_2 les températures de vapeur saturée correspondantes,
- τ_1 la température du liquide dans le vaporisateur,
- r_θ la chaleur de volatilisation à la température θ,
- c_v la chaleur spécifique moyenne de la vapeur, à pression constante,
- s la surchauffe de la vapeur quand elle entre dans le condenseur.

La quantité de chaleur cédée dans le condenseur par 1 kilogramme de vapeur est égale à $r_{\theta_2} + c_v s$; elle passe à travers la surface de chauffe dans le temps t nécessaire à la formation de ce kilogramme de vapeur. On a donc

$$(5) \qquad \gamma\Sigma(\theta_2 - \tau_2)t = r_{\theta_2} + c_v s.$$

A vrai dire, cette équation néglige les pertes de vapeur par fuites. Elle suppose en outre que toute la surface de chauffe est baignée par le liquide à vaporiser et que le liquide résultant de la condensation de la vapeur sort du condenseur à la température θ_2. Nous la conserverons néanmoins telle quelle pour ne pas tomber dans des complications inextricables.

La chaleur qui passe à travers la surface de chauffe sert à plusieurs usages fort différents :

1° Elle sert à porter de τ_r à τ_1 la température de la liqueur d'alimention qui entre dans le vaporisateur. Si c_m représente la chaleur spécifique moyenne de cette liqueur et m le poids de liqueur qui contient 1 kilogramme du liquide qu'il s'agit de séparer par vaporisation, la quantité de chaleur qu'il faut pour l'usage ci-dessus indiqué, est égale à

$$mc_m(\tau_1 - \tau_r).$$

2° Elle sert à produire, à la pression p et à la température τ_1, la séparation des éléments de la liqueur en vapeur, d'un côté, et solide (ou liquide), de l'autre. Pour cette séparation, il faut fournir deux quantités de chaleur. L'une, que nous désignerons par ρ, et qui peut être positive ou négative, est celle qui se dégage quand on mélange à τ_1 degrés le résidu de la séparation avec le liquide séparé (à l'état de vapeur); elle correspond à un acte de nature chimique. L'autre est celle qu'il faut pour réduire en vapeur, à τ_1 degrés, le liquide séparé; elle correspond à un acte de nature physique; comme à τ_1 degrés, la vapeur est surchauffée de $\tau_1 - \theta_1$ degrés, cette dernière quantité de chaleur est égale à

$$r_{\theta_1} + (c_v - c_l)(\tau_1 - \theta_1).$$

c_l étant la chaleur spécifique du liquide qui se vaporise.

3° Enfin elle sert à combler les pertes de diverse nature qui se produisent inévitablement. Nous désignerons par μ les pertes qui correspondent à 1 kilogramme de liquide vaporisé.

En groupant les quantités qui viennent d'être détaillées, on a finalement

$$\begin{aligned}\gamma\Sigma(\theta_2 - \tau_2)t &= r_{\theta_2} + c_v s \\ &= r_{\theta_1} + (c_v - c_l)(\tau_1 - \theta_1) + mc_m(\tau_1 - \tau_r) + \rho + \mu.\end{aligned}$$

Telles sont les équations qui déterminent θ_1 θ_2, et, par conséquent aussi, les pressions p et P.

Si le liquide qui se vaporise est l'eau (ce qui est le cas ordinaire), les quantités représentées par r_0, c_v et c_l sont assez bien connues grâce aux expériences de Regnault.

Aux environs de 100 degrés centigrades, on doit prendre

$$(6) \qquad r_0 = 607 - 0{,}70; \qquad c_v = 0{,}48; \qquad c_l = 1{,}015.$$

On aura donc dans ce cas

$$(7) \qquad \gamma\Sigma(\theta_2 - \tau_2)t \begin{cases} = 607 - 0{,}70\theta_2 + 0{,}48s \\ = 607 - 0{,}70\theta_1 - 0{,}535(\tau_1 - \theta_1) + mc_m(\tau_1 - \tau_r) + \rho + \mu. \end{cases}$$

Il s'agit maintenant de calculer la surchauffe s que la compression donne à la vapeur. Ce sera l'occasion de présenter quelques considérations théoriques sur la compression en elle-même, dont nous trouvons ici l'un des rares exemples industriels.

4° *Calcul du travail absorbé par la compression et de la quantité de chaleur rendue disponible par la condensation de la vapeur.*

Le diagramme des différentes phases de la compression est représenté par la *fig.* 5, Pl. VI.

AB correspond à l'entrée de la vapeur, à la pression p, dans le cylindre jusqu'à ce que le volume soit v_1; BC correspond à la compression de cette vapeur jusqu'à la pression P, le volume est alors réduit à v_2; CD correspond à l'évacuation de la vapeur comprimée; DA ferme le cycle.

Le travail T absorbé par la compression est représenté par l'aire ABCD, qu'on peut évaluer en la considérant comme la somme des surfaces EFBC et ECDO diminuée de la surface OFBA. On voit alors immédiatement que

$$(8) \qquad T = -\int_{v_1}^{v_2} p\,dv + P v_2 - p v_1.$$

Pour calculer l'intégrale, il faut connaître, à chaque instant de la compression, la relation qui relie p à v. Dans l'état actuel de la science, cette relation n'est pas connue d'une façon suffisamment exacte. Cependant, pour une approximation grossière, on peut admettre avec Zeuner qu'elle n'est pas éloignée de la suivante :

$$pv^n = \text{constante}. \tag{9}$$

où n varie avec le mode de compression, et calculer, d'après cela, que

$$v_2 = v_1\left(\frac{p}{\mathrm{P}}\right)^{\frac{1}{n}}, \quad \text{et que} \quad -\int_{v_1}^{v_2} p\,dv = \frac{1}{n-1}(\mathrm{P}v_2 - pv_1);$$

donc

$$\mathrm{T} = \frac{n}{n-1}(\mathrm{P}v_2 - pv_1) = \frac{n}{n-1}\,pv_1\left[\left(\frac{\mathrm{P}}{p}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1\right]. \tag{10}$$

Si les pressions sont exprimées en atmosphères (*), et si v_1 est le volume, en mètres cubes, occupé par 1 kilogramme de vapeur à la pression p, le travail nécessaire pour comprimer de p à P *1 kilogramme de vapeur par minute* est exprimé en chevaux-vapeur par la formule suivante :

$$\mathrm{T} = 2^{\mathrm{chx}},3\,\frac{n}{n-1}\,pv_1\left[\left(\frac{\mathrm{P}}{p}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1\right]. \tag{11}$$

Cette formule s'applique aussi bien au cas où la vapeur entre dans le cylindre déjà surchauffée, qu'à celui où elle entre à l'état de saturation. Mais ce dernier nous intéresse davantage, car il est presque toujours réalisé dans la pratique ; en outre, ce n'est guère qu'à la vapeur d'eau qu'on peut avoir affaire ; on peut alors simplifier la formule précédente, en prenant pour poids spécifique de la vapeur d'eau saturée l'expression donnée par Zeuner (*), d'où on tire

$$pv_1 = 1{,}65\,p^{0{,}06}, \tag{12}$$

puis

$$\mathrm{T}_1 = 3^{\mathrm{chx}},8\,\frac{n}{n-1}\,p^{0{,}06}\left[\left(\frac{\mathrm{P}}{p}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1\right]. \tag{13}$$

Nous allons maintenant appliquer cette formule générale au cas de la compression simple, puis à celui de la compression en présence de l'eau. Nous négligerons les déperditions de chaleur par l'enveloppe, c'est-à-dire que nous supposerons que la compression est *adiabatique*.

Premier cas. **La vapeur est comprimée telle qu'elle se présente, sans aucune addition de liquide.** — Pour ce cas, qui est de beaucoup le plus fréquent, il faut prendre n égal au rapport des chaleurs spécifiques à volume constant et à pression constante, rapport qui, d'après Zeuner, est égal à $\frac{4}{3}$ pour la vapeur d'eau. On a donc

$$\mathrm{T}_1 = 15^{\mathrm{chx}},2\,p^{0{,}06}\left(\sqrt[4]{\frac{\mathrm{P}}{p}} - 1\right). \tag{14}$$

Si, dans cette dernière formule, on remplace les pressions P et p par leurs valeurs approchées (19), données plus loin, en fonction des températures correspondantes θ_2 et θ_1 de vapeur saturée, et si on développe en série en s'arrêtant aux termes du second ordre, on obtient la formule suivante pour exprimer approximativement le travail en fonction de θ_2 et θ_1 :

$$\mathrm{T}_1 = 15^{\mathrm{chx}},2\,\frac{\theta_2 - \theta_1}{(\theta_1 + 51)^{0{,}94}}\left(1 + 0{,}17\,\frac{\theta_2 - \theta_1}{\theta_1 + 51}\right). \tag{15}$$

Deuxième cas. **Compression avec injection d'eau dans le**

(*) Je prendrai dorénavant, dans tout ce mémoire, l'atmosphère pour unité plutôt que le kilogramme par centimètre carré. Cela aura l'inconvénient de compliquer un peu les calculs, mais par contre, l'avantage de simplifier le langage et de le rendre plus clair.

(*) Zeuner, *Théorie mécanique de la chaleur*, trad. Arnthal et Cazin, p. 286.

cylindre, de manière que la vapeur reste constamment saturée. — Dans ce cas, il faut prendre d'après Zeuner (*) $n = 1.135$. On a alors

$$T_2 = 32^{chx} p^{0,06}\left[\left(\frac{P}{p}\right)^{0,119} - 1\right]. \quad (16)$$

En comparant les formules (14) et (16), on voit que, dans ce second cas, le travail est un peu moindre que dans le premier, mais la différence est insignifiante.

Calcul de la quantité de chaleur χ rendue disponible par la condensation de 1 kilogramme de vapeur comprimée.

Premier cas. Dans le premier cas, la vapeur comprimée est surchauffée et on a

$$\chi = r_0 + c_v s. \quad (a)$$

Pour calculer la surchauffe, il faut employer l'*équation caractéristique* de la vapeur d'eau surchauffée. A défaut d'équation exacte, nous prendrons l'équation empirique de Zeuner (**) :

$$pv = BT - Cp^{\frac{1}{4}}. \quad (17)$$

où T est la température absolue et B et C deux constantes qu'il nous est inutile de connaître pour le moment.

Ce qui nous permet de poser :

Au début de la compression . . . . $pv_1 = BT_1 - Cp^{\frac{1}{4}}$,

A la fin de la compression . . . . $Pv_2 = BT_2 - CP^{\frac{1}{4}}$,

Mais d'autre part . . . . . $Pv_2^{\frac{4}{3}} = pv_1^{\frac{4}{3}}$.

(*) Zeuner, *loc. cit.*, p. 334.

(**) *Ibid.*, p. 444.

M. J. Bertrand a donné naguère une autre équation caractéristique empirique de la vapeur d'eau : $\frac{pv}{T+127} = 2,47 \times 760$. Mais cette formule est loin de s'accorder aussi bien que l'équation de Zeuner avec les résultats des expériences de M. Hirn sur les volumes spécifiques de la vapeur d'eau surchauffée.

De ces trois égalités on tire

$$T_2 = T_1\left(\frac{P}{p}\right)^{\frac{1}{4}}. \quad (18)$$

Telle est la relation fondamentale qui permet de calculer la surchauffe ; cependant, pour l'obtenir effectivement en fonction des températures θ_2 et θ_1, il nous faut connaître la relation qui lie P à θ. Regnault a représenté ses résultats expérimentaux par une formule empirique :

$$\log P = a - b\alpha^{\theta}.$$

qui se prête peu au calcul. Je lui préfère la suivante :

$$P = \left(\frac{\theta + 51}{151}\right)^{5,4}, \quad (19)$$

qui, entre 0,4 et 15 atmosphères, c'est-à-dire entre des limites plus étendues qu'il n'est nécessaire pour la pratique, représente les résultats de Regnault à moins de $\frac{1}{200}$ près.

De cette formule, on déduit :

$$P^{\frac{1}{4}} = \left(\frac{\theta + 51}{151}\right)^{1,35},$$

Puis de (18)

$$T_2 = T_1\left(\frac{\theta_2 + 51}{\theta_1 + 51}\right)^{1,35}, \quad (20)$$

$\theta_2 - \theta_1$ n'est jamais, dans le compresseur de l'appareil Piccard, supérieur à 50 degrés, on peut donc développer en série et prendre, à $\frac{1}{100}$ près au plus,

$$T_2 = T_1\left(1 + 1,4\,\frac{\theta_2 - \theta_1}{\theta_1 + 51}\right).$$

Mais, d'une part, $T_2 = \theta_2 + s$, et, d'autre part, puisque nous supposons que la vapeur entre saturée dans le

cylindre, $T_1 = 273 + \theta_1$. Nous avons donc finalement

$$(21) \qquad s = (\theta_2 - \theta_1)\left(\frac{0{,}4\theta_1 + 330}{\theta_1 + 51}\right).$$

Et cette expression portée dans la formule (a) donne

$$(22) \qquad \chi_1 = 607 - 0{,}7\theta_2 + 0{,}48(\theta_2 - \theta_1)\,\frac{0{,}4\theta_1 + 330}{\theta_1 + 51}.$$

Deuxième cas. Dans le deuxième cas, la vapeur comprimée n'est pas surchauffée, mais en revanche une certaine quantité x est venue s'adjoindre au poids de vapeur initial. Appelons m la chaleur spécifique de la vapeur saturée ; en négligeant la chaleur absorbée par la petite quantité d'eau qui peut se trouver dans le cylindre, on a, à chaque instant de la compression,

$$dx = -(1 + x)\,\frac{m}{r}\,dT,$$

mais m est donné, comme on sait, par la relation

$$m = \frac{dr}{T} + c_l - \frac{r}{T}.$$

On a donc

$$(23) \qquad \frac{dx}{1 + x} = \frac{dT}{T} - \frac{dr}{r} - \frac{c_l}{r}\,dT.$$

Or, entre 90 et 110 degrés, on peut prendre $c_l = 1{,}015$ et $r_0 = 607 - 0{,}7\theta$; et, en intégrant logarithmiquement l'équation différentielle précédente et déterminant la constante, il vient :

$$1 + x = \frac{T_2\, r_{\theta_1}}{T_1\, r_{\theta_2}}\left(\frac{855 - \theta_2}{855 - \theta_1}\right)^{1{,}43}.$$

D'où on conclut que la quantité de chaleur χ_2 rendue disponible par la condensation de la vapeur est

$$(24) \qquad \chi_2 = (1 + x) r_{\theta_2} = r_{\theta_1}\,\frac{T_2}{T_1}\left(\frac{855 - \theta_2}{855 - \theta_1}\right)^{1{,}43}.$$

La comparaison de cette formule avec (22) montre que, dans le second cas, la quantité de chaleur disponible est, comme le travail, moindre que dans le premier cas.

Application à l'appareil Piccard. — Dans les conditions de marche moyenne on a, pour l'appareil Piccard :

$$p = 0^{atm},8 \quad \text{et} \quad P = 2^{atm},$$

d'où

$$\theta_1 = 93°88, \qquad \theta_2 = 120°6,$$
$$p^{\frac{1}{4}} = 0{,}9457, \qquad P^{\frac{1}{4}} = 1{,}1892.$$

Les formules (14) (21) et (22) donnent :

$$T_1 = 3^{chx}, \quad s = 67°7, \quad \chi_1 = 556^{cal}.$$

Mais ces résultats, qui, d'ailleurs, ont été obtenus au moyen de formules assez grossièrement approximatives, devraient être modifiés pour tenir compte des déperditions de chaleur.

DEUXIÈME PARTIE.

APPAREIL PICCARD A SEL FIN.

1° *Description de l'appareil.*

Pierre Rittinger essaya en 1855, à Vienne, d'appliquer la méthode de compression de la vapeur à la vaporisation des dissolutions salées en vue d'en retirer le sel. Il publia une brochure intitulée : *Theoretische praktische Abhandlung über ein für alle Gattungen von Flüssigkeiten anwendbares neues Abdampfverfahren mittelst einer und derselben Wärmemenge*, et essaya un appareil dans lequel le sel devait, pensait-il, se rassembler de lui-même au fond de la chaudière disposé en trémie, de sorte que, pour évacuer le sel et l'eau qui l'emprégnerait, il suffirait d'ouvrir un robinet placé à la partie inférieure. On peut voir dans l'*OEsterreichische Zeitschrift für Berg- und*

Hüttenwesen (sept. 1857) la relation des essais de Rittinger. Le robinet inférieur, quand on l'ouvrait, ne donnait que de l'eau salée chaude, et le sel, au lieu de se déposer au fond de la chaudière, s'attachait aux parois et y formait une croûte résistante qui arrêtait rapidement la transmission de la chaleur. Comme la chaudière devait nécessairement rester hermétiquement fermée pour éviter les rentrées d'air, il était difficile de rompre la croûte. En outre, le sel résultant de sa désagrégation se présentait à l'état farineux; il n'était pas commercial, car le consommateur exige généralement le sel à l'état de cristaux bien nets. L'essai était donc infructueux.

Quand on chauffe une saumure à travers une paroi, c'est contre elle que se fait l'ébullition et par conséquent aussi le dépôt de sel. Cet inconvénient ne peut être évité qu'en produisant l'ébullition au sein même du liquide et, pour cela, il n'y a pas d'autre moyen que de chauffer la saumure sous pression de manière qu'elle ne s'évapore pas et ne dépose pas de sel, puis d'abaisser brusquement la pression pour produire, dans toute la masse, une vaporisation partielle instantanée d'où résulte la formation uniforme dans l'ensemble du liquide de petits cristaux cubiques de sel qui se rassemblent rapidement au fond du vase. M. Piccard, qui a le premier formulé et utilisé ce procédé, a préféré chauffer sous pression dans un récipient et produire la vaporisation dans un autre, plutôt que de faire les deux opérations successivement dans une même chaudière, ce qui eût amené une marche discontinue. Son appareil (*), représenté schématiquement par la *fig.* 6, Pl. VI, se compose essentiellement :

(*) Le procédé de M. Piccard peut servir à la vaporisation de n'importe quelle dissolution donnant un dépôt de matières solides cristallisées ou pulvérulentes; il est indépendant du système de chauffage et s'appliquerait par conséquent aussi bien à la méthode des effets multiples qu'à celle de la compression de la vapeur.

1° D'un récipient A, que j'appellerai *calorifère*, dans lequel la saumure est chauffée sous pression par la vapeur comprimée, venant du compresseur C, dans l'espace intertubulaire B, formant *condenseur;*

2° D'un récipient E, ou *vaporisateur*, dans lequel règne une pression très inférieure à celle qui existe en A, et où la saumure, sortant du calorifère, arrive par un orifice resserré F muni d'un cône de réglage;

3° D'un *extracteur* DGH, en forme de pipe, pour enlever, sans rentrées d'air, le sel qui est rejeté par les pelles gauches et les hélices tournantes K, sur la vanne V' formant sas avec la vanne V; quand le tube V'V est plein de sel, on ferme V et on ouvre V', le sel tombe en G sur une poche en tôle perforée qu'on remonte en H pour laisser égoutter le sel et le prendre;

4° D'un *réchauffeur* S servant à échauffer la saumure froide d'alimentation au moyen de l'eau de condensation chaude sortant du condenseur B à travers le purgeur automatique p; la saumure chaude arrive dans le vaporisateur par le tuyau h; on en règle le débit au moyen du robinet R;

5° D'un *compresseur* C qui prend la vapeur dans le dôme du vaporisateur et la refoule dans le condenseur B;

6° Enfin, d'un appareil P, que j'appellerai provisoirement *cyclogène*, servant à faire circuler la saumure entre le vaporisateur et le calorifère.

A l'entrée dans le vaporisateur, le courant se partage; une partie, relativement minime, se vaporise pendant qu'une quantité correspondante de sel se dépose; l'autre partie continue son chemin, et, après avoir reçu une quantité d'eau salée d'alimentation qui remplace celle qui s'est vaporisée, retourne au calorifère où elle est ré-

chauffée par la vapeur comprimée. La température et la pression varient dans les différentes parties du circuit. Dans le vaporisateur, la pression s'écarte peu de $0^{at},8$ et la température correspondante se maintient vers 102 degrés. Dans le calorifère, la pression est, en général, de $1^{at},1$ et la température de 111 degrés. La vapeur, aspirée à 102 degrés, est comprimée à 2 atmosphères. Elle se condense à 120 degrés. On dispose ainsi d'environ 9 degrés pour opérer la vaporisation partielle de la saumure et d'autant pour opérer la transmission de la chaleur à travers la surface de chauffe.

Dans l'application à l'extraction du sel on rencontre encore une difficulté importante venant de ce que la saumure contient toujours une certaine quantité de sulfate de chaux qui, étant moins soluble à chaud qu'à froid, se dépose dans l'appareil et l'encrasse, principalement sur la surface de chauffe du calorifère. Nous verrons ultérieurement qu'il faut, au bout de quelques semaines, procéder au nettoyage. Pour le moment, écartons cette question et décrivons en détail l'appareil et son fonctionnement quand il est propre. La description qui va suivre, faite en prenant chaque organe successivement, se rapportera plus particulièrement au type installé en dernier lieu à Salies-du-Salat. Ce type est représenté par les *fig.* 1 à 4, Pl. VII, empruntées au *Portefeuille d'Oppermann*. MM. Schaeffer et Budenberg, de Magdebourg, concessionnaires, en Allemagne, des brevets Piccard, ont voulu, dans un nouveau projet, apporter quelques perfectionnements; mais leurs modifications, peu importantes d'ailleurs, m'ont paru généralement malheureuses; je n'en parlerai donc pas.

Vaporisateur. — Le vaporisateur est une chaudière cylindrique horizontale en tôle. Elle a $5^{m},50$ de longueur et $1^{m},50$ de diamètre. Le niveau de l'eau salée s'y trouve à $0^{m},45$ au-dessous de la génératrice supérieure,

de sorte que le poids total du liquide contenu est de 9 tonnes environ. La conduite de vapeur part d'un dôme (hauteur $1^{m},33$, diamètre $0^{m},75$), afin d'éviter autant que possible l'entraînement d'eau salée vésiculaire dans le compresseur (*). Dans l'axe de la chaudière se trouve un arbre, portant des pelles hélicoïdales, mû par un engrenage qui lui communique une vitesse d'un tour par minute. Il est essentiel que cet arbre ne fléchisse pas; on est obligé de lui donner un diamètre assez fort, 10 centimètres, et de le supporter en son milieu par une chaise qui prend ses points d'appui sur les parois de la chaudière.

Dans les premiers projets, l'orifice F, par lequel l'eau salée chaude s'écoule dans le vaporisateur, était placé à la partie supérieure; cette disposition était défectueuse, car elle augmentait inutilement la vaporisation partielle produite dans la conduite par la diminution de pression. Maintenant, l'orifice F est toujours placé un peu au-dessous du niveau de l'eau salée et à 40 centimètres environ du fond vertical voisin. Son diamètre est de 12 à 15 centimètres. Un cône contral, mû à la main au moyen d'un volant, permet de le rétrécir à volonté.

La longueur du vaporisateur est suffisante pour que la presque totalité des parcelles cristallines de sel — dont la densité est égale à 2,25 — aient le temps de se déposer sur les parois où elles sont ramassées par les pelles hélicoïdales et poussées peu à peu jusque dans le tube extracteur. Mais, en même temps qu'elles les poussent horizontalement, les pelles hélicoïdales les remontent et les remettent partiellement en suspension. Cet inconvénient pourrait être supprimé par l'emploi d'une chaudière de

(*) Pendant mon passage à Ebensee l'appareil était arrêté, parce que, au bout de cinq ans de marche, le dépôt de sel dans le cylindre détendeur avait été suffisant pour en faire sauter le fond.

forme lenticulaire dont le fond serait constitué par un cône à axe vertical plus ou moins aplati. Le sel déposé sur ce fond serait toujours poussé vers le bas par des racloirs tournant autour de l'axe. Cependant des essais faits avec ce système n'ont pas réussi parce qu'il se formait des croûtes de gypse qui amenaient la rupture des racloirs.

Extracteur. — Le tube vertical de l'extracteur débouche dans le vaporisateur à une distance du fond voisin qui a beaucoup varié dans les différents appareils; à Salies-du-Salat, elle est égale à $1^m,50$. Les deux vannes sont séparées l'une de l'autre par un intervalle de 1 mètre dans lequel on peut laisser s'accumuler environ 100 kilogrammes de sel. Une glace permet de voir à tout instant la quantité qui y est recueillie. Lorsque le fonctionnement des vannes est arrêté par des croûtes de sel qui s'y sont déposées, on peut les dissoudre au moyen d'un courant d'eau pure qu'on fait arriver sous les vannes par de petits tuyaux disposés pour cela. La poche, après avoir été remplie de sel, est retirée à l'aide d'une cordelette qui s'enroule sur un petit treuil.

Le sel extrait entraîne avec lui un poids d'eau presque égal au sien. Le niveau de l'eau dans la branche inclinée de l'extracteur baisserait donc rapidement si les fuites par les vannes ne le rétablissaient à mesure. Il faut d'ailleurs que ce niveau soit inférieur d'environ 2 mètres à celui de la saumure dans le vaporisateur pour que la colonne liquide fasse équilibre à l'excès de pression de l'atmosphère sur celle qui règne à la partie supérieure du vaporisateur.

Calorifère. — Dans les premiers appareils, le calorifère était constitué par une chaudière rectangulaire renfermant des plaques verticales parallèles. Pour le nettoyage, il fallait retirer ces plaques et gratter à la main le dépôt de schlot. A Salies, M. Piccard a préféré employer une

chaudière verticale tubulée dans laquelle la surface de chauffe est formée par des tubes à l'intérieur desquels circule le liquide pendant que la vapeur comprimée vient autour. Les tubes, au nombre de 600, ont $1^m,60$ de longueur et $51^{mm},5$ de diamètre; la surface de chauffe est donc de 150 mètres carrés. Primitivement, dans l'appareil de Bex, elle n'était que de 108 mètres carrés, mais on reconnut que c'était insuffisant.

Le dépôt de gypse et de sel qui se forme dans l'intérieur des tubes est enlevé mécaniquement, à la fin de chaque campagne, au moyen de mèches en acier. Nous verrons plus loin le détail de cette opération.

Le calorifère, fait en tôle de 7 millimètres, a 2 mètres de diamètre et 3 mètres de hauteur; il est placé un peu en contre-bas du vaporisateur. La saumure, qui le remplit presque, entre par le tuyau P (*fig.* 3, Pl. VII) et sort par le tuyau S. Ces deux tuyaux débouchent à la partie supérieure du calorifère et il n'y a aucune cloison qui force le liquide à circuler par les tubes. Il est alors évident qu'une grande partie de la saumure passe directement du tuyau P au tuyau S sans être chauffée autrement que par son mélange avec celle qui monte des tubes, et on voit que cette disposition présente les inconvénients suivants :

1° La saumure, se mouvant difficilement dans les tubes, le coefficient de convection est faible : il ne dépasse pas 8 calories par mètre carré, minute et degré, alors qu'une petite vitesse de circulation forcée permettrait de doubler ou tripler ce chiffre.

2° La température de la vapeur saturée dans le condenseur n'est que de 8 à 10 degrés plus élevée que celle de la saumure qui sort du calorifère par le tuyau S. Et pourtant cette chute n'est pas entièrement utilisée pour la transmission de la chaleur, puisque, dans les tubes chauffeurs, la température de l'eau salée est plus élevée

que dans le tuyau de sortie S. L'excès de pression dû à la hauteur de saumure permet des surélévations de température variant de 1°,5 à 5 degrés du haut en bas des tubes. Il y a donc là une perte de chute très importante et, en fait, le coefficient de convection *apparent*, calculé sur la chute entière de 8 à 10 degrés, n'est que de 4 calories environ.

3° Il y a lieu de présumer qu'il se produit dans les tubes une volatilisation partielle, grâce à laquelle une circulation s'y établit pendant que le courant inverse existe dans le gros tuyau central I. La vapeur formée est, il est vrai, absorbée dans la partie supérieure, mais il n'en résulte pas moins une plus grande facilité pour le dépôt de la croûte de gypse et de sel.

Il est probable qu'on améliorerait beaucoup le fonctionnement du calorifère en réunissant le tuyau P au tuyau central I de manière à forcer toute la saumure à descendre au fond et à remonter ensuite par les tubes avec une vitesse moyenne de 7 millimètres par seconde. Le coefficient de convection serait ainsi de 8 calories au lieu de 4, ce qui aurait pour conséquence de porter le coefficient de transmission à 8 calories au lieu de 4 au commencement des campagnes et à 1,6 au lieu de 1,33 à la fin. D'autre part, la température moyenne dans les tubes serait égale à la moyenne des températures dans les tuyaux P et S, d'entrée et de sortie, et on gagnerait ainsi 4 ou 5 degrés. Il résulterait de ces deux améliorations que la pression de la vapeur comprimée, au lieu de varier de 1,8 à 2,5 atmosphères du commencement à la fin des campagnes, ne varierait plus que de 1,4 à 2 atmosphères dans les mêmes conditions de marche, et l'économie réalisée sur le travail moteur serait d'au moins 20 p. 100. En outre, il ne se produirait pas de volatilisation prématurée dans les tubes et la croûte mauvaise conductrice s'épaissirait sans doute moins rapidement.

Il serait encore préférable de cloisonner les parties inférieure et supérieure du calorifère pour faire communiquer les tubes entre eux par groupes, de 40 par exemple, et alternativement, de manière à constituer un *serpentin* où la saumure serait obligée de circuler avec une vitesse importante, $0^m,10$ par seconde, par exemple. Le coefficient de convection serait alors égal à plus de 20 calories (voir p. 388) et le coefficient de transmission serait porté à 20 calories au commencement des campagnes et à près de 2 calories à la fin. Cette disposition est représentée par la *fig.* 7, Pl. VI. Une cloison *aa*, en haut, et une autre *bb*, en bas, forcent le liquide à circuler en S, comme le représentent les flèches.

Réchauffeur. — Le réchauffeur est un récipient en tôle contenant des tubes verticaux dans lesquels circule l'eau salée, et autour desquels se trouve l'eau de condensation. Un robinet à flotteur y maintient le niveau constant. La saumure, qui y entre à une température voisine de 10 degrés, en sort, à 90 degrés environ, pour aller au vaporisateur par un tube muni d'un robinet de réglage.

Compresseur. — Les compresseurs de Salies-du-Salat ont été fort bien étudiés. La coupe horizontale figurée Pl. VIII montre que la distribution s'y fait par un tiroir, dédoublé en deux coquilles A et A′ pour réduire le frottement sur la glace, et mû par un excentrique calé sur l'arbre de couche avec un retard de 97 degrés sur la manivelle. La vapeur aspirée arrive par une tubulure supérieure dans l'espace DD′ d'où elle peut s'introduire dans le cylindre par les lumières L et L′ lorsque les coquilles le lui permettent. Après avoir été comprimée, elle sort du cylindre par des passages C, C′ ménagés dans le tiroir au bout des coquilles, se rend dans la chambre de refoulement et s'échappe par la tubulure inférieure MN. Les passages CC′ sont munis d'un grillage OO, venu de fonte

avec la coquille, sur lequel vient s'appliquer une feuille flexible en bronze phosphoreux qui forme soupape, de manière à empêcher toute communication avant que la pression de la vapeur dans le cylindre ait atteint celle qui règne dans la chambre de refoulement. Cette feuille, épaisse d'un demi-millimètre, est pincée par un de ses bords entre la face de la coquille et une contre-plaque courbe EE, en bronze, qui sert aussi à limiter sa levée. En outre, détail important, pour donner une issue à l'eau de condensation qui pourrait se former dans le cylindre, le bas des lumières LL′ se trouve au niveau de la génératrice inférieure.

Ce système de compresseur, spécialement disposé pour la compression de la vapeur, fonctionne très bien.

Cyclogène. — J'arrive maintenant à la partie délicate de l'appareil Piccard. La saumure saturée est un liquide très difficile à conduire; elle forme facilement, dans les tuyaux, des croûtes de sel très dures qui les bouchent en peu de temps. M. Piccard a essayé d'abord de produire une circulation automatique, comme dans les thermosyphons, par différence de densité entre la colonne descendante et la colonne ascendante plus chaude. Mais les tuyaux s'encroûtaient en quelques heures; surtout le tuyau ascendant dans lequel l'eau trouvait en montant des pressions de plus en plus faibles et se vaporisait partiellement, en déposant du sel, avant d'entrer dans le vaporisateur. Pour empêcher cette vaporisation partielle, M. Piccard a ensuite forcé la pression dans le calorifère au moyen d'une pompe Greindl placée sur le tuyau descendant, et il a rétréci l'orifice d'écoulement dans le vaporisateur de manière à produire en ce point toute la vaporisation par suite de la chute brusque de pression. Ce procédé était encore mauvais, car la pompe était bientôt arrêtée par des dépôts de sel. En désaturant la saumure, on pouvait, il est vrai, supprimer cet effet, mais il

fallait pour cela introduire à la partie supérieure de la conduite descendante une quantité d'eau distillée égale au quart de la quantité de saumure vaporisée. Cette proportion étant exagérée (probablement parce que le mélange des deux liquides ne se fait que très imparfaitement), il fallut renoncer à appliquer ce moyen.

M. Piccard a alors imaginé de produire le passage de la saumure du vaporisateur dans le calorifère au moyen d'un sas mis en communication successivement avec chacun de ces récipients, d'une part, à la partie inférieure, pour l'écoulement du liquide, par une lanterne dans laquelle se meut un piston obturateur, et, d'autre part, à la partie supérieure, pour l'écoulement de la vapeur, par un tiroir. Piston et tiroir sont mus synchroniquement par des bielles et une manivelle qui tourne à raison de six à sept tours par minute. Les *fig.* 3 et 4, Pl. VII, montrent les dispositions de l'appareil. Quand le piston N est à gauche, la communication est établie avec le vaporisateur, et la saumure s'écoule dans le sas par le canal n et la lanterne m, pendant que la vapeur fuit à travers le tiroir et va au vaporisateur par le canal q. Quand, au contraire, le piston N est à droite, la communication est établie avec le calorifère, et la saumure s'y écoule par la lanterne et le canal p, pendant que la vapeur entre dans le sas par le canal c et le tiroir. Ainsi, à chaque coup de piston, une éclusée de saumure passe du vaporisateur dans le calorifère et une éclusée de vapeur suit le chemin inverse. Il suffit d'une différence de niveau de 40 à 50 centimètres pour produire ce mouvement.

Le sas est un récipient cylindrique en fonte de 1 mètre de diamètre, qui se prolonge à la partie inférieure par une cuve en tôle de 2 mètres de hauteur dans laquelle tombe une grande partie des parcelles cristallines entraînées par la saumure. A la fin de chaque campagne, cette cuve est complètement pleine, on la purge alors par une porte

latérale. Je donnerai ultérieurement les calculs relatifs au débit du sas. Mais il est bon de faire ressortir ici pourquoi il ne s'encroûte pas. Ce résultat nous paraît dû à trois causes : 1° les tuyaux sont aussi courts que possible, une des faces du piston mobile s'avance même à chaque coup jusqu'à la paroi intérieure du vaporisateur, de sorte qu'elle est râclée par les palettes hélicoïdales; 2° une grande partie du sel entraîné se dépose au fond de la cuve pendant que la saumure y séjourne tranquillement; 3° enfin, et surtout, cette saumure se désature parce qu'elle s'incorpore une quantité très appréciable d'eau distillée résultant de la condensation de la vapeur qui arrive du calorifère par le tiroir supérieur. Ce petit stock d'eau distillée, qui fait la navette entre le sas et le calorifère, a ainsi pour effet de désaturer la saumure au point délicat du circuit. Il y a environ 9 degrés de différence entre les températures de la vapeur et celle de l'eau salée dans le sas. On comprend donc que la condensation soit assez forte. Mais la proportion relative d'eau distillée qui s'incorpore à la saumure est limitée à un maximum qui est d'environ 1/80.

Le sas à piston est un instrument très ingénieux, grâce auquel l'appareil Piccard a pu entrer dans la pratique industrielle. Cependant il est compliqué, et on peut se demander s'il n'y aurait pas moyen de le remplacer par quelque chose de plus simple. J'estime qu'il serait bon de reprendre les essais de circulation automatique par différence de densité dans les colonnes ascendante et descendante, mais en usant d'artifices particuliers.

D'abord on pourrait empêcher les dépôts de sel dans le tuyau descendant en amenant sur la saumure, à sa sortie du vaporisateur, outre le courant d'eau salée d'alimentation légèrement désaturée, un courant de vapeur issue du calorifère. Celle-ci, se trouvant à une pression supérieure, s'injecterait avec force dans la saumure, se mélangerait intimement avec elle, se condenserait à son contact et la désaturerait complètement. Il se produirait le même phénomène que dans le sas, mais avec une intensité beaucoup plus efficace encore. Quant à l'encroûtement du tuyau ascendant, on le supprimerait peut-être en imprimant au courant une très grande vitesse. Ce résultat ne serait pas difficile à obtenir. Il suffirait d'étrangler la conduite, non pas à sa partie supérieure, comme dans les appareils actuels, mais à sa partie inférieure, tout près du calorifère. La vaporisation immédiate d'une partie de l'eau, au passage de cet étranglement, donnerait naissance à un mélange de vapeur, d'eau salée et de sel, ayant une densité moyenne très faible. Ce serait donc la presque totalité de la colonne descendante qui produirait l'impulsion, et on sait qu'il suffit d'une pression très faible pour imprimer une grande vitesse à un mélange de liquide et de vapeur. Par exemple, avec une différence de niveau de 2 mètres entre le calorifère et le vaporisateur, on trouve, en se servant de la formule de Zeuner (voir formule 55, p. 443), que la vitesse d'écoulement serait de plus de 20 mètres par seconde. Est-ce que, dans ces conditions, le dépôt de sel sur les parois du tuyau serait possible? M. Piccard, à qui j'ai communiqué cette idée, pense que oui. Toutefois l'expérience reste à faire.

Accessoires. — Pour réduire, autant que faire se peut, les déperditions de chaleur, tout l'appareil est entouré d'encaissements en planches remplis de sciure de bois, corps mauvais conducteur facile à se procurer à bon marché.

Des manomètres permettent de voir à chaque instant les pressions de la vapeur dans le vaporisateur, le calorifère et le condenseur.

Un tube en métal *xy* (*fig* 1, Pl. VII) indique le niveau de l'eau dans le vaporisateur, niveau qui doit être maintenu aussi peu variable que possible et qu'on règle à la main

en ouvrant plus ou moins le robinet R placé sur le tuyau h d'alimentation. Une disposition ingénieuse a été prise pour empêcher les dépôts de sels dans le tube indicateur de niveau et le tenir constamment propre. Cette disposition consiste en un petit tuyau métallique z qui serpente dans l'air et communique, d'un côté, avec le dôme de vapeur; et, de l'autre, avec l'extrémité supérieure x du tube indicateur, qui reçoit ainsi toute l'eau distillée résultant de la condensation de la vapeur dans le petit tuyau. Un appareil tout semblable indique aussi le niveau du liquide dans le calorifère.

2° *Influence du dépôt de gypse.*

Si la saumure ne contenait que le sel, l'appareil, une fois mis en marche, pourrait fonctionner indéfiniment. Mais elle contient aussi du sulfate de chaux qui, étant moins soluble à chaud qu'à froid (*), se dépose sur les parois et particulièrement sur les surfaces de chauffe du calorifère (**) et y forme, concurremment avec un peu de sel et de sulfate de magnésie, une croûte de *schlot* dure, adhérente, à surface rugueuse (voir *fig.* 8, Pl. VI, une coupe de cette croûte en vrai grandeur) qui a pour effet d'accroître considérablement la résistance au passage de la chaleur. En outre, il faut encore compter avec des agglomérations locales de sel, un peu partout.

Après un certain temps de marche, constituant une *campagne*, on est donc obligé d'arrêter l'appareil pour le nettoyer. Les campagnes durent de 20 à 25 jours pendant

(*) La diminution de la solubilité du sulfate de chaux avec la chaleur est loin de suffire à l'explication du dépôt, qui dépasse 2 tonnes par campagne; il se fait aussi, sans doute, des doubles décompositions.

(**) En employant les termes des salines à feu on peut dire que le *schlottage* se fait dans le calorifère, tandis que le *salinage* se fait dans le vaporisateur.

lesquels l'épaisseur de la croûte atteint 6 et 7 millimètres, de telle sorte que le coefficient de transmission de la chaleur est réduit au tiers. Il s'ensuit que la pression de la vapeur comprimée, qui était primitivement de $1^{at},8$ environ, devient égale à $2^{at},5$, la pression au vaporisateur étant demeurée égale à $0^{at},8$ ou même ayant diminué jusqu'à $0^{at},6$.

Voyons maintenant comment se fait le nettoyage. La condition principale à remplir est évidemment d'aller vite, car il faut réduire autant que possible les chômages. Or, c'est le nettoyage de la surface de chauffe qui offre le plus de difficultés; c'est donc surtout de ce côté qu'on a cherché des améliorations. Dans les premiers appareils, il fallait démonter complètement le calorifère, après l'avoir vidé, et gratter à la main la croûte de schlot déposée sur les plaques constituant la surface de chauffe. C'était long et coûteux. M. Piccard a simplifié beaucoup cette opération en imaginant le calorifère tubulé, décrit ci-dessus, qui permet d'enlever mécaniquement, au moyen de mèches en acier, le dépôt fait à l'intérieur des tubes, et cela sans vider le calorifère.

Voici comment on opère à Salies-du-Salat. Après avoir arrêté l'appareil, on enlève le couvercle II′ (*fig.* 1, Pl. VII) du calorifère et on pose à sa place le support à trois branches OA, OB, OC, représenté en plan et en coupe par les *fig.* 1 et 2, Pl. VIII, de manière que les axes coïncident exactement. On enfile ensuite un porte-mèche en acier M (*fig.* 1), dans la roue d'angle R_1, qui est portée par un chariot F. Ce chariot peut glisser tout le long des bras D_1E_1, D_2E_2 (*fig.* 2) qui eux-mêmes sont susceptibles d'être déplacés d'un bout à l'autre d'une glissière AB. Par ce double mouvement, parallèlement à deux axes rectangulaires, il est possible d'amener la mèche dans l'un quelconque des tubes situés dans le demi-cercle opposé à la branche OC. Lorsque ce demi-cercle est nettoyé, on tourne le support de 180 degrés, et on nettoie l'autre de la même

manière. Les porte-mèches pèsent de 16 à 20 kilogrammes; les mèches leur sont fixées au moyen d'un manchon-écrou (*fig.* 3) qui sert en même temps de guide. Elles s'enfoncent dans les tubes par leur propre poids à mesure que, sous l'influence d'une rotation de 300 tours à la minute environ, elles rongent la couche de schlot et la réduisent en petits fragments qui tombent au fond du calorifère.

Il reste à expliquer par quel moyen on transmet le mouvement entre la roue d'angle R_1, qui entraîne la mèche, et la roue d'angle R_0 qui est mue par un arbre fixe situé au plafond de l'usine, avec l'intermédiaire d'un arbre vertical amovible qu'on place au moment du nettoyage. Cette transmission se fait par l'arbre G (*fig.* 1) sur lequel sont enfilées les roues d'angle r_0 et r_1, qui peuvent être fixées en un point quelconque de cet arbre au moyen de vis de pression. Ces roues r_0 et r_1 forment respectivement, avec les roues R_0 et R_1, deux engrenages côniques renfermés chacun dans une noix qui peut tourner librement autour de son axe. Le pied *p* de la noix centrale *a* (*fig.* 1) se meut dans une gorge du socle fixé au trépied OA, OB, OC; le pied de la noix *b* se meut dans une gorge que porte le chariot mobile F. Grâce à cette disposition, la noix *b*, qui est traversée par le porte-mèche, peut se déplacer suivant des coordonnées polaires pendant que le chariot F se déplace suivant des coordonnées rectangulaires.

Primitivement, on enlevait, dans chaque tube, la couche de gypse en une seule fois. On s'est aperçu ensuite qu'il valait mieux l'enlever en deux passes successives avec des mèches de diamètres inégaux. De cette manière, on est arrivé à réduire à deux jours la durée du nettoyage du calorifère.

En somme, en déduisant les chômages, l'appareil Piccard peut fonctionner régulièrement chaque année pendant 260 à 280 jours pleins et produire ainsi environ 1.000 tonnes de sel fin.

3° *Différentes manières d'employer l'appareil Piccard.*

Dans ce qui va suivre, je vais dire comment l'appareil Piccard peut être employé suivant qu'on a à sa disposition un moteur hydraulique ou un moteur à vapeur. Ce sera l'occasion de décrire rapidement les installations de Salies-du-Salat, de Maixe, de Schönebeck et d'Ebensee.

Cas du moteur hydraulique. — A Salies-du-Salat, il y a deux appareils accouplés symétriquement sur un seul compresseur de $0^m,68$ de diamètre et $0^m,90$ de course. Le nombre des tours étant de 60 par minute, il en résulte que le volume engendré est de 38 mètres cubes par minute. Ce compresseur est mû par une turbine qui peut développer 150 chevaux de force, mais il faut compter qu'un appareil Piccard nécessite seulement une moyenne de 50 chevaux.

Bien que la plus grande partie de l'appareil soit entourée d'une épaisse couche de sciure de bois, les pertes de chaleur par rayonnement et conductibilité augmentent beaucoup à la fin des campagnes. On est alors obligé d'introduire dans le condenseur une certaine quantité de vapeur étrangère. Il est donc indispensable d'avoir un générateur, qui sert d'ailleurs aussi pour la mise en marche. Mais si l'emploi de la force motrice hydraulique ne supprime pas complètement la dépense de combustible, elle la réduit dans une très forte proportion puisque, avec 1 kilogramme de houille, on fait à Salies 40 kilogrammes de sel au moins, tandis que dans les salines à feu on n'en fait que $2^{kg},2$ environ.

Cas du moteur à vapeur. — Si on n'a pas à sa disposition de force hydraulique on peut se servir d'un moteur à vapeur, mais il est alors nécessaire d'utiliser la vapeur

d'échappement du moteur. Plusieurs dispositions ont été adoptées pour cela.

a. **Disposition de Maixe.** — A Maixe, on a installé deux appareils Piccard conjugués avec une poêle à circulation. L'un des appareils fonctionne avec un compresseur à vapeur comme avec un compresseur hydraulique, c'est-à-dire qu'il condense lui-même toute la vapeur produite au vaporisateur. L'autre est monté en double effet avec la poêle à circulation. Il reçoit dans son condenseur la vapeur d'échapement du moteur du premier appareil et envoie la sienne dans la poêle à circulation.

Il est peut-être utile de dire ce que c'est qu'une poêle à circulation. C'est une poêle ordinaire PP′ (*fig*. 4, Pl. VIII) partagée longitudinalement en deux bassins par une cloison CC qui s'arrête à quelque distance de l'extrémité P. A l'autre extrémité P′ se trouve, au-dessous de la poêle et communiquant avec elle par trois trous, une véritable chaudière tubulaire R, dans les tubes de laquelle vient la vapeur de chauffage. La saumure qui y est réchauffée monte dans la poêle par l'orifice A. Elle circule en contournant la cloison, s'évapore, laisse déposer du sel, se refroidit, revient à l'extrémité P′ et descend au fond de la chaudière par les deux tuyaux BB pour se réchauffer de nouveau et reprendre sa course. Le mouvement est entretenu par la différence entre les densités de l'eau chaude et de l'eau froide.

Cette poêle à circulation donne du gros sel.

b. **Disposition d'Ebensee.** — A Ebensee on n'a qu'un appareil Piccard. On marche par vapeur substituée, c'est-à-dire qu'on ne comprime qu'une partie de la vapeur venant du vaporisateur, l'autre partie va travailler dans un cylindre détendeur où la pression de l'échappement est mainteue à $0^{at},1$ par un condenseur à eau. Elle est remplacée au calorifère par la vapeur du moteur, dont la pression d'échappement est ainsi comprise entre $1^{at},8$ et $2^{at},5$. La *fig*. 9, Pl. VI, représente schématiquement cette disposition. Elle n'améliore pas beaucoup le rendement, mais elle procure une économie dans les frais de premier établissement par suite de la réduction dans les dimensions du moteur et du compresseur. Les trois cylindres : moteur, compresseur, détendeur, ont la même course, mais leurs diamètres sont respectivement égaux à 25,46 et 55 centimètres.

La pression du vaporisateur est maintenue à $0^{at},8$ par le mécanicien qui, de temps en temps, règle à la main l'admission dans le détendeur. Au début des campagnes, le partage de la vapeur se fait à peu près par moitié entre le compresseur et le détendeur, mais vers la fin, quand la couche de gypse a une épaisseur de 5 millimètres, le compresseur, quoique ne donnant plus que 45 à 47 révolutions par minute au lieu de 50, et comprimant par conséqnent moins de vapeur, travaille davantage puisque la pression dans le condenseur du calorifère est de $2^{at},5$ au lieu de 1,8; il en résulte qu'une plus grande quantité de vapeur d'échappement s'introduit dans le calorifère et que, par suite, une plus grande quantité de vapeur du vaporisateur va travailler dans le cylindre détendeur du moteur. Le tableau ci-dessous indique les quantités de vapeur produites par minute dans le vaporisateur au commencement et à la fin des campagnes, ainsi que la manière dont se fait le partage.

	QUANTITÉS DE VAPEUR QUI, PAR MINUTE,		
	sortent du vaporisateur	vont au cylindre compresseur	vont au cylindre détendeur
Commencement de la campagne.	$7^{kg},5$	$3^{kg},7$	$3^{kg},8$
Fin de la campagne.	$8^{kg},6$	$3^{kg},0$	$5^{kg},6$

On voit par ce tableau que la production en sel s'ac-

croît à la fin des campagnes ; c'est là un phénomène particulier à l'appareil d'Ebensee qui arrive ainsi à fournir $4^t,3$ de sel par jour, et environ 1.200 tonnes par an.

c. **Disposition de Schönebeck.** — La disposition adoptée à Schönebeck participe des deux précédents. Ici, il n'y a qu'un appareil Piccard marchant par substitution de la vapeur d'échappement à une partie de la vapeur du vaporisateur. On ne comprime donc que la moitié environ de la vapeur ; quant à l'autre moitié, on l'envoie se condenser dans une poêle à circulation. Une soupape en règle automatiquement le débit de façon à maintenir la pression dans le vaporisateur à $0^{at},8$.

d. **Généralités.** — L'étude approfondie de ces diverses dispositions nous entraînerait beaucoup trop loin (*). Je dirai seulement que 1 kilogramme de vapeur introduit dans le condenseur du calorifère de l'appareil Piccard produit $0^{kg},82$ de vapeur à la sortie du vaporisateur — ce qui permet de se faire une idée des pertes par rayonnement et conductibilité — et que 1 kilogramme de vapeur issue du générateur produit finalement environ $1^{kg},5$ de vapeur dans le vaporisateur et par conséquent $0^{kg},54$ de sel. En admettant que le générateur ait un rendement de 60 p. 100, on voit que 1 kilogramme de bonne houille, dégageant 8.000 calories, donnera environ 4 kilogrammes de sel, c'est-à-dire près du double de ce qu'il donne dans les salines à feu ordinaires.

Les appareils de Maixe, de Schönebeck et d'Ebensee, fonctionnent avec l'aide d'un compresseur, il est cependant facile de se rendre compte que ce compresseur, qui coûte cher et occasionne de grandes pertes de calorique, est tout-à-fait superflu. Il est, en effet, préférable, comme

(*) Pour ce qui concerne l'appareil d'Ebensee, on trouvera une ample description dans un article publié par M. Max von Arbesser, dans le 2e cahier de 1882 du *Berg- und Hüttenmännisches Jahrbuch*, de Leoben.

je vais le montrer, d'envoyer *directement* la vapeur du générateur dans le calorifère d'un appareil Piccard monté en double effet avec une poêle à circulation ou mieux encore en triple effet avec un second appareil Piccard et une poêle à circulation.

Soit, par exemple, le premier cas. 1 kilogramme de vapeur du générateur introduit dans le calorifère donne au vaporisateur, comme nous venons de le dire plus haut, $0^{kg},82$ de vapeur qui introduit dans la poêle à circulation évapore $0^{kg},82 \times 0^{kg},80 = 0^{kg},66$ d'eau ; 1 kilogramme de vapeur du générateur vaporise donc au total $1^{kg},48$ d'eau, ou 2 kilogrammes de saumure, c'est-à-dire autant qu'avec l'appareil d'Ebensee. Outre la suppression du moteur, cette disposition offre l'avantage d'avoir une grande chute de température entre le condenseur et le vaporisateur, ce qui permet de diminuer la surface de chauffe ainsi que la vitesse de circulation de la saumure. Ainsi, avec des pressions de : 3 atmosphères au condenseur, $1^{at},3$ au calorifère et $0^{at},8$ au vaporisateur, on disposerait de 19 degrés pour opérer la transmission à travers la surface de chauffe, qui pouvait être par conséquent réduite à 80 mètres carrés et de 14 degrés, au lieu de 8 degrés, pour la vaporisation partielle de l'eau ; la circulation ne serait plus alors que de 315 litres par minute au lieu de 550. Un autre avantage, c'est qu'il serait facile de conserver la même production au sel, pendant toute la durée des campagnes, en augmentant la pression au condenseur à mesure que la croûte de gypse s'accroîtrait.

La combinaison de deux appareils Piccard montés en triple effet avec une poêle à circulation serait encore préférable. Mais il est vrai qu'elle comporte un appareil à haute pression pour lequel il serait nécessaire de prendre certaines précautions, et, notamment, d'augmenter l'épaisseur des tôles. Le croquis n° 6, Pl. VIII, représente

cette disposition et indique les températures et pression moyennes dans chaque organe. 1 kilogramme de vapeur du générateur produirait la vaporisation des quantités d'eau suivantes : $0^{kg},82$ dans l'appareil n° 1, $0^{kg},82 \times 0,82 = 0^{kg},67$ dans l'appareil n° 2, et $0^{kg},67 \times 0,80 = 0^{kg},54$ dans la poêle à circulation; soit au total 2 kilogrammes. On ferait donc 5 kilogrammes de sel par kilogramme de houille, c'est-à-dire deux fois et demie plus que dans les salines à feu ordinaires.

En résumé, les explications qui précèdent nous montrent que, pour l'extraction du sel, le procédé d'évaporation économique par compression de la vapeur ne convient que dans le cas où on a un moteur hydraulique.

4° *Conduite de l'appareil.*

La mise en marche s'effectue de la manière suivante. Après avoir rempli l'appareil d'eau salée, on introduit dans le condenseur du calorifère, par un tube disposé à cet usage, de la vapeur à deux atmosphères fournie par le générateur spécial, et on fait tourner à la main le mécanisme de la circulation. L'eau s'échauffe peu à peu. Quand elle a atteint sa température d'ébullition, ce qui arrive au bout de dix à onze heures si elle avait primitivement une température de 10 degrés environ, on met le moteur en mouvement. Alors l'évaporation commence, mais ne produit d'abord qu'une concentration de la liqueur, sans dépôt de sel, jusqu'à ce que l'eau devienne saturée; c'est-à-dire pendant une période qui pourrait durer cinq ou six heures si toute la saumure sortait de la mine. La marche normale commence aussitôt que le dépôt s'effectue. Elle se poursuit ensuite jour et nuit pendant toute la durée de la campagne. Il faut pourtant arrêter le moteur tous les jours pendant une demi-heure environ pour exécuter les graissages.

On travaille à deux postes. Les poches de sel se retirent d'heure en heure, comme à Ebensee, ou de demi-heure en demi-heure comme à Salies-du-Salat. Les manœuvres portent le sel à une turbine essoreuse (voir le plan de la halle à sel fin de l'usine de Salies, *fig.* 1 à 4, Pl. X), d'où il est conduit dans les magasins. Chaque appareil occupe de un à deux hommes par poste, sans compter les ouvriers spéciaux.

La marche se règle au moyen du cône qui ferme plus ou moins l'orifice d'écoulement de la saumure dans le vaporisateur. Elle se règle aussi d'après la quantité de vapeur qui entre dans le condenseur du calorifère. Pour l'appareil de Schönebeck, le détendeur automatique se charge de ce réglage. Avec la disposition d'Ebensée, il faut que le mécanicien agisse de temps en temps sur l'admission dans le cylindre détendeur. Enfin avec l'appareil à moteur hydraulique de Salies-du-Salat, le réglage se produit de lui-même au début des campagnes. Mais, au bout de quelques jours, la vapeur refoulée par le compresseur devient insuffisante et il faut alors ouvrir plus ou moins le robinet qui donne la vapeur du générateur spécial.

La durée des campagnes varie un peu. L'appareil d'Ebensee ne peut marcher que pendant dix-sept à vingt jours, après quoi les plaques du calorifère sont recouvertes d'une croûte de 5 millimètres d'épaisseur, qu'il faut gratter. Celui de Salies-du-Salat fait communément des campagnes de vingt-cinq jours. Au bout de ce temps l'épaisseur de la croûte de schlot atteint 6 à 7 millimètres.

Outre le recurage du calorifère, il faut, après chaque campagne, enlever le magma de sel qui s'est déposé au fond du sas. Les autres parties de l'appareil n'exigent pas des nettoyages aussi fréquents. On doit cependant visiter les tuyaux de conduite et le réchauffeur tous les

trois mois. Le vaporisateur demande quelques soins particuliers ; il faut parfois le vider pour détruire les amoncellements, *les loups* de sel qui s'y sont formés. Enfin le mécanisme, le moteur, les générateurs reçoivent de temps en temps des réparations.

Le nettoyage dure généralement deux jours, mais parfois il dure bien davantage. En somme l'appareil marche pendant environ 280 jours pleins par an et produit de 1.000 à 1.200 tonnes de sel fin.

5° *Cas où l'emploi de l'appareil Piccard est avantageux.*

Pour savoir si, pour la fabrication du sel, il vaut mieux employer l'appareil Piccard plutôt que l'ancien système des poêles, il n'y a qu'à calculer le prix de revient dans chacun des cas.

Soient :

r le rapport du poids de houille consommée à celui du sel produit,
c le prix de la tonne de houille rendue à l'usine,
a la part de frais d'amortissement par tonne de sel,
m le prix de la main-d'œuvre id.
n la part de frais d'entretien id.
g la part de frais généraux id.

On a pour prix de revient de la tonne de sel,

$$p = rc + a + m + n + g.$$

Les salines n'étant sujettes à aucune modification importante, on peut répartir l'amortissement du matériel sur un grand nombre d'années, sur vingt-cinq ans par exemple. Nous calculerons donc l'amortissement au taux de 7 p. 100, intérêts à 4,5 p. 100 compris.

Cas d'une saline qui emploie les poêles à feu. — Une bonne poêle à feu, de 120 mètres carrés de surface, coûte environ 30.000 francs, en y comprenant le bâtiment, et

fait en bloc 4.000 tonnes de sel par an, arrêts déduits, en brûlant un peu plus de 1.800 tonnes de houille. On a donc

$$c = \frac{1}{2,2} \qquad a = \frac{7}{100} \times \frac{30000}{4000} = 0^f,50.$$

Chaque poêle de la grandeur précitée emploie seulement six hommes, dont quatre de jour et deux de nuit, et la main-d'œuvre revient à environ 3 francs par tonne.

Les frais d'entretien n sont relativement minimes ; comptons $0^f,50$ par tonne.

Les frais généraux g dépendent de l'importance de l'usine, nous supposerons $g = 2$ francs, pour fixer les idées.

Dans ces conditions le prix de revient est

$$p = \frac{c}{2,2} + 6 \text{ francs},$$

et si, par exemple, la houille coûte 30 francs la tonne, on a

$$p = 20^f,10.$$

Tel est à peu près le prix de revient du sel dans les salines à feu.

Cas d'une saline pourvue d'appareils Piccard avec moteur hydraulique. — Un appareil Piccard, fabriquant 1.000 tonnes de sel par an, coûte tout installé plus de 30.000 francs ; en ajoutant les accessoires, turbines, générateur, essoreuse, machine à nettoyer les tubes, et le bâtiment, on arrive au total de 50.000 francs, d'où

$$a = \frac{7}{100} \times \frac{50000}{1000} = 3^f,5.$$

La consommation de houille, tant pour la mise en marche que pour les injections de vapeur dans le calorifère, est d'environ 25 kilogrammes par tonne de sel : $r = \frac{1}{40}$.

La main-d'œuvre est plus chère que pour les poêles. Un appareil isolé nécessite sept hommes, dont quatre de jour et trois de nuit. Mais dans une usine renfermant plusieurs appareils, il ne faut pas relativement plus d'hommes qu'avec les poêles. Cependant les machines exigent des ouvriers spéciaux qui coûtent plus cher.

Les frais d'entretien doivent aussi être plus considérables, car les turbines, les compresseurs, les appareils et les générateurs sont des engins délicats qui demandent à être réparés plus souvent qu'une simple poêle. Admettons pourtant que les frais de main-d'œuvre et d'entretien ne s'élèvent pas à plus de $3^f,50$, comme avec les poêles.

Quant aux frais généraux, ils sont à peu près les mêmes dans les deux cas : $g = 2$ francs.

Dans ces conditions, on a donc :

$$p = \frac{c}{40} + 9^f.$$

La comparaison de cette formule avec la précédente montre que l'appareil Piccard serait plus avantageux si la houille coûtait plus de 8 francs, et que, si elle coûtait 30 francs, l'économie sur le prix de revient serait de 10 francs environ. Mais cette économie pourrait être très réduite, d'une part, par l'excès de main-d'œuvre et d'entretien, d'autre part, par les dépenses souvent très considérables qu'entraînent les prises d'eau tant pour les travaux proprement dits que pour les indemnités à accorder aux riverains.

Cas d'une usine pourvue d'appareils Piccard avec moteur à vapeur. — Dans ce cas, l'appareil Piccard peut fournir 1.200 tonnes de sel par an, mais l'installation coûte encore environ 50.000 francs, d'où $a = 3$ francs.

La consommation de combustible est moindre qu'avec les poêles. A Ebensee, des expériences officielles ont

donné 52 p. 100 d'économie de combustible, mais ce chiffre ne convient pas à la pratique courante. Actuellement on y brûle du lignite d'Attnang qui donne $1^{kg},6$ de sel par kilogramme, tandis qu'il ne donne que $1^{kg},2$ à $1^{kg},3$ avec les poêles ; l'économie n'est donc que de 25 p. 100. A Schönebeck, où l'on brûle aussi du lignite, elle est de 30 p. 100. Cependant, il faut considérer que ces appareils sont isolés. Une usine qui en contiendrait plusieurs pourrait économiser beaucoup plus, d'abord, parce que les générateurs et les compresseurs fonctionneraient dans de meilleures conditions, ensuite, parce que l'on pourrait employer la vapeur d'échappement à faire des effets multiples. Je supposerai donc que l'économie peut être de 50 p. 100, c'est-à-dire qu'on pourrait faire $4^t,4$ de sel avec une tonne de houille.

Les frais de main-d'œuvre et d'entretien et les frais généraux étant à peu près les mêmes que pour le cas du moteur hydraulique, on a :

$$p = \frac{c}{4,4} + 8^f,50.$$

Pour $c = 30$ francs, le prix de revient serait de $4^f,30$ seulement inférieur à ce qu'il est avec les poêles, et encore, comme je l'ai dit plus haut, il y aurait lieu de laisser une marge pour l'excès des frais de main-d'œuvre et d'entretien.

En résumé, nous voyons que l'économie de combustible réalisée par l'appareil Piccard sur la consommation des poêles est en grande partie compensée par le supplément d'amortissement du capital engagé. La lutte entre les deux appareils commence lorsque le prix de la tonne de houille, *ou de la quantité de combustible équivalente*, est supérieur à 8 francs, mais l'appareil Piccard ne paraît avoir un avantage incontestable qu'au delà de 15 francs. Quant à l'appareil avec moteur à vapeur, il

faudrait que le combustible coûtât un prix élevé, plus de 25 francs par tonne, pour qu'il pût supplanter les poêles.

TROISIÈME PARTIE

CALCULS ET DISCUSSIONS RELATIVES A L'APPAREIL PICCARD A SEL FIN

Pour bien se rendre compte des conditions de marche de l'appareil Piccard, il est nécessaire de se livrer à quelques calculs malheureusement assez compliqués. Ce sera l'objet de cette troisième partie.

L'eau salée qu'on obtient par la dissolution des couches de sel gemme enfouies dans le sol est presque saturée à la température de 10 degrés. Elle renferme généralement 36 de sel pour 100 d'eau, en poids. Elle renferme, en outre, des sulfates et des chlorures de chaux et de magnésie ; mais ces matières sont en quantité assez minime pour que nous puissions les négliger dans les calculs qui vont suivre. Avant de commencer, notons que la solubilité de sel peut se représenter en fonction de la température par l'expression

(25) $$36 + 0{,}048\,\theta \text{ pour } 100.$$

Elle est donc de 41,2 p. 100 à 108°,2, température d'ébullition sous la pression atmosphérique. Notons aussi que cette température d'ébullition τ_1 varie avec la pression p et qu'elle est liée à la température θ_1 de vapeur saturée à la pression p par la relation approximative suivante :

(26) $$\tau_1 = 1{,}067\,\theta_1 + 1{,}5.$$

En utilisant la formule (19), on a entre p et τ_1 la relation ci-dessous, approchée à moins de 1 millième

près dans les limites où nous l'emploierons :

(27) $$p = \left[\frac{\tau_1 + 53}{161{,}2}\right]^{5,4}.$$

1° *Calcul des pressions dans le vaporisateur et le condenseur.*

Les pressions p, dans le vaporisateur, et P, dans le condenseur, ou plutôt les températures de vapeur saturée θ_1 et θ_2 qui leur correspondent, sont déterminées par les équations (4) que nous écrirons de la façon suivante :

(28) $$\begin{cases} \gamma \Sigma t(\theta_2 - \tau_2) = 607 - 0{,}7\,\theta_1 - 0{,}535(\tau_1 - \theta_1) + mC_m(\tau_1 - \tau_r) + \rho + \mu \\ 0{,}48\,s = 0{,}7(\theta_2 - \theta_1) - 0{,}535(\tau_1 - \theta_1) + mC_m(\tau_1 - \tau_r) + \rho + \mu. \end{cases}$$

Mais il est plus intéressant de connaître τ_1, température dans le vaporisateur, que θ_1. En remplaçant θ_1 par sa valeur tirée de (26), on a

(29) $$607 - 0{,}708\,\theta_1 - 0{,}535\,(\tau_1 - \theta_1) = 607 - 0{,}692\,\tau_1.$$

Les équations (28) deviennent

(30) $$\begin{cases} \gamma \Sigma t(\theta_2 - \tau_2) = 607 - 0{,}692\,\tau_1 + mC_m(\tau_1 - \tau_r) + \rho + \mu \\ 0{,}48\,s = 0{,}708(\theta_2 - \tau_1) + 0{,}016\,\tau_1 + mC_m(\tau_1 - \tau_r) + \rho + \mu. \end{cases}$$

Examinons successivement chacune des quantités qui entrent dans ces équations.

γ, coefficient de transmission de la chaleur, peut varier du simple au triple. Au début des campagnes, quand l'appareil vient d'être nettoyé, γ est voisin de 4 calories par mètre carré, minute et degré ; à la fin, il s'abaisse à $1^{cal},33$. Ses variations, sous l'influence de la formation continue de la croûte de schlot, ont été étudiées pages 390 et 391.

Σ, ou surface de chauffe, est égale à 150 mètres carrés, comme il a été dit.

t est le temps nécessaire à la formation de 1 kilogramme

de vapeur dans le vaporisateur. Pour une production journalière de 4t,5 de sel, ce temps serait égal à 8 secondes ; vers la fin des campagnes, où la production s'abaisse à 3t,5, le temps t s'approche de 10 secondes. Si on pose $a = \gamma \Sigma t$, a est le nombre des calories qui passent à travers la totalité de la surface de chauffe, pour une chute de 1 degré, dans le temps nécessaire à la production de 1 kilogramme de vapeur. Au commencement des campagnes, a est voisin de 80 calories ; à la fin, il descend parfois jusqu'à 25 calories.

τ_2 est la température de l'eau salée dans le calorifère. Elle est plus grande que τ_1, température dans le vaporisateur, d'un nombre de degrés que je désignerai par δ, de sorte que $\tau_2 - \tau_1 = \delta$.

$\tau_1 - \theta_1$ est la surélévation de la température d'ébullition due à la présence du sel ; d'après (26) $\tau_1 - \theta_1 = 0{,}067\theta_1 + 1{,}5$.

$\tau_1 - \tau_r$ est une donnée résultant de la manière dont le réchauffeur fonctionne ; généralement τ_1 s'écarte peu de 90 degrés, et $\tau_1 - \tau_r$ de 12 degrés.

m est le rapport du poids de la saumure à celui de l'eau pure qu'elle contient ; $m = 1{,}36$. C_m est la chaleur spécifique de la saumure, $C_m = 0{,}78$. Donc, $mC_m = 1{,}06$. Mais nous devons ici prendre garde que le sel extrait de l'appareil entraîne avec lui une certaine quantité de saumure chaude qui circule ainsi dans l'appareil sans se volatiliser. Cette quantité entraînée est à peu près égale à la moitié du poids du sel, de sorte que, pour 1 kilogramme de vapeur formée dans le vaporisateur, ce n'est pas 1kg,36 d'eau salée qui y entre, mais 1kg,54 environ. Nous tiendrons compte de cette circonstance, en même temps, d'ailleurs, que de la présence dans la saumure de matières autres que le sel, en donnant à mC_m la valeur 1,25.

ρ est la chaleur de combinaison des divers éléments qui composent la saumure. Elle est fort petite, comme on sait. D'après Rüdorff, la dissolution de 36 de sel dans 100 d'eau à 12°, 6 absorbe 2cal,5 et à 100 degrés moins de 1 calorie. Nous voyons donc que $mC_m(\tau_1 - \tau_r) + \rho$, que nous remplacerons dorénavant par λ, s'écarte peu de $1{,}25 \times 12 - 1 = 14$ calories.

μ représente les pertes par rayonnement et conductibilité qui se produisent dans le temps t autour du vaporisateur et du calorifère. J'y reviendrai ultérieurement.

s est la surchauffe de la vapeur. S'il n'y avait pas de pertes de chaleur par les parois du compresseur et des conduites, la vapeur entrerait dans le compresseur à la température τ_1 avec une surchauffe d'environ 8 degrés, et la surchauffe finale serait donnée par la relation (18), qui, développée, devient

$$273 + \theta_2 + s = (273 + \tau_1)\left(\frac{\theta_2 + 51}{151}\right)^{1,35}\left(\frac{161{,}2}{\tau_1 + 53}\right)^{1,35}.$$

Cette formule complexe peut se simplifier beaucoup si on remarque que, la différence $\theta_2 - \tau_1$ ne dépassant jamais 40 degrés, le rapport $\frac{\theta_2 - \tau_1}{\tau_1 + 53}$ est assez petit pour qu'on puisse développer en série, suivant ses puissances croissantes. Dans ce but, faisons un changement d'inconnues et posons

$$(31) \qquad \begin{cases} \theta_2 - \tau_1 = x \\ \tau_1 + 53 = y. \end{cases}$$

l'égalité précédente donne :

$$s = 20{,}28 - x + 0{,}0922y + 1{,}474\left(1 + \frac{220}{y}\right)(x-2)\left(1 + \frac{0{,}35}{2}\frac{x-2}{y} - \ldots\right).$$

Dans les limites de nos applications, la dernière parenthèse est égale à 1,025 à un centième près. On peut alors lui substituer cette valeur et prendre

$$(32) \qquad s = 17{,}26 + 0{,}51\,x + 0{,}0922\,y + 332\,\frac{x-2}{y}.$$

Désignons maintenant par η les pertes de chaleur par le compresseur et les tuyaux de conduite de vapeur, nous aurons d'après tout ce qui précède

$$(33)\quad \begin{cases} a(x-\delta) = 643{,}7 + \lambda + \mu - 0{,}692\,y \\ 159{,}6\,\dfrac{x-2}{y} - 0{,}463\,x = \lambda + \mu + \eta - 9{,}13 - 0{,}0283\,y. \end{cases}$$

Telles sont les deux équations définitives qui déterminent x et y. Dans l'appareil Piccard, δ s'écarte peu de 9 degrés, et y, qui a pour valeur 155 degrés au commencement des campagnes, ne descend guère au-dessous de 150 degrés ; $\lambda + \mu$ varie davantage, mais reste toutefois compris entre 30 et 50 calories. On voit donc que le second membre de la première des équations précédentes ne s'écarte pas de plus de $\dfrac{1}{20}$ de sa valeur initiale 566 calories environ, et par conséquent que *la différence x des températures dans le condenseur et le vaporisateur*, différence qui règle, comme nous le verrons bientôt, le travail moteur, *est presque indépendante des pertes de chaleur et de la température dans le vaporisateur*. Au contraire, cette différence x varie rapidement en sens inverse de a qui, nous l'avons vu page 430, a pour valeur moyenne 80 calories au commencement des campagnes et 25 à la fin. A mesure que s'accroît la croûte de schlot, x progresse donc de

$$9 + \frac{566}{80} = 16^\circ \quad \text{à} \quad 9 + \frac{586}{25} = 32^\circ;$$

valeurs qui s'accordent absolument bien avec les résultats de la pratique.

Pour calculer $y = \tau_1 + 53$, tirons x de la première équation et portons sa valeur dans la deuxième, nous aurons ainsi une équation du second degré en y :

$$(34)\quad \left(0{,}0283 + \frac{0{,}37}{a}\right)y^2 - \left(0{,}463\,\delta' + \frac{410{,}5}{a} + \varepsilon\right)y + 160\left(\delta' + \frac{643{,}7}{a}\right) = 0,$$

dans laquelle l'écriture a été simplifiée en posant

$$(35)\quad \delta' = \delta + 2 + \frac{\lambda + \mu}{a} \qquad \varepsilon = \lambda + \mu + \eta - 10.$$

Remarquons, avant d'aller plus loin, que δ' reste compris entre 11 et 13 calories, et que ε représente, à quelques calories près, les pertes totales de chaleur par rayonnement et conductibilité de l'appareil, puisque $\lambda - 10$ s'écarte peu de 4 calories.

L'équation ci-dessus a ses deux racines positives et la plus petite seule convient. Pour voir comment elle varie avec ε, a et δ, il faut différentier. Comme y reste voisin de 155 degrés, remplaçons le par cette valeur dans l'équation différentielle, nous obtiendrons

$$(36)\quad \begin{cases} A\,dy + y\,d\varepsilon + \dfrac{48400}{a^2}\,da - 87\,d\delta' = 0, \\ \text{avec} \quad A = \varepsilon + 0{,}463\,\delta' + \dfrac{296}{a} - 8{,}77. \end{cases}$$

Remarquons encore que A diffère peu de ε et même qu'il lui est égal au commencement des campagnes ; l'équation précédente *montre que la température (ou la pression) dans le vaporisateur s'abaisse lorsque les pertes de calorique augmentent, elle s'élève au contraire lorsque la conductibilité a diminué ou que la différence δ des températures dans le calorifère et le vaporisateur augmente.* Si les pertes étaient constantes, la température dans le vaporisateur augmenterait donc à la fin des campagnes. Mais il n'en est pas ainsi ; et, en fait, malgré l'addition de vapeur étrangère, la pression baisse de 0,8 atmosphère à près de 0,6, c'est-à-dire que y descend de 155 à 148 degrés.

Dans l'équation (34) remplaçons y successivement par 155 et 148 degrés et remplaçons également a et δ' par leurs valeurs correspondantes, nous avons les pertes de chaleur ε qui existeraient au commencement et à la fin

des campagnes si l'appareil se suffisait à lui-même. Ces pertes seraient respectivement de 14 et 35 calories. Dans la réalité, elles sont beaucoup plus grandes, de sorte qu'on est obligé, surtout vers la fin des campagnes d'ajouter dans le condenseur, à la vapeur comprimée, une certaine quantité de vapeur issue d'un générateur spécial. J'ignore qu'elle est l'importance relative de cette quantité additionnelle, mais nous pouvons nous en faire une idée en calculant les pertes d'après les coefficients connus sur le refroidissement des parois métalliques. Celles de l'appareil Piccard peuvent se diviser en deux catégories. Les unes, dont le total se monte à 60 mètres carrés, sont en contact avec la saumure ou avec la vapeur qu'elle émet au-dessus d'elle; elles se trouvent à une température moyenne, à peu près constante, de 105 degrés; les pertes qu'elles occasionnent ont déjà été représentées par μ. Les autres, qui se montent à 15 mètres carrés, sont en contact avec la vapeur comprimée; leur température moyenne est variable avec le degré de compression; les pertes qu'elles occasionnent ont été représentées par η. Le refroidissement de ces surfaces se fait par rayonnement et par convection, de sorte que si on désigne par R, r et K les coefficients de refroidissement total, de rayonnement et de convection, on a :

$$R = r + K.$$

D'après Péclet, pour de faibles différences de températures ne dépassant pas 12 degrés, le pouvoir rayonnant r de la tôle ordinaire est égal à $0^{cal},046$ (par mètre carré, minute et degré), et le coefficient de convection par l'air K, pour de grandes surfaces et des enceintes calmes, est égal à $0^{cal},033$. Mais, au delà de 120 degrés, ces coefficients croissent avec la différence θ des températures de la paroi et de l'enceinte d'après les lois assez complexes qui ont été découvertes par Dulong et Petit

et qui sont exprimées par la formule suivante (*) :

$$(37)\qquad \begin{cases} R = 125\, m^{\theta}\, \dfrac{m^{\theta}-1}{\theta}\cdot r + 0{,}552\, \theta^{0{,}233}\, K, \\ \text{avec} \qquad m = 1{,}0077. \end{cases}$$

Cette formule va nous permettre de calculer μ et η. Supposons par exemple que la température moyenne de la première catégorie de parois soit à 90 degrés au-dessus de la température de l'air ambiant, nous aurons

au commt. des campagnes, $\mu = 60 \times 0{,}18 \times 90 \times \dfrac{8}{60} = 140$ calories,

à la fin des campagnes, $\mu = 60 \times 0{,}18 \times 90 \times \dfrac{10}{60} = 160$ calories.

Mais ces chiffres s'appliquent à des parois nues; ils sont réduits dans une grande proportion, à un sixième au plus, par l'enveloppe de sciure de bois.

Pour les parois de la deuxième catégorie, si on admet un excès de température de 120 degrés au commencement des campagnes et de 160 degrés à la fin, on a

au commt. des campagnes, $\eta = 15 \times 0{,}24 \times 120 \times \dfrac{8}{60} = 58$ calories,

à la fin des campagnes, $\eta = 15 \times 0{,}35 \times 160 \times \dfrac{10}{60} = 140$ calories,

chiffres qu'il faut également réduire en raison du calorifuge.

Ces valeurs ne sont que grossièrement approximatives, cependant elles permettent de conclure que les pertes totales par refroidissement des parois de l'appareil va-

(*) Le tableau ci-dessous donne les valeurs de R calculées de 30 en 30 degrés :

θ	R	θ	R
1	0,080	120	0,24
30	0,105	150	0,32
60	0,137	180	0,44
90	0,180		

rient de 40 à 80 calories environ par kilogramme d'eau vaporisée, soit 60 en moyenne. Comme le travail moteur couvre 25 calories en moyenne, il en résulte que la vapeur additionnelle doit fournir, l'un dans l'autre, 35 calories ; ce qui correspond à une consommation d'environ 30 kilogrammes de houille par tonne de sel fabriquée. Nous avons vu plus haut que la consommation réelle, en comprenant ce qu'il faut pour la mise en marche de l'appareil au commencement de chaque campagne, s'élève à environ 25 kilogrammes de houille par tonne de sel.

2° *Travail du compresseur.*

Si maintenant on désire connaître le travail que doit fournir le compresseur, il faut se servir de la formule (11) et remplacer pv_1 et P par leurs valeurs en fonction de τ_1 et θ_2 tirées des expressions (27) (19) et de l'équation de Zeuner

$$1000\,pv_1 = 4{,}93\,\tau_1 - 188\,p^{\frac{1}{4}}. \tag{38}$$

Mais, pour éviter une formule compliquée, il vaut mieux remplacer pv_1 par sa valeur moyenne 1,67 dont il s'écarte de moins de 1 centième. On a alors pour l'expression du travail théorique nécessaire à la production d'une tonne de sel par jour :

$$\mathrm{T} = 25^{\mathrm{chx}},5\left[\left(\frac{\mathrm{P}}{p}\right)^{\frac{1}{4}} - 1\right] = 2^{\mathrm{chx}},35\left(16{,}4\,\frac{x-2}{y} + 1\right). \tag{39}$$

Comme y varie peu, on voit que *le travail moteur s'accroît proportionnellement à la différence x des températures dans le vaporisateur et le condenseur.*

Au début des campagnes $x = 16°$ et $y = 156°$, à la fin $x = 32°$ et $y = 148°$; le travail théorique varie donc entre 5,8 et $10^{\mathrm{chx}},8$ par tonne journalière de sel. Mais ces chiffres doivent être augmentés du quart environ pour tenir compte des résistances passives. Les expériences officielles d'Ebensee ont en effet donné une moyenne de 10 chevaux-vapeur fournis à l'arbre du compresseur par tonne de sel journalière.

La formule très simple (39), jointe aux équations (34) et (33), permettrait de voir comment varie le travail moteur, quand varient ε, a et δ. Cette étude n'aurait qu'un médiocre intérêt, nous ne la ferons pas. Je veux seulement indiquer les deux valeurs particulières du travail théorique correspondantes à $x = 0$ et à $x = 9°$. La première, $t = 1^{\mathrm{ch}},85$, est le minimum au-dessous duquel il serait absolument impossible de descendre, puisqu'il faut toujours relever la pression de la vapeur de manière qu'elle devienne saturée à la température d'ébullition de la saumure. La seconde, $t = 4^{\mathrm{chx}},09$, correspond à une surface de chauffe infinie, c'est-à-dire à $a = \infty$, la différence δ des températures dans le calorifère et le vaporisateur restant la même.

3° *Circulation de l'eau salée.*

L'eau salée qui sort du vaporisateur traverse le sas à piston pour aller au calorifère, et de là elle retourne au vaporisateur. Dans ce trajet, sa température et sa pression changent, mais son poids et son volume ne varient pas sensiblement, car on peut négliger les variations de moins de 2 millièmes dues au passage d'une certaine quantité de vapeur du calorifère au vaporisateur ainsi qu'aux coefficients de dilatation et de compressibilité de la saumure.

Nous allons étudier successivement l'écoulement à la sortie et à l'entrée du vaporisateur.

A. *Sortie du vaporisateur.*—Le diamètre vertical de la circonférence décrite par le bouton de la manivelle qui fait mouvoir le piston du sas partage cette circonférence en deux moitiés, dont l'une correspond à la période d'é-

coulement du vaporisateur dans le sas et l'autre à la période d'écoulement du sas dans le calorifère. Considérons par exemple la première période et désignons par

ω la section d'écoulement au temps t;
z la différence des niveaux dans le vaporisateur et dans le sas;
S la section horizontale du sas.

Pendant le temps dt, il s'écoule un volume d'eau, égal à $\omega\sqrt{2gz}\,.\,dt$, qui entre dans le sas et fait monter le niveau de dz. On a donc l'équation différentielle suivante :

$$-\mathrm{S}dz = \omega\sqrt{2gz}\,dt. \tag{40}$$

Mais dt est lié à l'angle $d\alpha$ décrit par le bouton de manivelle par la relation ci-dessous, où n représente le nombre de tours par minute,

$$dt = \frac{60}{2\pi n}\,d\alpha. \tag{41}$$

On a donc, en remplaçant dt par cette valeur dans l'équation différentielle,

$$-\frac{1}{2}\frac{dz}{\sqrt{z}} = b\frac{\omega d\alpha}{2\pi} \quad \text{avec} \quad b = \frac{30\sqrt{2g}}{n\cdot \mathrm{S}}$$

Intégrons et appelons h_1 et h_2 les différences de niveau initiale et finale, il vient

$$\sqrt{h_1} - \sqrt{h_2} = b\int_0^{\pi}\frac{\omega}{2\pi}\,d\alpha = b\,i_1. \tag{42}$$

Si le régime permanent est établi, l'eau qui est entrée dans le sas s'écoule ensuite intégralement dans le calorifère; on aura donc de même, en appelant h'_1 et h'_2 les différences de niveau initiale et finale entre ces récipients,

$$\sqrt{h'_1} - \sqrt{h'_2} = b\int_{\pi}^{2\pi}\frac{\omega}{2\pi}\,d\alpha = b\,i_2. \tag{43}$$

Dans le vaporisateur, le niveau peut être considéré comme constant, mais il n'en est pas de même pour le calorifère où l'entrée du liquide est discontinue, tandis que la sortie est continue. Le rapport des diamètres du calorifère et du sas étant égal à 2,15, il en résulte que le rapport des variations de niveau dans ces récipients est de 1/10 environ. Si donc nous désignons par Z la différence $h_1 - h_2$ et par h la différence moyenne des niveaux dans le vaporisateur et dans le calorifère, nous aurons

$$\begin{cases} h'_1 = h + \dfrac{\mathrm{Z}}{20} - h_2, \\ h'_2 = h - \dfrac{\mathrm{Z}}{20} - h_1. \end{cases} \tag{44}$$

Des équations précédentes, on déduit facilement la différence Z que nous cherchons. En effet, élevons au carré chacun des membres des équations (42 et (43), après avoir remplacé dans la seconde h'_1 et h'_2 par leurs valeurs (44), il vient, en isolant les radicaux dans les premiers membres,

$$-2\sqrt{h_1 h_2} = b^2 i_1^2 - (h_1 + h_2)$$

$$-2\sqrt{\left(h - h_1 - \frac{\mathrm{Z}}{20}\right)\left(h - h_2 + \frac{\mathrm{Z}}{20}\right)} = b^2 i_2^2 + h_1 + h_2 - 2h.$$

Remplaçons maintenant $h_1 + h_2$ par ζ de manière à éliminer complètement h_1 et h_2, et à n'avoir plus que deux équations en ζ et Z, d'où il sera facile de tirer Z.

On a d'abord $4h_1 h_2 = \zeta^2 - \mathrm{Z}^2$, puis, après avoir encore élevé les deux membres des équations précédentes au carré, y avoir fait les substitutions et les réductions, il vient

$$\mathrm{Z}^2 = 2b^2 i_1^2 \zeta - (b^2 i_1^2)^2,$$
$$1{,}21\,\mathrm{Z}^2 = -2b^2 i_2^2 \zeta - (b^2 i_2^2)^2 + 4b^2 i_2^2 h.$$

De ces deux dernières équations, il est facile d'éliminer ζ et de tirer enfin

$$\mathrm{Z} = \frac{2b\,i_1 i_2}{\sqrt{1{,}21\,i_1^2 + i_2^2}}\sqrt{h - b^2\frac{i_1^2 + i_2^2}{4}}. \tag{45}$$

Si nous posons

$$(46)\qquad \begin{cases} s' = \sqrt{\dfrac{2\, i_1^2 i_2^2}{1{,}21\, i_1^2 + i_2^2}} \\ \varphi = b^2 \dfrac{i_1^2 + i_2^2}{4} = g \cdot \dfrac{i_1^2 + i_2^2}{2} \left(\dfrac{30}{n\mathrm{S}}\right)^2 \end{cases}$$

nous aurons

$$(47)\qquad h_1 - h_2 = \mathrm{Z} = \frac{60}{n\mathrm{S}}\, s' \sqrt{g}\, \sqrt{h - \varphi},$$

d'où on déduit le volume w d'eau salée débité par seconde

$$(48)\qquad w = \frac{n}{60}\,\mathrm{S}(h_1 - h_2) = s' \sqrt{g}\, \sqrt{h - \varphi}.$$

Par le calcul qui précède, nous arrivons donc, aussi rigoureusement que possible, à une équation très simple; mais il est nécessaire de discuter s' et φ, et, auparavant, i_1 et i_2. Ces deux intégrales

$$(49)\qquad i_1 = \int_0^{\pi} \frac{\omega}{2\pi} d\alpha \qquad i_2 = \int_{\pi}^{2\pi} \frac{\omega}{2\pi} d\alpha$$

ne dépendent que de la construction de l'appareil et doivent être calculées dans chaque cas particulier. En général, elles ne sont pas égales. Elles sont fonction de la forme des trous de la lanterne du sas, de la forme des bases du piston, des mouvements et de la position moyenne du piston, de l'inclinaison de la bielle, et enfin du rayon de la manivelle. Si la lanterne est régulière, c'est-à-dire formée de fenêtres rectangulaires, si, dans sa position moyenne, le piston bouche juste les orifices de la lanterne sans aucun recouvrement, si la bielle est assez longue pour que son inclinaison soit négligeable, si, enfin, le rayon de la manivelle est égal à la hauteur de la lanterne, on a :

$$(50)\qquad i_1 = i_2 = \int_0^{\pi} \frac{s}{2\pi} \cdot \sin\alpha \cdot d\alpha = \frac{s}{\pi} = 0{,}32\, s,$$

puis

$$(51)\qquad \begin{cases} s' = 0{,}3\, s \\ \varphi = \dfrac{900}{n^2}\left(\dfrac{s}{\mathrm{S}}\right)^2 \end{cases}$$

Mais les conditions précédentes n'étant en réalité jamais remplies les valeurs de s' et de φ peuvent différer beaucoup de celles ci-dessus. Cependant les formules que nous venons d'établir en donnent une idée suffisamment approchée.

M. Max von Arbesser (*) prend d'emblée, dans ses calculs, la formule $w = s'\sqrt{gh}$ (ce qui n'est point éloigné de la vérité, puisque φ n'est guère que le quarantième de h) et trouve que, pour l'appareil d'Ebensee, dans lequel $h = 0^{\mathrm{m}},45$, il faut prendre $s' = 0{,}132\, s$.

Pour l'appareil de Salies-du-Salat, j'ai trouvé que $\frac{s}{s'}$ est égal à 160, on a donc dans ce cas

$$\varphi = \frac{0^{\mathrm{m}},35}{n^2};$$

Et, puisque, dans ses appareils, M. Piccard fait $n = 6$, on voit que l'influence de φ revient à diminuer h d'un centimètre environ. On voit également qu'on pourrait, sans grand inconvénient, faire descendre n jusqu'à trois tours seulement par minute, mais qu'il n'y a aucun intérêt à le rendre plus grand que six.

B. *Entrée dans le vaporisateur.* — Pour entrer dans le vaporisateur, la saumure traverse un orifice resserré, de section σ, où l'impulsion lui est donnée par la différence f des pressions qui régnent dans les parties supérieures du vaporisateur et du calorifère diminuée du poids de la colonne ascendante de hauteur h. Mais il ne faudrait pas

(*) Max von Arbesser. *Berg und Hüttenmännisches Jahrbuch*, de J. Ritter von Hauer, 1881, 29e vol., 4e livraison.

croire que, pour calculer le débit, il suffise d'appliquer les formules de l'hydraulique, et de prendre

$$(52) \qquad w = \sigma \sqrt{2g\left(\frac{10{,}33\,f}{\omega} - h\right)},$$

ω étant le poids spécifique de la saumure ($\omega = 1.2$); car, l'eau salée se trouvant dans le calorifère à une température τ_2 nécessairement correspondante à la pression d'ébullition $p + f$ qui règne à sa surface, puisqu'elle émet la vapeur qui se dirige vers le sas à piston, il en résulte qu'elle se vaporise partiellement à mesure qu'elle s'élève dans la conduite ascendante, et surtout quand elle traverse l'orifice resserré. Nous avons à traiter ici le problème de l'écoulement d'un mélange de liquide et de vapeur, problème dont Zeuner a donné une solution dans sa *Théorie mécanique de la chaleur*. Avec nos notations, et en désignant, en outre, par

x_1 le poids relatif de la vapeur quand la saumure traverse l'orifice resserré;
u la vitesse du mélange dans cet orifice;
$T_1 = \tau_1 + 273$ la température absolue dans le vaporisateur;
$c = 0{,}76$ la chaleur spécifique de la saumure saturée chaude;
$E = 425$ l'équivalent mécanique de la chaleur;

les formules (344) et (345) de son livre (trad. Arnthal et Cazin, 2e édit., p. 416) s'écrivent

$$(53) \qquad \begin{cases} x_1 r_1 = c\,T_1 \log.\text{nat.}\left(1 + \dfrac{\delta}{T_1}\right) \\ \dfrac{u^2}{2g} = Ec\left[\delta - T_1 \log.\text{nat.}\left(1 + \dfrac{\delta}{T_1}\right)\right] + \dfrac{10{,}33}{\omega} f. \end{cases}$$

Or, dans les conditions de l'appareil Piccard, δ ne dépasse pas le quarantième de T_1, on peut donc développer le logarithme en série et négliger les termes du deuxième ordre : on a alors, en remplaçant aussi g, E, ω et c par leurs valeurs,

$$(54) \qquad \begin{cases} x_1 r_1 = c\delta \\ u^2 = 3170\,\dfrac{\delta^2}{T_1} + 170\,f. \end{cases}$$

On voit de suite que le terme $170\,f$, qui est pourtant le seul que donnerait l'hydraulique, est très petit par rapport à l'autre tant que δ ne descend pas au-dessous de 5 degrés. En l'amalgamant avec le terme en δ^2, on a l'expression très simple

$$(55) \qquad u = 3\delta \sqrt{\frac{373}{T_1}},$$

suffisamment approximative pour l'appareil Piccard. Si maintenant nous voulons le débit de l'eau salée, il faut s'aider de la première des formules (54). Soit v_1 le volume spécifique de la vapeur d'eau à la température absolue T_1 et à la pression p.

1 volume d'eau salée devient, en passant dans l'orifice resserré,

$$\frac{1}{\omega} + x_1 v_1,$$

de sorte que le débit de l'eau salée en volume est :

$$(56) \qquad w = \frac{u\sigma}{\dfrac{1}{\omega} + x_1 v_1} = \frac{3\sigma}{\dfrac{1}{\omega\delta} + c\dfrac{v_1}{r_1}} \sqrt{\frac{373}{T_1}}.$$

v_1 se tire de la formule de Zeuner (38).

r_1 s'obtient en appliquant la formule (6), et, bien qu'ici c_1 corresponde à une vapeur légèrement surchauffée, toutes réductions faites, on retombe, à une demi-calorie près, sur la formule de Regnault : $r_1 = 607 - 0{,}7\,\tau_1$.

Dans l'application de la formule (56), il faut remarquer que le terme $\dfrac{1}{\omega\delta}$ est presque négligeable et que r_1 diffère très peu de 535; on peut donc simplifier et écrire

$$(57) \qquad w = \frac{2080}{v_1}\,\sigma \sqrt{\frac{373}{T_1}}\left(1 - \frac{1}{3\delta}\right).$$

Ce qui montre que le débit dépend de la pression dans le vaporisateur, mais qu'*il est presque indépendant de la*

différence δ *des températures, et par conséquent aussi de la différence* f *des pressions dans le vaporisateur et le calorifère*, pourvu que δ ne descende pas au-dessous de 5 degrés. Ce résultat certainement très remarquable a déjà été signalé par Zeuner. Il est bien différent de celui que donnerait la formule (52).

Pour l'appareil d'Ebensee, on a $f = 0^{atm},3$; $p = 1^{atm},4$ $h = 0^{m},45$; $\delta = 9°$; $T_1 = 381°$. Avec ces données, on tire de la formule (57) $w = 1,17\sigma$, tandis que la formule (52) donnerait $w = 6,37\sigma$. Le rapport entre ces deux résultats est égal à 0,183. M. Max von Arbesser a trouvé expérimentalement que ce rapport était égal à 0,171. Il serait difficile d'avoir un accord plus complet entre nos formules et l'expérience, surtout si on réfléchit qu'il faudrait diminuer le premier chiffre d'au moins 5 p. 100, pour tenir compte de la contraction de la veine.

Dans l'appareil de Salies-du-Salat, on a : $p = 0^{at},8$; $t_1 = 108°,67$; $w = 9^{lit},2$; $r = 9°$. On déduit $v_1 = 2030$, puis $\sigma = 1^{dm^2}$. L'orifice resserré doit donc avoir au moins $11^{cm},3$ de diamètre.

C. On peut encore calculer la vitesse de circulation w en fonction de la production et de la différence δ. Pour produire 1 kilogramme de vapeur, il faut introduire dans le vaporisateur un nombre de calories égal, d'après la première des équations (30), à

$$q = 607 - 0,7\tau_1 + \lambda + \mu',$$

où μ' représente les pertes par refroidissement du vaporisateur seulement. D'un autre côté, $1^{kg},36$ d'eau salée, renfermant 1 kilogramme d'eau et venant du calorifère, apporte dans le vaporisateur $1,07\delta$ calories. Si donc, nous désignons par n le rapport de la quantité de saumure qui circule dans le calorifère à celle qui est vaporisée dans le même temps, on a

$$n = \frac{q}{1,07\,\delta} \tag{58}$$

Pratiquement q est compris entre 560 et 580 calories, et δ entre 8 et 10 degrés, n se tient par conséquent aux environs de 60.

Soit maintenant π la production journalière de sel, exprimée en tonnes (3 à 4,5 comme il a été dit), le volume d'eau salée vaporisée par seconde est égal, en mètres cubes à

$$\frac{\pi}{86400} \cdot \frac{1,36}{0,36} \frac{1}{1,2} = \frac{\pi}{27450}.$$

On a donc pour w l'expression ci-dessous :

$$w = \frac{q}{1,07\,\delta} \frac{\pi}{27450} = \frac{q.\pi}{\delta.29370}. \tag{59}$$

Et de cette expression on conclut que la vitesse de circulation oscille autour de 9 litres par seconde.

4° *Discussion sur le réglage de l'appareil.*

Les formules qui ont été écrites précédemment permettent de se rendre compte de ce qui se passe quand on fait varier l'un quelconque des éléments de l'appareil, et notamment quand on ouvre plus ou moins l'orifice d'écoulement dans le vaporisateur en déplaçant le cône de réglage.

Supposons, par exemple, que l'appareil soit réglé dans les conditions suivantes qui sont celles de la marche normale : $\pi = 4$ tonnes, $\sigma = 1^{dm^2}$, $P = 2^{atm}$, $p = 0^{atm},8$, $h = 0^{m},4$, $x = 19°$, $y = 155°$, $\sigma = 9°$ et $w = 9$ litres par seconde, et voyons ce qui se passera si on réduit d'un quart l'orifice d'écoulement σ, sans toucher à rien autre chose.

La relation (57) montre d'abord que le débit sera immédiatement réduit dans la même proportion, et (48) que la différence de niveau h diminuera de près de moitié; le niveau de l'eau salée dans le calorifère remontera donc

rapidement. Pour que la production de 4 tonnes de sel soit conservée, il faudra, d'après (59), que la différence δ des températures dans le calorifère et le vaporisateur augmente d'un tiers, c'est-à-dire de 3 degrés. La différence x des températures dans le condenseur et le vaporisateur devra aussi augmenter de 3 degrés d'après la première des équations (33). L'accroissement des pertes agira dans le même sens, mais d'une façon insensible. La température dans le vaporisateur subirait, elle aussi, une augmentation d'après (36) si les pertes ε restaient les mêmes; mais comme ces pertes augmentent nécessairement, il se pourrait que cette température diminuât; il suffirait pour cela que l'augmentation des pertes fût de plus de $\frac{87}{155}$. $3^{o} = 1^{cal},7$, ce qui est possible, comme on peut s'en assurer par les calculs de la page 435. Si l'accroissement des pertes était exactement de $1^{cal},7$, la température (et la pression) au vaporisateur resterait la même, et la pression de la vapeur comprimée dans le condenseur serait $2^{at},2$ au lieu de 2 atmosphères. En tout cas, la formule (39) indique que le travail total du compresseur sera accru d'environ trois chevaux-vapeur, soit de 11 p. 100.

En somme, on voit que l'appareil est doué d'une assez grande souplesse. Il n'est pas besoin que l'orifice d'écoulement dans le vaporisateur ait une section bien exacte, puisque une variation de 25 p. 100 n'entraîne qu'une différence de 11 p. 100 dans le travail moteur et que par conséquent il ne serait pas impossible de le laisser fixe du commencement à la fin des campagnes, bien que la production en sel diminue de un tiers. Cependant, il est certain qu'il vaut mieux le changer de temps en temps de manière à faire rendre à l'appareil son maximum d'effet utile eu égard au maximum que la vitesse de circulation ne peut dépasser sans qu'il se produise à la sortie du vaporisateur un entraînement fâcheux de particules de sel.

IVe PARTIE.

APPAREIL PICCARD A SEL GROS.

1° *Description de l'appareil.*

Après avoir créé l'appareil à sel fin que nous avons étudié dans les chapitres précédents, M. Piccard a essayé d'appliquer la méthode de récupération de la chaleur par compression de la vapeur aux poêles ordinaires des salines à feu où on fabrique le sel gros. On sait en quoi consistent ces poêles. Ce sont de grands bassins plats en tôle, chauffés par dessous, dans lesquels on fait entrer la saumure. Celle-ci, étant maintenue à une température de 80 à 90 degrés, émet à sa surface de la vapeur qui se mélange à l'air ambiant et le sature. Le sel qui tombe au fond est de temps en temps ramené sur l'un des bords et extrait avec des râbles. Au-dessus de chaque poêle se trouve une vaste hotte en planches surmontée d'une cheminée qui fait tirage. La surface du liquide est constamment léchée par de l'air frais qui s'y charge de vapeur, se sature plus ou moins, monte dans la cheminée et se déverse ensuite dans l'atmosphère.

On ne pouvait évidemment songer à comprimer directement ce mélange, qui contient environ deux volumes d'air contre un de vapeur, pour le faire servir au chauffage de la poêle, car il eût fallu dépenser un travail moteur considérable, et, d'autre part, la présence de l'air eût diminué dans une énorme proportion la condensation de la vapeur comprimée contre les parois. Il était donc nécessaire d'effectuer d'abord la séparation de la vapeur contenue dans le mélange avant de l'envoyer au compresseur.

M. Piccard obtient cette séparation d'une manière fort ingénieuse. Il fait passer le mélange d'air et de vapeur sortant des poêles à travers une pluie d'eau qui le refroidit en s'échauffant elle-même et oblige une partie de la vapeur à se condenser; l'eau de pluie, réchauffée et additionnée de l'eau de condensation, retourne ensuite au récipient d'où elle est venue et où elle se vaporise partiellement, car c'est là que le compresseur, qui, dans l'appareil à sel fin, aspirait directement au-dessus de la saumure, prend la vapeur qu'il envoie chauffer les poêles; cette eau y abandonne donc et la vapeur et le calorique qu'elle avait pris à l'air saturé; elle est alors prête à recommencer son rôle.

C'est toujours le même air qui circule entre les poêles et la chambre à pluie. Quand il sort des poêles, il est à une température de 87°,5 et contient un poids de vapeur égal au sien; quand il y retourne, après avoir traversé la chambre à pluie, il n'a plus qu'une température de 80°,5 et il a abandonné 45 p. 100 de la vapeur qu'il contenait. L'eau de pluie entre dans la chambre à 80 degrés et s'y réchauffe à 82 degrés en condensant 1/250e de vapeur, en poids, puis elle revient à la chaudière où la température est maintenue à 80 degrés et la pression à 0at,47.

En résumé, le procédé de M. Piccard consiste à transporter une grande partie de la vapeur qui sature l'air sortant des poêles dans la chaudière où le compresseur l'aspire, au moyen d'une certaine quantité d'eau distillée, qui, en faisant la navette entre cette chaudière et une chambre où on oblige le courant d'air à passer, sert de véhicule à la chaleur latente de vaporisation. Il a été mis en œuvre avec l'appareil représenté par les dessins de la planche IX (*). Le croquis schématique n° 10, Pl. VI, servira à l'intelligenee de ce qui suit.

(*) Ces dessins ont déjà été publiés dans le *Portefeuille* d'Oppermann.

D'abord, les poêles ordinaires ont été remplacées par une série de bassins clos et profonds A, où la saumure est chauffée, un peu au-dessous de sa surface, par des tubes B dans lesquels arrive la vapeur comprimée. L'eau chaude résultant de la condensation de la vapeur comprimée sort par un purgeur automatique *p*, pour aller dans un réchauffeur où elle cède la plus grande partie de sa chaleur à la saumure d'alimentation. Dans le bassin, la saumure se trouve à une température de 96°,5 insuffisante pour produire l'ébullition, mais cependant assez voisine de 100 degrés pour que l'évaporation se fasse rapidement. Le gros sel formé à la surface s'accumule peu à peu sur le fond. On l'enlève à la pelle, après avoir mis le bassin en vidange, quand la couche est sur le point d'atteindre les tubes chauffeurs.

L'air qui circule à la partie supérieure des bassins est mis en mouvement par un ventilateur centrifuge D. Quand il sort des bassins, il a une température de 87°,5 et est chargé d'un poids de vapeur à peu près égal au sien. Avant d'y retourner, par le conduit C, il traverse, de haut en bas, une chambre E où l'eau distillée qui coule sur des plaques de tôle perforées horizontales lui prend une partie de sa chaleur et le dépouille d'environ 45 p. 100 de la vapeur qu'il contient, en la condensant.

L'eau distillée, qui vient de la chaudière F, est rejetée à la partie supérieure de la chambre à pluie par une pompe centrifuge G. Après s'être incorporé la vapeur condensée à son contact, et s'être ainsi réchauffée de 2 degrés, elle revient à la chaudière par le conduit *ef*. Sur son chemin, elle rencontre un renflement I où la petite quantité d'air qu'elle a pu entraîner se rassemble et retourne à la chambre par le canal *h*. La chaudière F est placée suffisamment en contre-haut pour que la colonne d'eau, qui se trouve dans le tuyau *f*I, fasse équi-

libre à l'excès de la pression atmosphérique qui règne dans la chambre, sur celle de la vapeur dans la chaudière. Le tuyau *tlf* fonctionne donc comme un baromètre à siphon; le niveau de l'eau en F est à peu près invariable; c'est le niveau dans la petite branche *e* qui se déplace automatiquement suivant les variations de pression. La pression dans la chaudière s'écartant peu de $0^{at},47$, la différence de ces niveaux est voisine de $5^{m},50$.

Entrons maintenant dans l'examen détaillé de chaque organe.

Bassins. — L'appareil comprend une série de six bassins en ciment recouverts par des voûtes en briques. Ces voûtes sont percées au centre d'un orifice surmonté d'une cheminée de 7 mètres de hauteur, et, à chaque extrémité, d'une ouverture qui fait communiquer les bassins soit avec la conduite d'amenée d'air, soit avec celle de départ. Ces conduites ont une section de un demi-mètre carré.

On remarquera que la conduite d'amenée d'air *c* est repliée sur elle-même. Cette disposition était en effet indispensable pour obtenir la même circulation d'air dans tous les bassins. Car, sans cela, la variation de longueur du parcours dans les conduites aurait entraîné dans les différents bassins d'inégales chutes de pression entre les orifices d'entrée et de sortie.

Chaque bassin a 66 mètres carrés de surface et l'eau salée y occupe une hauteur de 2 mètres. Des portes, complètement immergées quand les bassins sont pleins, les font communiquer avec des puisards extérieurs P, qui servent à la descente des ouvriers et à l'enlevage du sel.

Les tubes chauffeurs B sont repliés en forme d'*u* et sont placés tout près de la surface libre du liquide. Ils forment, par bassin, une surface de chauffe de 40 mètres carrés.

Le ciment employé pour la confection des bassins n'a pas rendu les services qu'on attendait de lui. De nombreuses fissures se sont produites par où fuient la vapeur et l'eau salée, ce qui occasionne d'assez grandes pertes de calorique. Bien qu'il existe des ciments qui résistent fort bien à des alternatives de température de 100 degrés, les constructeurs se proposent dorénavant, pour se mettre à l'abri de tout mécompte, de faire les bassins en tôle de 7 millimètres. Ils seront recouverts de fers plats, puis d'un lit de pierres de tailles jointives et enfin d'une couche de sable d'un mètre d'épaisseur qui constituera un excellent calorifuge.

Ventilateur. — Le ventilateur centrifuge n'a rien de particulier. Il aspire dans les bassins et refoule dans les chambres à pluie. Il eût été peut-être préférable de le placer sur la conduite de refoulement dans les bassins, car, à cet endroit, le volume du mélange est moindre et le ventilateur n'eût débité que $0^{ms},95$ par seconde, au lieu de $1^{ms},32$, c'est-à-dire 28 p. 100 de moins.

Chambre à pluie. — La chambre à pluie, d'une contenance de 18 mètres carrés, est faite en maçonnerie, avec des murs de 60 centimètres d'épaisseur. Les six bacs en tôle qu'elle renferme sont disposés en chicane à 30 centimètres l'un de l'autre. On aurait pu substituer à ces bacs un massif de briques analogue à ceux des régénérateurs de chaleur, ou mieux encore une colonne de coke; les surfaces de contact entre le mélange gazeux et l'eau eussent été ainsi plus multipliées, ce qui aurait nécessairement entraîné une élévation dans la température de sortie de l'eau distillée et par suite un amoindrissement dans le débit de la pompe et dans le travail moteur correspondant; mais il est vrai que, par contre, la résistance offerte au passage des gaz eût été plus considérable, et on aurait perdu en partie d'un côté ce qu'on aurait gagné de l'autre.

Chaudière. — La chaudière n'a rien de spécial. Avec son dôme de vapeur, elle a un volume de 7^{m3}. L'eau l'emplit à moitié.

Pompe centrifuge. — La pompe centrifuge est mue par la turbine hydraulique comme le ventilateur. Elle dépense une force assez considérable, car elle débite environ 60 litres d'eau par seconde et fonctionne sous une différence de niveaux de $3^m,50$.

Compresseur. — Le compresseur de vapeur est, sauf le diamètre de cylindre, identique à celui qui est employé pour les couples d'appareils à sel fin. Il aspire la vapeur à $0^{atm},47$ et la refoule à $1^{atm},2$ en moyenne, ces chiffres variant un peu à cause du dépôt de schlot sur les tubes. Il relève donc la température d'environ 25 degrés, comme pour l'appareil à sel fin; mais le travail est un peu plus grand, parce que la pression initiale est plus petite. Les formules montrent que la différence est de 15 p. 100.

Le travail théorique total nécessaire à la compression de la vapeur pour une production de 8 tonnes de sel par jour, c'est-à-dire pour une vaporisation de 15 litres d'eau par minute, est donné par la formule (14).

$$T = 15 \times 15^{chx},2 \times 0,47^{0,06}\left(\sqrt[4]{2,55} - 1\right) = 60^{chx}.$$

En réalité, la turbine développe 100 chevaux-vapeur, la différence est employée à mettre la pompe et le ventilateur en mouvement et à vaincre les résistances passives.

2° *Conduite de l'appareil. — Résultats.*

L'appareil marche continuellement sauf le temps employé aux réparations de la machinerie. Lorsqu'un bassin a fonctionné pendant vingt-cinq jours consécutifs, il s'y est déposé environ 40 tonnes de sel et la couche a atteint

presque les tuyaux chauffeurs. On l'isole alors en fermant le robinet qui commande l'arrivée de la vapeur comprimée et en tournant les vannes d'entrée et de sortie d'air chaud. On transvase ensuite la saumure qui baigne le sel dans le bassin qui vient d'être nettoyé et on ouvre les soupiraux à chaque extrémité, ainsi que la cheminée, de manière à faire circuler dans le bassin un courant d'air frais. Au bout de deux jours, la température s'est suffisamment abaissée pour que des hommes puissent descendre par le puisard et sortir le sel, qui est ensuite envoyé à l'essoreuse ou à l'égouttage. Quand le sel est enlevé, les ouvriers grattent les incrustations de schlot formées autour des tubes chauffeurs et se retirent en fermant le puisard, les soupiraux et la cheminée. Le bassin est alors prêt à fonctionner de nouveau et à recevoir la saumure de son voisin qu'on nettoiera à son tour comme il vient d'être expliqué.

L'intervalle entre les différents nettoyages est de cinq jours, on revient donc au même bassin au bout d'un mois. Telle est la période totale de la permutation tournante d'après laquelle les bassins sont mis en vidange. On peut remarquer qu'elle est précisément égale aux campagnes de l'appareil à sel fin en y comprenant la durée du nettoyage.

La production est de 8 tonnes de sel par jour et de 2.500 tonnes par an. Quelle est maintenant la consommation de combustible? Il ne faudrait pas croire que la vapeur refoulée par le compresseur suffit au chauffage des bassins. Les pertes de calorique sont en effet considérables et il est indispensable d'envoyer dans les tubes chauffeurs, concurremment avec la vapeur du compresseur, une proportion relativement grande de vapeur issue d'un générateur spécial.

A Salies-du-Salat, les bassins n'ont pas été construits dans de bonnes conditions ; comme je l'ai déjà dit, ils se

sont fendillés, ce qui occasionne des fuites d'eau et de vapeur. Les enseignements fournis par cet appareil permettraient certainement d'en établir de meilleurs. On ne peut donc arguer des médiocres résultats qu'il donne pour conclure à l'inutilité du système.

Nous pouvons nous faire *à priori* une idée des pertes de calorique qui se produiraient dans un appareil bien installé, c'est-à-dire étanche. Supposons aussi que les voûtes des bassins soient recouvertes d'une couche de sable de 1 mètre d'épaisseur. Dans ces conditions, les pertes s'établissent par le tableau suivant :

NATURE DES PAROIS	ÉTENDUE des parois	CALORIES perdues par mètre carré, heure et degré	DIFFÉRENCE moyenne des températures des deux côtés de la paroi	CALORIES perdues par heure
	mètres carrés	calories	degrés	calories
Bassins . . . Voûtes.	500	0,30	80	12.000
Bassins . . . Côtés	200	1,00	80	16.000
Bassins . . . Fondations. . .	500	0,20	80	8.000
Chambre et conduites d'air . .	100	1,00	70	7.000
Chaudière et tubes.	40	10,00	70	28.000
Compresseur et conduites de vapeur comprimée.	20	15,00	100	30.000
Totaux.	1.360	»	»	101.000

Au total de 101.000 calories, il faudrait encore ajouter les calories emportées par l'air frais qui circule dans les bassins, pendant qu'ils sont en vidange, ainsi que celles qui sont emportées par les fuites de vapeur qui peuvent se produire malgré l'étanchéité des bassins. Comptons donc que dans un appareil soigné les pertes peuvent être réduites à 110.000 calories par heure en nombre rond. Ce chiffre correspond à 330 calories par kilogramme de sel fabriqué. Avec un bon générateur, la consommation de houille serait donc de 100 kilogrammes environ par tonne de sel, soit 4 fois plus que pour l'appareil à sel fin. Et comme, pour la même production, les frais

de premier établissement, la main-d'œuvre, et les frais d'entretien sont à peu près les mêmes pour les deux sortes d'appareils, on voit qu'ils peuvent rivaliser avec les poêles et les supplanter dans les mêmes conditions.

Ve PARTIE.

CONSIDÉRATIONS SUR L'EMPLOI DE LA FORCE MOTRICE POUR OBTENIR DE LA CHALEUR.

Le procédé d'évaporation économique par compression de la vapeur n'est pas à proprement parler, comme je l'ai déjà fait remarquer, un procédé de transformation de la force motrice en chaleur. Et cependant, sans force motrice, il serait impossible de régénérer le calorique que la vapeur est susceptible de dégager par sa condensation. Il me paraît donc intéressant de discuter ce qu'on doit entendre par emploi de la force motrice pour avoir de la chaleur.

Quand, dans l'industrie, on a besoin de chaleur, il n'est pas indifférent qu'elle se trouve à telle ou telle température. Pour être utile, elle doit être à une température supérieure à un certain minimum, qui varie avec le genre d'industrie, au-dessous duquel elle ne pourrait être employée. Il est clair, par exemple, qu'on n'aurait que faire, pour chauffer des générateurs à vapeur, de chaleur à 100 degrés seulement. Il faut donc distinguer entre la quantité de chaleur qui équivaut strictement au travail mécanique dépensé et la quantité de *chaleur utile* que ce travail est susceptible de fournir.

La théorie mécanique de la chaleur montre, et l'expérience vérifie, qu'un travail donné peut rendre utile, dans certains cas et de la manière que nous allons voir, une quantité de chaleur beaucoup plus grande que celle qui

lui équivaut. Il en résulte que, si le thermogène de Beaumont et Mayer, qui avait pour but, en utilisant le frottement des corps solides, de transformer intégralement le travail mécanique en chaleur, n'a pas réussi à devenir pratique, il peut n'en pas être de même des machines *calorifiques* destinées à porter, par le travail moteur, la chaleur empruntée à une source gratuite, à l'air atmosphérique ou à l'eau d'un ruisseau par exemple, à une température suffisamment élevée pour être utilisable; et la méthode d'évaporation par compression de la vapeur, actuellement employée dans les salines et dans les sucreries, montre qu'en effet les machines calorifiques sont entrées dans la pratique industrielle. Elles sont susceptibles de se développer encore.

Pour transporter la chaleur de la source froide à l'appareil qui doit l'utiliser, il faut nécessairement qu'il y ait un corps qui lui serve de véhicule. C'est sur ce corps qu'agit le travail mécanique pour en élever la température. Supposons qu'il évolue suivant un *cycle de Carnot* (*fig.* 5, Pl. X) : le long de l'isotherme AB, il emprunte la quantité de chaleur q_0 à la température absolue τ_0 et le long de l'isotherme CD, il cède la chaleur q_1 à la température τ_1. On sait qu'on a

$$\frac{q_1}{q_0} = \frac{\tau_1}{\tau_0}.$$

Le travail dépensé n'a *créé* que la chaleur $q_1 - q_0$, mais il a fourni la chaleur utile q_1, le rapport de ces deux quantités est égal à

$$\frac{q_1}{q_1 - q_0} = \frac{\tau_1}{\tau_1 - \tau_0},$$

c'est-à-dire à l'inverse du coefficient économique du cycle de Carnot.

Si la différence des températures $\tau_1 - \tau_0$ est petite, ce rapport est grand et la machine calorifique peut, dans ce cas, rendre des services. Ainsi, pour l'appareil Piccard, $\tau_1 = 273 + 120$ et $\tau_0 = 273 + 102$. On a alors

$$\frac{\tau_1}{\tau_1 - \tau_0} = \frac{393}{18} = 22,$$

et on voit que le travail mécanique récupère théoriquement 22 fois la quantité de chaleur qui lui équivaut. Pratiquement ce chiffre est réduit à 10 tant par suite des résistances passives que de l'imperfection du cycle réel, mais c'est encore une belle proportion.

Si la différence $\tau_1 - \tau_0$ était grande, et dépassait par exemple 200 degrés, le rapport $\frac{\tau_1}{\tau_1 - \tau_0}$ ne serait pas beaucoup plus grand que l'unité et alors il vaudrait autant en revenir au thermogène à frottement. C'est dire que les applications des machines calorifiques resteront toujours cantonnées aux cas où il suffit de relever la température de quelques dizaines de degrés au plus.

Le corps qui sert de véhicule à la chaleur, et reçoit l'application de la force motrice, ne peut être évidemment qu'un gaz ou une vapeur. Nous allons examiner successivement chacun de ces deux cas. Mais auparavant, remarquons que toutes les machines *frigorifiques* qui fonctionnent avec des moteurs peuvent être employées comme machines calorifiques à moins qu'il ne se présente un empêchement physique. La machine frigorifique à air, notamment, n'a à subir aucune modification fondamentale pour être transformée en machine calorifique. Les machines à acide sulfureux et à ammoniaque pure peuvent également servir à produire de la chaleur à condition de remplacer ces corps par des vapeurs condensables à la température de la source froide, par l'eau ou l'éther sulfurique par exemple.

Cas des gaz. — Parmi tous les gaz, l'air est le seul dont l'emploi puisse être pratique. C'est donc de lui seu-

lement que nous parlerons. On pourrait le faire évoluer suivant un cycle de Carnot ordinaire (*fig.* 5, Pl. X), mais il y aurait à cela un grand inconvénient. Les lignes adiabatiques étant peu inclinées sur les lignes isothermiques, les variations de pression seraient considérables. Il est facile de corriger ce défaut par un artifice qui consiste à effectuer des échanges de chaleur entre l'air qui va à la source froide et celui qui en vient. L'emploi des régénérateurs, qui ne peut réussir dans le cas des machines motrices à air chaud, rend ici un excellent service. Le cycle se compose alors des deux isothermiques t_0 et t_1 et des deux lignes d'égale pression P et p. Il offre la même forme que celui des vapeurs ; mais, en réalité, il en diffère beaucoup. Voici la marche théorique de ce cycle (*fig.* 6, Pl. X).

De A à B, l'air se dilate à température constante t_0, sa pression diminue de P à p ; il emprunte la quantité de chaleur q_0 à la source froide.

De B à C, l'air se dilate à pression constante p en allant à la source chaude ; il lui faut pour cela une quantité de chaleur q' qui lui est exactement cédée par l'air à la pression P qui va de D en A, de la source chaude à la froide.

De C à D, l'air est comprimé par la machine motrice et il se dégage la quantité de chaleur utile q_1.

Enfin, de D à A, l'air se contracte à pression constante P en cédant la quantité de chaleur q' à l'air qui va de B à C.

Ce cycle a le même coefficient économique que le cycle de Carnot, comme il est facile de s'en assurer. Il n'est d'ailleurs, au fond, rien autre chose, car le corps qui évolue ne cède de chaleur à l'extérieur qu'aux deux sources à température constante t_1 et t_0.

Quoi qu'il en soit l'air, et les gaz en général se prêtent mal aux échanges de chaleur, puisque leur coefficient de convection ne dépasse pas $0^{cal},1$ par mètre carré, minute, degré, et leur emploi n'est pas pratique. Il est préférable de s'adresser aux vapeurs.

Cas des vapeurs. — Les liquides facilement vaporisables conviennent bien aux machines calorifiques pour les trois raisons suivantes :

1° Le pouvoir de convection des liquides est très grand et celui des vapeurs saturées, l'est encore davantage, il se chiffre par dizaines de calories par mètre carré, minute et degré.

2° La chaleur latente de vaporisation, qu'on utilise principalement, est toujours considérable.

3° Les cycles sont avantageux en ce que le rapport des pressions extrêmes se tient dans des limites acceptables.

Cependant on sait que les pressions de vapeur saturée croissent rapidement avec la température, mais ce n'est pas là un gros inconvénient, car nous avons vu que, pour avoir un rendement pratique, les machines calorifiques doivent nécessairement fonctionner entre des températures qui ne diffèrent pas entre elles de plus de quelques dizaines de degrés.

Le cycle théorique qu'on fait décrire aux liquides vaporisables est représenté sur la *fig.* 7, Pl. X. DA et BC sont les lignes adiabatiques, DC et AB sont les lignes isothermiques en même temps que les lignes d'égale pression.

En D, le corps qui évolue est liquide, il vient de se condenser au contact des parois qu'il s'agit de chauffer.

De D à A, il passe adiabatiquement de la pression P et de la température t_1, à la pression p et à la température t_0 ; une petite partie se volatilise nécessairement.

En A, le corps se présente sous la forme d'un mélange de liquide et de vapeur saturée.

De A à B, la volatilisation totale se produit à pression constante p, en empruntant la quantité de chaleur q_0 à la source froide.

En B, le corps est complètement à l'état de vapeur saturée.

De B à C, la vapeur est comprimée adiabatiquement de la pression p à la pression P ; la vapeur se surchauffe ou se condense en partie suivant les cas.

En C, on a donc soit une vapeur saturée mélangée de liquide, soit une vapeur surchauffée.

De C à D, la vapeur comprimée se condense complètement en cédant la quantité de chaleur utile q_1 à la source chaude.

Soit C′ le point où la courbe de vapeur saturée passant par B vient couper la ligne CD. Pour les vapeurs qui se condensent partiellement pendant la compression adiabatique, C′ est à droite de C et le cycle ABCD est un cycle de Carnot; au contraire, pour les vapeurs qui se surchauffent par la compression (vapeur d'eau), C′ est entre C et D, et, dans ce cas, la partie CC′ de la ligne d'égale pression n'est pas isothermique; le cycle n'est donc pas tout-à-fait un cycle de Carnot.

Voyons maintenant quelles vapeurs on peut employer dans les machines calorifiques. Ces vapeurs doivent satisfaire à deux conditions fondamentales :

1° Il faut que leur tension à la température de la source froide ne soit pas trop faible, de façon à conserver au compresseur des dimensions acceptables ;

2° A la température de la source chaude la tension de la vapeur saturée ne doit pas dépasser quelques atmosphères.

Si la source froide est l'air de l'atmosphère ou l'eau d'une rivière, la chaleur utile créée ne pourra pas être portée à une température bien élevée, 100 degrés tout au plus, et il sera impossible d'employer la vapeur d'eau, si avantageuse au point de vue de la chaleur latente de vaporisation, parce que sa tension est trop faible aux températures ordinaires de l'atmosphère. Dans ce cas, il faudra

recourir à l'éther sulfurique, par exemple, qui bout à 35 degrés sous une atmosphère et à 89 degrés sous 5 atmosphères, ou bien encore au sulfure de carbone qui bout à 46 degrés sous 1 atmosphère et à 106 degrés sous 5 atmosphères. Pour ces corps, la loi des variations de pression avec les variations de température est à peu près la même que pour l'eau, mais la chaleur de volatilisation est beaucoup plus petite, car elle atteint à peine le sixième de celle de l'eau.

L'emploi de la force motrice, pour obtenir de la chaleur utile, emploi qui a reçu une application si heureuse dans le procédé d'évaporation économique par compression de la vapeur, pourra rendre des services dans les cas analogues où le corps qui nécessite le calorique se prête à la compression mécanique et peut, *lui-même*, servir de véhicule à la chaleur. Il serait sans doute encore possible de l'utiliser dans les cas où il est dangereux d'employer les combustibles, pour le chauffage des explosifs par exemple, et où il n'est pas besoin de dépasser la température de 100 degrés. Mais on voit qu'en somme le cercle d'application des machines calorifiques est très restreint.

Pour terminer ce sujet, je vais indiquer comment la méthode de vaporisation par compression de la vapeur permettrait d'utiliser les forces naturelles pour faire mouvoir n'importe quel moteur et particulièrement les locomotives.

On sait qu'il a été imaginé, par M. Honigmann d'Aix-la-Chapelle, des locomotives *sans feu* marchant au moyen de dissolutions concentrées de soude caustique, qui, en absorbant la vapeur d'échappement, développent la chaleur nécessaire au chauffage de la chaudière à vapeur. La locomotive peut marcher tant que la solution de soude reste assez concentrée pour absorber rapidement la vapeur d'échappement et pour avoir une température suffi-

samment élevée. Quand cette solution est devenue trop faible, on l'envoie se concentrer par évaporation dans les postes fixes installés à cet effet.

Ce n'est pas ici le lieu de discuter ce procédé, il suffit seulement de savoir que l'expérience a montré qu'il pouvait devenir pratique (*). La soude n'attaque pas trop les tôles et les locomotives peuvent marcher pendant plusieurs heures sans que la pression de la vapeur varie beaucoup.

L'application dont je parle consisterait à effectuer la concentration des dissolutions de soude par la compression de la vapeur. Une ville munie de chutes d'eau pourrait ainsi se construire des tramways dont la traction ne lui coûterait à peu près rien.

Les grands tunnels de montagne ont toujours d'importantes chutes d'eau dans leur voisinage. Il serait possible de les utiliser pour faire la traction au moyen de locomotives Honigmann. De cette façon, on n'emploierait pas de combustible et on supprimerait les frais qui en sont la conséquence, ainsi que la fumée qui encombre ces tunnels et les rend fort désagréables aux voyageurs. On a même été, m'a dit M. Piccard, jusqu'à proposer de construire des locomotives à soude qui, sur les pentes, se transformeraient en appareils de concentration par compression de la vapeur, et utiliseraient ainsi la descente pour remettre la machine, sauf un appoint à la station extrême, en état de remonter. Ce sont là des conceptions encore prématurées, mais il n'est pas impossible qu'elles se réalisent un jour, sinon avec la soude, du moins avec un autre agent chimique plus avantageux.

(*) Voir sur ce sujet un article de M. Riedler dans *Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure*, t. XXVII, p. 729.

TABLE DES MATIÈRES.

Pages

INTRODUCTION. 377

Ire PARTIE. — PROCÉDÉ DE VAPORISATION ÉCONOMIQUE PAR COMPRESSION DE LA VAPEUR. 383

1° Description du procédé. 383
2° Transmission de la chaleur à travers la surface de chauffe . . . 387
3° Détermination des pressions dans le veporisateur et le condenseur. 392
4° Calcul du travail absorbé par la compression et de la quantité de chaleur rendue disponible par la condensation de la vapeur. 395

IIe PARTIE. — APPAREIL PICCARD A SEL FIN. 401

1° Description de l'appareil. 401
2° Influence du dépôt de gypse. 414
3° Différentes manières d'employer l'appareil Piccard 417
4° Conduite de l'appareil. 422
5° Cas où l'emploi de l'appareil Piccard est avantageux 424

IIIe PARTIE. — CALCULS ET DISCUSSIONS RELATIFS A L'APPAREIL PICCARD A SEL FIN. 428

1° Calcul des pressions dans le vaporisateur et le condenseur. . . 429
2° Travail du compresseur 436
3° Circulation de l'eau salée 437
4° Discussion sur le réglage de l'appareil 445

IVe PARTIE. — APPAREIL PICCARD A SEL GROS. 447

1° Description de l'appareil. 447
2° Conduite de l'appareil. — Résultats. 452

Ve PARTIE. — CONSIDÉRATIONS SUR L'EMPLOI DE LA FORCE MOTRICE POUR OBTENIR DE LA CHALEUR 455

NOTE

SUR

L'EXPLOSION D'UNE CHAUDIÈRE A VAPEUR

DANS UNE SUCRERIE, A AULNOIS (AISNE)

Par M. HIRSCH, ingénieur en chef des ponts et chaussées.

Le 12 décembre 1887, un générateur de vapeur faisait explosion dans une sucrerie à Aulnois (Aisne); trois ouvriers étaient tués et un autre blessé.

La chaudière dont il s'agit fait partie d'un groupe de six générateurs. Elle porte le numéro 5. Elle est cylindrique et à trois bouilleurs, dont un ordinaire dans le bas, et deux autres latéraux de forme tubulaire; ces bouilleurs sont reliés au corps cylindrique par des communications rivées.

Cette chaudière a été construite en 1877, déclarée le 7 août 1885; date de la dernière épreuve décennale 1er septembre 1885, visitée extérieurement par le service des mines le 27 août 1887; fait partie de l'Association de la Somme et départements voisins; dernières visites de l'Association : intérieure, le 12 juillet 1887, extérieure, le 8 novembre 1887.

Le bouilleur inférieur est fermé à l'avant par un tampon en fonte, portant un trou d'homme et sur lequel est rivé le bord de la tôle; il pénètre de 9 centimètres dans

la tôle; la rivure, faite à mi-longueur, laisse deux demi-recouvrements de 45 millimètres. L'épaisseur de la partie cylindrique du tampon est de 45 millimètres et celle de la tôle de 11 millimètres.

Le groupe des 6 chaudières (Pl. XI, *fig.* 1 et 2) est placé dans un local spécial. Le massif est enterré; la chambre de chauffe forme un enfer de $5^m,20$ de large, $3^m,88$ de hauteur jusqu'au niveau du sol extérieur; il est recouvert en partie par une passerelle de 2 mètres de large, portée par des piliers en bois et régnant sur toute la longueur. La chaufferie ne communique avec le dehors que par un étroit escalier et par une échelle mobile.

L'explosion se produisit dans la nuit du 11 au 12 décembre, vers deux heures du matin. Elle s'annonça par une forte détonation. Immédiatement la chaufferie se remplit de vapeur et le sol se couvrit d'une couche de $0^m,40$ environ d'eau bouillante. Le maître chauffeur et les deux aides-chauffeurs furent grièvement brûlés; ces deux derniers eurent encore la force de gagner l'escalier, dont ils étaient rapprochés; le maître chauffeur, jeté au milieu des débris, ne put se dégager. Un surveillant de service, accouru au bruit de la détonation, se hâta de fermer la prise de vapeur et de retirer le maître-chauffeur; mais ce dernier mourut au bout d'une demi-heure; les deux chauffeurs survécurent, l'un sept heures et l'autre cinq jours. Un ouvrier, placé sur la passerelle, subit une incapacité de travail de vingt jours. L'alimenteur, qui se trouvait sur le massif, ne fut pas atteint. Les dégâts matériels sont de médiocre importance.

Le tampon en fonte (*fig.* 3 et 4) du bouilleur du bas s'était détaché et avait été projeté. La ligne de rupture suit presque rigoureusement celle des rivets, sauf 5 rivets qui ont arraché un morceau de tôle.

Sur la circonférence extérieure du bouchon, la cassure a $1^m,345$ de développement et $0^m,660$, sur la circonfé-

rence intérieure. Il en est de même dans beaucoup d'accidents de cette nature : la cassure commence et se développe par la circonférence extérieure du bouchon, et, comme elle est cachée par le recouvrement de la tôle, elle reste invisible; peu à peu le jeu des dilatations fait augmenter la fente en longueur et en profondeur, et, à un certain moment, toute l'épaisseur de la fonte est fendue et la cassure gagne successivement sur les deux circonférences. Une fuite apparaît alors extérieurement au chanfrein de la tôle. Dans ces conditions, un rematage de la tôle ne remédie en aucune façon au défaut et peut, au contraire, aggraver considérablement la situation, en augmentant la fente.

A la sucrerie d'Aulnois, le chanfrein de la tôle porte des traces d'un rematage, s'étendant du bas vers les deux côtés, sur 1 mètre environ de longueur. L'enquête a révélé qu'en effet ce matage avait été exécuté quatre jours avant l'accident, à la suite de fuites observées dans cette partie.

Les trous de rivets du tampon étaient, non pas percés au foret, mais venus de fonte; ces trous étaient assez irréguliers, et, pour les faire correspondre à ceux de la tôle, on avait dû, sans doute, recourir à l'opération funeste du brochage, ce qui semble résulter nettement de l'ovalisation marquée des trous de la tôle.

La cause de l'accident a été mise clairement en évidence : c'est la cassure ancienne existant dans la collerette du tampon.

Cet accident est un nouvel exemple, à la suite de plusieurs autres, des conséquences que peut entraîner l'usage des tampons en fonte, lorsqu'ils ne sont pas mis en œuvre suivant les règles de l'art.

Avis de la Commission centrale des machines à vapeur.

La Commission centrale des machines à vapeur, consultée sur cet accident, a émis l'avis ci-après :

« L'accident survenu le 12 décembre 1887 est dû à la rupture d'un tampon en fonte formant tête de bouilleur. Ce tampon portait une fissure ancienne suivant la ligne de rivure; il s'est rompu suivant cette fissure et a été projeté. Trois ouvriers qui travaillaient dans la chaufferie ont été grièvement brûlés par l'eau chaude et la vapeur; ils ont succombé peu de temps après; un autre, qui se trouvait dans le voisinage, a été blessé. Un surveillant, accouru au bruit de l'explosion, a eu la présence d'esprit de fermer la prise de vapeur.

« Les trous de rivets que portait le tampon qui s'est rompu étaient venus de fonte et la rivure défectueuse.

« Le générateur qui a fait explosion faisait partie d'un groupe de six chaudières non munies de clapets de retenue de vapeur; la chaufferie, en forme d'enfer, ne présentait que des dégagements difficiles; ces circonstances ont contribué à aggraver les conséquences de l'explosion.

« Les tampons en fonte ont déjà donné lieu à de nombreux accidents, notamment à ceux survenus aux forges de l'Adour le 22 février 1886 et à Montrambert le 14 août 1886 (*) ».

(*) Voir *Annales des Mines*, 1887, 1er sem., p. 183 et 186.

BULLETIN
DES ACCIDENTS ARRIVÉS DANS L'EMPLOI DES APPAREILS A VAPEUR
PENDANT L'ANNÉE 1887.

DATE de l'accident	NATURE et situation de l'établissement où l'appareil était placé	NATURE forme et destination de l'appareil — Détails divers	CIRCONSTANCES de l'accident	CONSÉQUENCES de l'accident	CAUSE PRÉSUMÉE de l'accident
10 janv.	Fabrique de produits chimiques, à St-Denis (Seine).	Récipient cylindrique vertical en tôle, à fonds plats réunis au corps par des cornières rivées. — Epaisseur du corps cylindrique 4mm. — Diamètre 1m,35 — Hauteur 1m,25. — Construit en 1877. — Libre communication avec l'atmosphère au moyen d'un tuyau d'évacuation de 25mm de diamètre.	On a obturé le tuyau d'évacuation. ce qui transformait l'appareil en récipient clos. Rupture du fond plat supérieur suivant un diamètre, et de la rivure de la cornière sur le corps cylindrique. Le fond plat s'est fortement déformé en cône avant l'arrachement.	Dégâts matériels peu importants.	Transformation intempestive, et en dehors des conditions réglementaires, d'un récipient de plus de 100 litres à grands fonds plats et à corps cylindrique d'une épaisseur insuffisante, en un récipient fermé et soumis à une pression de vapeur pouvant atteindre 5k 1/2.
16 janv.	Élévation d'eau sur le chemin de halage du canal de Bourgogne, à Dijon.	Chaudière verticale à foyer intérieur contenant 4 tubes bouilleurs horizontaux, disposés en hélice à 45° les uns des autres. — Hauteur du corps 1m,85. — Epreuve en mai 1886. — Timbre 6k.	Rupture de l'enveloppe extérieure en trois fragments principaux, projetés respectivement à 30m, 180m et 100m, à savoir : les deux feuilles de tôle de l'enveloppe, séparées l'une de l'autre, et, d'autre part, le fond embouti supérieur avec son dôme de vapeur.	Dégâts purement matériels.	Causes restées en somme mystérieuses. — L'enquête n'a mis hors de doute que les trois points suivants : Accident présentant les caractères d'une explosion par excès de pression. — Défaut de construction ayant déterminé les lignes de rupture les plus faciles : tôles du corps cylindrique assemblées par des couvre-joints cintrés dans le mauvais sens et sans les précautions désirables. — Grave imprudence du chauffeur, pour avoir quitté depuis deux heures sa chaudière encore en feu et sous pression.
31 janv.	Filature, à St-Brès (Gard).	Chaudière consistant en un simple corps cylindrique horizontal, avec fonds plats rivés sur cornières. — Longueur du corps 4m,37. — Diamètre intérieur 0m,98. — Epaisseur des tôles des fonds plats 7mm. — Timbre 2k,5. — Epreuve en décembre 1881, chez le constructeur.	Rupture du fond plat arrière, en pleine tôle sur les 7/10 de sa circonférence, avec cassure à peu près tangente aux têtes des rivets qui le fixaient sur la cornière, et projection de ce fond à 12m de la place de sa chaudière.	Quatre personnes tuées, trois grièvement et dix-sept légèrement blessées. — Dégâts matériels considérables. — Tous les murs de la filature effondrés et dejetés vers l'ex-	Vice évident de construction : fonds plats de qualité médiocre, d'une épaisseur insuffisante, en égard à leur diamètre et à la pression du timbre, simplement rivés sur des fers à cornière [illegible]
1er févr.	[illegible] teinturerie, à Montpantin (Loir-et-Cher).	[illegible] fonds plats semblables aux précédents, directement chauffée par un foyer inférieur. — Hauteur 1m,05. — Diamètre 0m,50. — Epaisseur des tôles 8 à 9mm. — Timbre 5k. — Epreuve décennale en septembre 1883.	[illegible] fonctionnait la bouteille alimentaire, quand le fond supérieur s'est brisé en quatre morceaux. — La rivure de ce fond sur le corps cylindrique est restée intacte; cassures radiales, suivant avec précision le maximum de courbure de l'emboutissage.	[illegible] laire légèrement brûlé. — Dégâts matériels peu considérables.	[illegible] état d'entretien et notamment corrosion des tôles du fond supérieur qui s'est rompu.
6 févr.	Bateau-omnibus n° 3, à Rouen.	Générateur à petits éléments, système Bouron, formé d'un faisceau de tubes horizontaux implantés dans le parement d'un réservoir parallélipipédique, formant le fond de la boite à feu. Chaque tube est double, l'eau circulant dans le tube intérieur, qui sert de tirant, puis revenant entre celui-ci et le tube extérieur concentrique. — Diamètre du tube intérieur 27mm,5. — Epaisseur 2mm,25. — Mais étirement aux deux extrémités qui sont filetées, et alors diamètre intérieur de 10mm. L'eau pénètre aux deux extrémités par quatre trous de 15mm de diamètre, opposés deux à deux; deuxième paire de trous précisément située à la naissance du goulot qui rejoint les deux diamètres distincts.	Des fuites graves se manifestant à l'un des tubes de la rangée inférieure autour du bouchon, le mécanicien essaya de serrer par l'arrière le tube qui fuyait. Projection d'un tube tirant et de son bouchon; rupture de 3 tubes tirants de la rangée inférieure, au même point, à l'arrière, au droit des deux derniers trous de communication à la naissance de l'étirement du tube, le gueulard en fonte étant d'ailleurs brûlé au-dessous des 3 tubes brisés, qui dès lors étaient en porte-à-faux à l'avant et travaillaient par flexion.	Chauffeur mortellemt brûlé; mécanicien atteint.	Vice de construction inhérent au système de la chaudière, et en partie mauvais état d'entretien. Accident aggravé par les imprudences du mécanicien, qui aurait dû maintenir fermées les portes de la boite à feu, et se garder de serrer en pression les écrous des tubes qui fuyaient.
24 févr.	Fabrique de caoutchouc, aux Lilas (Seine).	Récipient cylindrique à axe horizontal en tôle. — Longueur 2m,36. — Diamètre extérieur 1m,20. — Fermé à l'arrière par un fond embouti, à l'avant par un couvercle en fonte de 42mm d'épaisseur, constituant en somme un fond plat de grande dimension, relié à une cornière par 12 boulons genouillés pénétrant dans des encoches ménagées dans la fonte. — Timbre 4k. — Epreuve en 1880. — Pas de soupape de sûreté réglementaire; seulement un robinet de purge et un manomètre.	Le couvercle en fonte brisé en sept morceaux assez irréguliers et projetés à quelques mètres en avant; la ligne de rupture principale suit, sur plus d'une demi-circonférence, la naissance d'un léger bombement de la fonte, situé vers le centre du couvercle. Le récipient a reculé d'environ 40cm. Le robinet de purge était fermé.	Dégâts purement matériels peu importants.	Forme défectueuse d'un fond plat en fonte, à nervures insignifiantes, et d'un diamètre de 1m,50. Dès lors, un échauffement trop brusque ou un léger excès de pression pouvaient amener la rupture de l'appareil qui, timbré à 4k, recevait la vapeur d'un générateur timbré à 6k.

DATE de l'accident	NATURE et situation de l'établissement où l'appareil était placé	NATURE forme et destination de l'appareil — Détails divers	CIRCONSTANCES de l'accident	CONSÉQUENCES de l'accident	CAUSE PRÉSUMÉE de l'accident
25 mars.	Locomotive, gare de Frontignan (Hérault).	Chaudière de locomotive. Dôme de vapeur cylindrique, situé à l'avant près de la cheminée, terminé à sa partie supérieure par une calotte plane à bords emboutis, rivés sur le corps cylindrique, — Diamètre intérieur du dôme 803mm. — Hauteur totale 0m,97. — Epaisseur 11mm. — Locomotive construite en 1868-1869. — Dernière épreuve en 1884.	Par suite d'une négligence, la machine fut mise en marche, bien qu'on eût constaté une fissure extérieure de 0m,20 de développement à la partie emboutie du dôme. Rupture en pleine tôle, au droit de la partie emboutie, de la calotte supérieure du dôme.	Dégâts purement matériels insignifiants.	Défaut d'entretien et de surveillance.
3 avril.	Distillerie, à Roubaix (Nord).	Récipient cylindrique horizontal en tôle de fer. — Longueur 3m,60. — Diamètre 1m,40. — Corps cylindrique composé de 2 viroles, chacune à 2 tôles, assemblées par des couvre-joints extérieurs rivés sur chaque feuille au moyen de rivets à têtes fraisées intérieurement. — Le long de la génératrice inférieure, série de tuyaux lançant la vapeur tangentiellement à une section droite. — Epreuve en 1884. — Timbre 5k.	Rupture du joint médian circulaire. Une des viroles a été projetée. Le long de la génératrice inférieure, l'épaisseur primitive de 10mm était réduite à 1mm,5, et les têtes fraisées des rivets avaient disparu.	Un ouvrier brûlé mortellement. — Dégâts matériels assez considérables (mur de façade abattu).	Usure extrême, paraissant due aux actions mécaniques et aux frottements subis par les tôles. — Défaut flagrant d'entretien.
9 avril.	Atelier d'imprimerie, à Paris.	Générateur Belleville, datant de 1877, composé de 4 éléments de 16 tubes, avec collecteur inférieur et supérieur, épurateur de vapeur et déjecteur latéral. — Diamètre des tubes 100mm. — Longueur 2m. — Epaisseur 4mm. — Dernière épreuve 1885. — Timbre 10k.	Le 2e tube du 3e élément s'est déchiré sur 38cm de longueur et environ 10cm de largeur maximum; aucune projection. — Les 1er, 3e, 4e et 5e tubes du 3e élément étaient arqués, les chevilles de sûreté fondues.	Dégâts purement matériels insignifiants.	Obstruction, par des dépôts incrustants, de l'ajutage de communication du collecteur inférieur avec un des éléments du générateur. L'obstruction a produit, dans cet élément, un défaut d'alimentation, suivi d'un coup de feu.
29 avril.	Ateliers de chaudronnerie, à Bourgoin (Isère).	Récipient vertical tronc-conique en cuivre. — Hauteur 1m,45. — Diamètre 0m,50 à la base, 0m,63 au sommet. — Epaisseur 2mm. A fond rivé. — Couvercle fixé par 6 boulons. — Timbre, sans indication de pression, 2k.	Le constructeur, pour essayer l'appareil, y introduisit de la vapeur à 2k, sans songer à ouvrir en même temps le robinet d'échappement. Le [illegible]	Un ouvrier légèrement blessé.	Admission, par suite d'une fausse manœuvre, de vapeur sous pression dans un récipient mal construit, incapable de supporter une pression effective [illegible]
4 mai.	Filature, à Longueville (Seine-Inférieure).	Récipient parallélipipédique, à face supérieure remplacée par un comble. — Hauteur 1m,80. — Largeur et profondeur 1m,50. — Sur une des faces verticales, porte de 1m,40 sur 0m,80, fixée par 10 serre-joints, dont 6 sur les grands côtés verticaux et 4 sur les petits côtés. — Construit en 1885. — Timbré, en septembre 1885, pour 2k.	La porte a été projetée à 50m. — 4 serre-joints seulement étaient en prise : trois ont été rompus, et le quatrième faussé. — En outre, la soupape du tuyau adducteur était surchargée et ne pouvait se soulever que pour une pression de 6k.	Dégâts purement matériels peu importants.	Négligence dans la confection du joint, et excès de pression dû à la surcharge de la soupape de sûreté placée sur le tuyau adducteur.
16 mai.	Mine Saint-Eugène, concession de Firmy (Aveyron).	Chaudière cylindrique horizontale, superposée à un seul bouilleur avec lequel elle communique par deux larges et courts cuissards. — Longueur du bouilleur 7m,40. — Diamètre 0m,77. — Epaisseur primitive 10mm. — Dernière épreuve décennale en février 1885. — Timbre 4k. — Construite probablement en 1854.	Le bouilleur s'est rompu : la deuxième pièce de tôle, à l'avant de la génératrice supérieure, s'est rompue sur trois côtés et a pivoté autour du quatrième. En outre, une longue déchirure hélicoïdale part d'un des angles de cette ouverture, contourne l'arrière du bouilleur et vient se bifurquer autour d'un des cuissards. Les rivures ont été suivies, mais non intéressées par les principales déchirures. Près du point de départ des lignes de rupture, la tôle n'avait plus que 2mm d'épaisseur.	Chauffeur grièvement brûlé. — Dégâts matériels considérables (le massif entier, composé de 4 chaudières, a été détruit).	Profondes corrosions intérieures, dues à la vétusté de l'appareil négligemment entretenu, et à la mauvaise qualité des eaux d'alimentation parfois acides.
24 mai.	Filature de lin, à Barentin (Seine-Inférieure).	Chaudière cylindrique horizontale, à fonds plats, surmontée d'un petit réservoir de vapeur en fonte et munie de 2 tubes intérieurs de retour de flamme et de 3 bouilleurs à deux communications. — Diamètre d'un bouilleur 0m,55. — Longueur 9m,40. — Timbre 6k. — Dernière épreuve en juin 1879.	Sous le bouilleur du milieu, large déchirure avec emboutissage en pleine tôle, de 1,m50 de long et près de 1m de large; le fragment déchiré a pivoté autour d'une génératrice. Tôle décapée intérieurement et bleuie à la façon des tôles brûlées.	Chauffeur mortellement brûlé. — Dégâts matériels insignifiants (il y a eu seulement rupture de la grille et démolition de la voûte du foyer).	Défaut d'alimentation dû : 1° A une réparation mal faite de la conduite d'alimentation; — 2° Au défaut de consultation des indicateurs de niveau, les uns paralysés, les autres en mauvais état de fonctionnement.
3 juin.	Filature de coton, à Rouen (Seine-Inférieure).	Chaudière cylindrique horizontale, avec 2 tubes de retour de flamme et 3 bouilleurs à 2 cuissards. — Capacité 15m3,50. — Timbre 6k. — Diamètre des bouilleurs 0m,55. — Longueur 9m,15. — Le bouilleur de droite, remplacé isolément, avait été éprouvé en mai 1884. — Dernière visite de l'appareil en septembre 1886.	La tôle du coup de feu du bouilleur de droite s'est déchirée sur trois côtés et développée à droite, la déchirure ayant 1m,10 de long sur 0m,80 de large.	Dégâts matériels insignifiants.	Défaut prolongé d'alimentation et défaut de consultation des appareils indicateurs du niveau de l'eau, en mauvais état d'entretien.

DATE de l'accident	NATURE et situation de l'établissement où l'appareil était placé	NATURE forme et destination de l'appareil — Détails divers	CIRCONSTANCES de l'accident	CONSÉQUENCES de l'accident	CAUSE PRÉSUMÉE de l'accident
7 juin.	Papeterie, à Cornus (Aveyron).	Récipient en fonte (cylindre sécheur). — Diamètre $0^m,90$. — Longueur $1^m,66$. — Fonds plats à nervures radiales, boulonnées sur 8 oreilles venues de fonte intérieurement au cylindre, de 20^{mm} d'épaisseur, de 70^{mm} de base, de 50^{mm} de portée radiale. Récipient ni déclaré, ni éprouvé, ni muni d'une soupape de sûreté. La pression y atteignait 6^k.	Les 8 oreilles d'un des fonds plats se sont rompues simultanément à l'encastrement; le cylindre a passé à travers un gros mur.	Un ouvrier grièvem[t] brûlé. Dégâts matériels notables.	Rupture des oreilles en fonte, due à des pressions trop élevées, que ne comportait pas le mode de construction du récipient.
8 juill.	Savonnerie, à Marseille.	Chaudière horizontale cylindrique à 2 bouilleurs. — Longueur du corps 4^m. — Diamètre 1^m. — Longueur des bouilleurs 4^m. — Diamètre $0^m,60$. — Non déclarée; non éprouvée depuis 1870.	Le bouilleur de gauche s'est rompu sur 1^m de long, suivant sa génératrice supérieure; il contenait des incrustations solides de 15^{mm} d'épaisseur.	Dégâts purement matériels insignifiants.	Causes non établies avec certitude, les lieux ayant été dénaturés. — Vraisemblablement, l'accident est dû à la nature et à l'épaisseur des dépôts dans le bouilleur.
10 juill.	**Bateau omnibus n° 4**, à Rouen (Seine-Inférieure).	Chaudière à petits éléments du type Bouron, à savoir : 103 tubes doubles. (Voir la description donnée plus haut pour le bateau omnibus n° 3, accident du 6 février). — Timbre 8^k. — Construite en 1885.	Un des tubes-tirants s'est rompu dans le filetage même; un autre s'est fissuré au droit de ses trous de communication avec le tube extérieur.	Chauffeur atteint de brûlures. — Dégâts matériels peu importants.	Vice de construction inhérent au système de tubes Bouron. — Accessoirement, mauvais état d'entretien de l'appareil.
13 juill.	Cartonnerie, à Athies (Pas-de-Calais).	Récipient cylindrique vertical en tôle de fer, à fonds légèrement emboutis, reliés au corps par des cornières. — Diamètre $1^m,80$ — Hauteur $2^m,35$. — Ailes des cornières 90^{mm}. — Epaisseur 12^{mm}. — Timbre 5^k. — Epreuve en mai 1886.	Le fond inférieur est resté en place; le corps cylindrique s'est élevé à une grande hauteur. La rupture suit rigoureusement l'arête de la cornière; cassure nette, esquilleuse, qui porte les traces d'une ancienne fissure intéressant la moitié de l'épaisseur à partir du dedans.	Dégâts purement matériels très considérables.	Accident dû vraisemblablement à la qualité et à la forme défectueuse des cornières qui réunissaient les fonds emboutis au corps cylindrique.
17 juill.	Distillerie, à Haubourdin (Nord).	Récipient cylindrique vertical avec deux fonds emboutis, le tout en tôle de cuivre à simples rivures. — Diamètre 1^m. — Hauteur $2^m,25$. — Pression [illegible]	Le corps cylindrique s'est déchiré aux 4/5 de sa hauteur, suivant une section droite en pleine tôle. Le fragment [illegible]	Un ouvrier tué; un deuxième grièvement blessé; un troisième légèrement. — Dégâts matériels con-	Corrosion profonde, due à l'emploi, dans des circonstances défectueuses, de 1883 à 1887, d'acide sulfurique [illegible]

			[illegible] circulaire de la corrosion profonde, le métal n'ayant plus que $1^{mm},5$ d'épaisseur en moyenne, avec un minimum de $0^m/^m,8$.		
9 août.	Battage de grains, à Sardieu (Isère).	Chaudière de locomobile, cylindrique, verticale, à foyer intérieur en tôle soudée, traversé par 24 tubes bouilleurs et par une cheminée. — Ce foyer était assemblé à la tôle formant plaque de fondation au moyen d'une collerette relevée à la forge. Timbre 7^k. — Construite en 1883.	Un sillon de $0^m,50$ de longueur s'était formé à la ligne d'emboutissage de la collerette, ne laissant qu'une épaisseur de 2 à 3^{mm} de tôle intacte. La déchirure, commencée en ce point faible, s'est propagée sur la moitié du pourtour de la base; le foyer s'est aplati sous la pression, en brisant ses armatures. La locomobile, lancée en l'air, est retombée 22^m plus loin.	Un enfant atteint de brûlures. — Quelques dégâts matériels.	Dispositions vicieuses du foyer de la chaudière.
15 août.	Battage de grains, à Pissy-Poville (Seine-Inférieure).	Chaudière cylindrique, horizontale, tubulaire, à foyer intérieur cylindrique vertical, avec boîte à fumée à l'arrière. — 14 tubes en laiton. — Longueur, $2^m,08$ — Diamètre $0^m,06$. — Epaisseur 2^{mm}.	Un tube de la rangée supérieure s'est rompu : jet violent de vapeur, pendant 1 ou ou 2 minutes, ayant forcé la porte du cendrier et projeté à 30^m les escarbilles et la suie enflammée. Les autres tubes de la rangée supérieure étaient tous déformés; le ciel du foyer présentait la trace d'un coup de feu.	Les escarbilles enflammées ont incendié une meule et une grange.	Défaut prolongé d'alimentation.
30 août.	Brasserie-malterie, à Mustapha-Inférieur, près d'Alger.	Chaudière cylindrique, horizontale, communiquant à l'avant avec deux bouilleurs inférieurs très courts (longueur $2^m,30$, diamètre $0^m,77$), à l'arrière avec quatre autres bouilleurs inférieurs, disposés deux à deux les uns au-dessous des autres (longueur $4^m,92$, diamètre $0^m,75$). — Longueur du corps principal 7^m. — Diamètre $1^m,40$. — Timbre 6^k. — Construite en 1883. — Eprouvée en janvier 1884.	Rupture au-dessus de la grille, sur toute la longueur du bouilleur antérieur de droite, et suivant une de ses génératrices inférieures; la tôle s'est repliée, en formant une ouverture de $0^m,75$ de large. La calotte du fond s'en est séparée partiellement, ainsi que le bouchon en fonte servant de trou d'homme; ce bouchon s'est lui-même rompu.	Le chauffeur a subi de légères brûlures. — Dégâts matériels peu importants; aucun débris projeté à plus de 10^m.	Défaut d'alimentation, imputable à la négligence des chauffeurs, et facilité par le mauvais état des appareils indicateurs du niveau de l'eau.

DATE de l'accident	NATURE et situation de l'établissement où l'appareil était placé	NATURE forme et destination de l'appareil — Détails divers	CIRCONSTANCES de l'accident	CONSÉQUENCES de l'accident	CAUSE PRÉSUMÉE de l'accident
18 sept.	Bateau *Rover*, pendant une traversée entre l'île d'Yeu et le continent.	Chaudière cylindrique, horizontale, tubulaire, à retour de flamme, surmontée d'un coffre à vapeur. — Timbre 4k. — Dernière épreuve le 14 septembre 1887.	La chaudière a été déchirée sur 1m,50 de long suivant sa génératrice inférieure. Plusieurs criques et traces de brûlure sur la tôle. A l'intérieur, dépôt de sel de 5mm d'épaisseur, dont les débris forment, à droite et à gauche de la déchirure, un amas feuilleté de 20 à 25mm d'épaisseur.	Le chauffeur grièvement brûlé.	Coup de feu, résultant de l'accumulation des dépôts de sel dans le bas de la chaudière.
28 sept.	Féculerie, à Mézières (Seine-et-Oise).	Chaudière horizontale à 2 bouilleurs, le corps principal en tôle de 11mm, les bouilleurs en tôle de 8mm. — Construite en 1872. — Timbre 6k. — Epreuve décennale en 1883.	Le bouilleur de droite s'est rompu sur sa face supérieure, en une partie où l'épaisseur de la tôle était réduite à 4, 3 et même 1mm. Cette corrosion s'étend autour d'une demi-circonférence de la collerette du cuissard d'avant.	Large entonnoir produit dans le massif du fourneau et dans le terrain avoisinant.	Amincissement d'une partie de la tôle, dû à la présence prolongée de l'humidité sur une partie relativement froide de la paroi, les gaz sulfureux des fumées ayant pu activer cette action.
6 octob.	Distillerie, à Bône (Algérie).	Batterie de 3 alambics en cuivre, cylindriques, verticaux. — Diamètre 0m,80. — Hauteur 1m,125. — Dans le haut, fond embouti; dans le bas, fond en forme de calotte sphérique, rapporté au moyen d'une bride, tenue par des boulons. Deux larges tubulures de 0m,40 de diamètre sont munies de collerettes, qui leur sont assemblées par une simple soudure à l'étain, et reçoivent des plaques de fermeture assemblées par boulons. — Appareil ni éprouvé, ni déclaré; aucun organe de sûreté.	Un des joints à soudure d'étain, détérioré par un service prolongé, a cédé à la pression; la porte a été projetée à 4m,15 de distance. La batterie de distillation a glissé horizontalement, la partie voisine de la chaudière se déplaçant de 1m,14, la partie éloignée restant immobile.	Un ouvrier tué. — Dégâts matériels peu importants.	Mauvaise construction et agencement vicieux de l'appareil, qui n'était pas établi de manière à résister à une pression intérieure notable, et était desservi par des générateurs timbrés à 6k.
9 octob.	Bateau *Rouen*, dans l'avant-port du Havre (Seine-Inférieure).	Chaudière tubulaire du système Oriolle. — Au-dessus du niveau normal de l'eau, trois rangées de tubes servant de sécheurs. — Diamètre extérieur 70mm. — Epaisseur à l'état neuf 3mm. — Construite en 1884. — Dernière épreuve en 1886.	Le tube central de la troisième rangée, en partant du haut, s'est crevé dans sa partie centrale, sous la cheminée.	Le mécanicien et le chauffeur ont reçu des blessures assez graves.	Accident paraissant provenir, en partie du moins, d'une insuffisance d'épaisseur du tube, refroidi seulement par un courant de vapeur.

	(Isère).	embouti, recevant la vapeur par une des extrémités de son axe et fermé par un tampon autoclave. — Diamètre 2m. — Longueur 5m,30. — Timbre 5k. — Dernière épreuve le 30 juin 1884.	L'appareil a fait explosion presque sans bruit.		tangulaire, de grande dimension, bordée d'une collerette en tôle d'épaisseur insuffisante et posée en porte-à-faux avec arcades forçant sur le cadre et tendant à l'ouvrir aux angles, ladite collerette fatiguée sans doute par des serrages successifs qui avaient pu la criquer aux points faibles.
27 octob.	Scierie, à Courseulles (Calvados).	Chaudière cylindrique horizontale, à 2 bouilleurs — Construite en 1863. — Dernière épreuve en novembre 1880, à la suite d'une réparation au corps cylindrique. — Timbre 5k. — Diamètre des bouilleurs 0m,40.	Projection d'eau et de vapeur par une fissure de 2cm de largeur maxima et d'un développement total de 0m,37 sur le bouilleur de droite, à l'insertion de la communication avec le corps cylindrique.	Renversement d'une partie de la façade du fourneau, sans déplacement d'aucune des parties de la chaudière.	L'accident paraît devoir être attribué au mauvais état de la chaudière, dû à son âge et à la nature saumâtre de l'eau d'alimentation, joint probablement à une qualité défectueuse du métal, et n'ayant pu être constaté facilement à cause du diamètre trop faible des bouilleurs.
8 nov.	Féculerie, à Bazicourt (Oise).	Chaudière horizontale à 2 bouilleurs. Construite en 1868. — Eprouvée le 19 novembre 1886. — Timbre 6k.	A la partie inférieure du bouilleur de gauche, dans la région du coup de feu, un morceau de tôle de 0m,663 de largeur, de 0m,64 de longueur à gauche et 0m,52 de longueur à droite, s'est ouvert et rabattu sur la paroi gauche du foyer; cette portion de tôle était bleue sur ses deux faces.	Chaudière non déplacée. — Effondrement de la toiture du bâtiment et d'une partie des murs.	Coup de feu occasionné par la baisse du plan d'eau. Imprudence du chauffeur, qui a surchargé le sifflet d'alarme et continué à chauffer pendant plusieurs heures sans consulter son tube de niveau.
26 nov.	Fosse n° 4 des mines de Lens (Pas-de-Calais).	Chaudière cylindrique avec 2 réchauffeurs en forme de bouilleurs, placés en dessous d'elle, et communiquant chacun avec elle au moyen d'un seul cuissard placé en arrière, et inclinés de l'arrière vers l'avant. — Longueur du corps principal 11m. — Diamètre 1m,20. — Longueur des réchauffeurs 8m,87. — Diamètre 1m,20. — Timbre 5k,5. — Construite en 1869. — Dernière épreuve le 20 janvier 1882. — Dernière visite le 23 octobre 1886. — Pas de réparations notables.	La tôle du coup de feu était cintrée en travers du laminage; elle présentait une paille, dont le feuillet intérieur n'avait que 6mm d'épaisseur. Le métal étant surchauffé, une déchirure s'est produite en ce point faible, s'est propagée tout le long de la génératrice, puis s'est retournée en suivant tout le pourtour de la première rivure transversale. La partie antérieure de la chaudière ainsi détachée a été projetée et est retombée à 3m. La chaudière elle-même a subi un recul de 42cm, dans lequel la tuyauterie a été endommagée et le cuissard de gauche brisé.	Le chauffeur a reçu de fortes contusions. — Dégâts matériels notables.	Coup de feu occasionné par un abaissement anormal du plan d'eau, à cause d'une fuite à la jonction du cuissard unique, où existaient une cassure de la tôle et un décollement du joint. Cela peut être attribué à l'existence d'une chambre de vapeur, résultant de la disposition même de l'appareil, et au tassement inégal du massif.

DATE de l'accident	NATURE et situation de l'établissement où l'appareil était placé	NATURE forme et destination de l'appareil — Détails divers	CIRCONSTANCES de l'accident	CONSÉQUENCES de l'accident	CAUSE PRÉSUMÉE de l'accident
1er déc.	Mines de Brnay (Pas-de-Calais).	Foyer de locomotive-tender, construite en 1881, à 3 essieux accouplés. Timbre 8k,5. — Le foyer était en tôle de cuivre rouge; son ciel était armé de 8 poutrelles formées de 2 flasques en tôle entretoisées par des rivets; ces poutrelles étant, comme le ciel, longues de 1m,20, espacées de 0m,11 d'axe en axe, et portant en avant sur le champ de la plaque tubulaire, mais leur bout arrière ne s'appuyant pas sur la face verticale du foyer. Les 6 poutrelles du milieu étaient soutenues par 6 tirants.	Il s'était déjà formé, dans la tôle du ciel, de nombreuses criques et fissures, qu'on avait goujonnées. Les tirants, trop faibles, ont successivement cédé. Nouvelle et longue fissure, dans la partie du ciel qui n'était plus soutenue; le ciel s'est déchiré sur trois côtés et rabattu, autour du quatrième, sur la plaque tubulaire. Le mécanicien lancé à 95m, le chauffeur à 26m. La machine projetée à 23m.	Le mécanicien et le chauffeur tués; plusieurs ouvriers contusionnés. — La locomotive gravement détériorée; trois wagons ayant subi de sérieuses avaries. — Terrain couvert d'escarbilles et de suie sur une zone de 30m de large.	Disposition vicieuse du ciel du foyer et mauvais état d'entretien de la chaudière : poutrelles du ciel du foyer ne portant que par une extrémité, et n'étant soutenues que par des tirants d'une force tout à fait insuffisante.
8 déc.	Filature de lin, à Lys-lès-Lannoy (Nord).	Chaudière à bouilleurs à communications basses. — Longueur du corps principal 10m,70. — Diamètre 1m,30. — Longueur des bouilleurs 11m. — Diamètre 0m,75. — Timbre 5k. — Construite en 1867. — Epreuve décennale le 23 novembre 1885.	La tôle du coup de feu du bouilleur de droite, portée au rouge, s'est déchirée en pleine tôle, en forme d'arc ayant 1m,90 de corde et 0m,80 de flèche, l'ouverture a une largeur maxima de 0m,70. Tôle fortement bleuie à l'extérieur.	Un chauffeur légèrement blessé. — Dégâts matériels peu importants.	Coup de feu résultant d'un manque d'eau.
10 déc.	Bonneterie, à Troyes (Aube).	Presse à vapeur, formée de 3 plateaux creux rectangulaires en fonte, où la vapeur d'un générateur timbré à 7k est librement admise, le plateau du milieu étant fixe, les deux autres étant mobiles et pouvant être pressés contre les deux faces du plateau médian. — Longueur 1m,28. — Largeur 0m,90. — Hauteur 0m,10. — Epaisseur des faces planes 20mm; des côtés latéraux 15mm. — En outre, dans la cavité, entretoises venues de fonte, disposées en quinconce. — Chaque récipient ne cube que 63 litres. — Epreuve pour 5k, le 10 octobre 1885, sur la demande du construc-	Le plateau supérieur, intact, a été trouvé au-dessus des débris des deux autres. Ce sont principalement les petits côtés qui se sont rompus. En tout, 24 fragments. Sur deux des entretoises du plateau moyen, ainsi que sur un de ses bas-côtés, traces de cassures anciennes.	Cinq ouvriers et ouvrières blessés, dont deux grièvement. — Dégâts matériels sérieux.	Rupture préalable, et par suite défaut d'entretien de quelques entretoises d'un des plateaux à vapeur. Eu égard à la forme et au travail de ces appareils, entièrement en fonte, ils n'auraient pas dû être soumis à une pression de 7k. Il eût été préférable de doubler ou remplacer les entretoises venues de fonte par des entretoises taraudées en fer.

17 déc.	Sucrerie, à Arbonnes-sous-Laon (Aisne).	Wiart, à 2 bouilleurs, dont un inférieur et deux autres tubulaires, reliés au corps cylindrique par des communications rivées. — Longueur du corps 5m,40. — Diamètre 1m,30. — Bouilleur ordinaire 5m,10 de longueur. — 0m,80 de diamètre. — Bouilleurs tubulaires : 5m,15 de long; 1m de diamètre, contenant chacun 39 tubes de 0m,08 de diamètre. — Bouilleur inférieur fermé à l'avant par un tampon en fonte. — Construite en 1877. — Dernière épreuve décennale 1er septembre 1885. — Timbre 5k.	bouilleur inférieur, suivant la ligne de rivure, une fissure ancienne suivant laquelle il s'est rompu, la ligne de rupture suivant ainsi presque rigoureusement celle des rivets, sauf cinq rivets qui ont arraché un morceau de tôle. — Le tampon a été projeté. — Explosion aggravée parceque le générateur faisait partie d'un groupe de 6 chaudières non munies de clapets de retenue de vapeur, et que la chaufferie, en forme d'enfer, ne présentait que des dégagements difficiles.	quatrième blessé.	formant tête de bouilleur, portant des trous de rivets venus de fonte, et la rivure étant défectueuse.
21 déc.	Petit atelier de grosse forge, à St-Julien-en-Jarret (Loire).	Chaudière composée uniquement d'un corps cylindrique horizontal, fermé à l'arrière par un fond embouti. — Longueur 7m,40. — Diamètre 1m,30. — Chauffage par les flammes perdues d'un four à réchauffer l'acier, situé latéralement, les flammes arrivant tangentiellement à la partie inférieure du corps cylindrique et perpendiculairement à l'axe de l'appareil. — Construite en 1880. — Non déclarée. — Timbre 6k.	Le fond embouti arrière a cédé, arrachant sur un tiers de circonférence la tôle de la virole arrière, et sur les deux autres tiers celle du fond lui-même. Corps cylindrique projeté en avant à 40m, détruisant les fourneaux et la cheminée, brisant 3 grues, traversant 2 murs et venant se dresser contre la façade d'une maison d'habitation, où il a fait une brèche de 16m de hauteur sur 4m,20 de large. Fond arrière projeté à 7m en sens inverse.	Deux ouvriers tués; dix blessés, dont plusieurs grièvement. — Dégâts matériels considérables; toiture des ateliers emportée, etc.	Explosion due probablement : 1° à un excès de pression; 2° à un état de fatigue des tôles, en partie surchauffées à la suite d'une disposition défectueuse des carneaux de retour de flamme par rapport au niveau moyen des tubes indicateurs; 3° à la qualité médiocre des tôles, et notamment de celle du fond embouti arrière, très surbaissé, qui nécessitait une tôle de bonne qualité.
31 déc.	Imprimerie, à Paris.	Générateur Belleville. — C'est celui auquel était arrivé l'accident du 9 avril (voir plus haut), accident d'ailleurs tout à fait analogue à celui du 31 décembre.	Le 1er tube du 3e élément s'est déchiré à la soudure, celle-ci étant tournée vers la grille, en divers points rapprochés les uns des autres et occupant une longueur de 0m,18 à 0m,20 vers le milieu du tube. Les 2 tubes placés au-dessus dans le même plan vertical étaient arqués avec 25 à 30mm de flèche.	Aucune conséquence sérieuse.	Manque d'eau.

RÉSUMÉ

RÉPARTITION DES ACCIDENTS

	NOMBRE	TUÉS	BLESSÉS (*)
I. — Par nature d'établissements :			
Atelier de chaudronnerie	1	»	»
— de grosse forge	1	2	5
Ateliers d'imprimerie	2	»	»
Bateaux	4	1	3
Battages	2	»	»
Bonneterie	1	»	2
Brasserie	1	»	»
Cartonnerie	1	»	»
Chemins de fer	2	2	»
Distilleries	3	3	1
Elévation d'eau	1	»	»
Fabriques de caoutchouc	1	»	»
— de pâte à papier	1	»	»
— de produits chimiques	1	»	»
Féculeries	2	»	»
Filatures	5	5	3
Mines	2	»	1
Papeterie	1	»	1
Savonnerie	1	»	»
Scierie	1	»	»
Sucrerie	1	3	1
Teinturerie	1	1	»
Totaux	36	17	17
II. — Par espèces d'appareils :			
1° *Chaudières sans foyer intérieur :*			
Horizontales non tubulaires, avec ou sans bouilleurs	10	6	9
Horizontales plus ou moins tubulaires, avec ou sans bouilleurs	3	4	»
Verticales	1	1	1
2° *Chaudières avec foyer intérieur :*			
Horizontales non tubulaires	»	»	»
Horizontales plus ou moins tubulaires	5	2	1
Verticales	1	»	»
3° *Récipients*	11	3	4
4° *Divers*	5	1	2
Totaux	36	17	17

III. — D'après les causes présumées (**) :

1° *Conditions défectueuses d'établissement :*	
Construction, disposition, installation ou matières défectueuses	13
2° *Conditions défectueuses d'entretien :*	
Usure. — Fatigue ou amincissement du métal	7
Réparations (pour d'autres causes) non faites ou défectueuses	5
3° *Mauvais emploi des appareils :*	
Manque d'eau (suivi ou non d'alimentation intempestive)	7
Excès de pression	3
Autres imprudences ou négligences	10
4° *Causes restées inconnues*	1

(*) On a inscrit dans cette colonne, non pas uniquement les personnes qui ont reçu des blessures graves, mais tous les blessés qui ont eu plus de 20 jours d'incapacité de travail.

(**) Le nombre total des causes présumées est supérieur à celui des accidents, parce que le même accident a quelquefois été attribué à plusieurs causes réunies.

NOTE

SUR LE TRAITEMENT INDUSTRIEL

DES SELS DE STASSFURT

Par M. L. JANET, ingénieur des mines.

Le gisement salin de Stassfurt a déjà été l'objet d'un mémoire de M. Fuchs, ingénieur en chef des mines, inséré dans les *Annales des Mines* de 1865 (6e série, t. VIII), qui décrit d'une manière complète la géologie, l'exploitation, les industries chimiques qui s'y rattachent, l'utilisation des sels de potasse pour l'agriculture, etc.

Depuis cette époque, il n'est survenu que bien peu de changements dans l'exploitation : si l'on excepte la découverte de quelques substances nouvelles comme la kainite, il n'y aurait rien de plus à dire à ce sujet.

Il n'en est pas de même pour l'industrie des sels de Stassfurt : les progrès de la science ont permis d'utiliser un grand nombre de produits qui étaient autrefois rejetés. On obtient maintenant, non seulement des sels de potasse et de soude, mais encore des quantités importantes de sels de magnésie, de brôme et d'acide borique.

La plupart des renseignements qui suivent ont été recueillis sur place ; néanmoins, nous avons emprunté certains détails, surtout les résultats des analyses, à divers ouvrages allemands traitant du même sujet, notam-

ment à ceux de MM. G. Krause (*), Émile Pfeiffer (**) et Frecht (***).

Nous ne ferons que rappeler succinctement la nature des divers produits fournis par l'exploitation des mines de manière à arriver, aussi vite que possible, à l'objet principal de cette note, qui est le traitement industriel de ces substances.

I. — PRINCIPAUX PRODUITS FOURNIS PAR L'EXPLOITATION DES MINES.

Le gisement de Stassfurt a été reconnu sur une puissance de 500 mètres, et rien ne fait encore prévoir l'approche du mur. D'après la composition chimique, on peut distinguer quatre parties.

La plus profonde comprend une couche de sel gemme, avec des alternances d'anhydrite, sur une épaisseur de 330 mètres. Au-dessus, le sel gemme, sur une épaisseur de 60 mètres, devient plus impur ; il renferme des composés déliquescents. Dans la troisième zone, d'une épaisseur de 60 mètres également, les combinaisons sulfatées abondent. Enfin, la partie supérieure du gîte est formée par une couche de 40 mètres, renfermant des chlorures de sodium, de potassium et de magnésium.

C'est cette dernière zone qui est de beaucoup la plus importante au point de vue industriel, et presque toute l'exploitation de la mine y est concentrée ; cependant on extrait aussi une notable quantité de sel gemme de la partie inférieure du gîte. La deuxième zone, caractérisée

(*) *Die Industrie von Stassfurt und Leepoldshall*, von Dr G. Krause.

(**) *Handbuch der Kali-Industrie*, von Dr E. Pfeiffer.

(***) *Die Salz-Industrie von Stassfurt und Umgegend*, von Dr Frecht.

par la présence de la polyhalite, sulfate triple de potasse de chaux et de magnésie, et la troisième, par celle de la kiesérite, sulfate de magnésie hydraté, ne sont l'objet d'aucune exploitation régulière.

Les principaux produits industriels fournis par l'exploitation des mines sont :

1° Le *sel gemme*, — qui provient des assises les plus profondes de la mine. C'est là qu'il est le plus pur. Il renferme 94 à 95 p. 100 de chlorure de sodium, le complément étant fourni par de petites quantités de sels de potasse, de chaux et de magnésie.

Les produits sont broyés et simplement classés d'après leur degré de grosseur ; on a complètement renoncé au raffinage du sel gemme par dissolution et évaporation, à cause de la dépense qu'entraînait cette méthode.

Pendant quelque temps, on a essayé d'enlever l'anhydrite en soumettant le sel brut à l'action d'un courant d'air ascendant : l'anhydrite plus dense tombait, tandis que le sel était entraîné ; mais la séparation ainsi obtenue n'était jamais parfaite, et on a abandonné ce procédé comme ne donnant pas un résultat en rapport avec le travail et la dépense qu'il nécessitait.

La plus grande partie du sel gemme est vendue pour des usages industriels ; on l'utilise aussi pour l'alimentation des bestiaux, comme engrais dans l'agriculture, et enfin comme sel de cuisine. Cette dernière variété est seule soumise à l'impôt ; aussi doit-on dénaturer le sel destiné à l'industrie ou à l'agriculture, de manière à le rendre impropre aux usages domestiques.

2° *La carnallite ou kalisalz.* — La carnallite pure est un chlorure double hydraté de potassium et de magnésium ($KCl + 2MgCl + 12HO$) ; c'est cette substance qui a fait la célébrité des mines de Stassfurt et donné naissance à l'industrie des sels de potasse.

Le produit fourni par les mines est très impur ; on sé-

pare par un simple klaubage le kalisalz du sel gemme en excès. Il a en moyenne la composition suivante :

Carnallite	55 à 60
Chlorure de sodium	20 à 25
Kiesérite	15 à 20
Stassfurtite	1 à 3

Presque tout le kalisalz disponible est traité dans les fabriques des environs de Stassfurt; une petite partie est employée comme amendement, associée à d'autres composés analogues.

3° *La kainite*, — combinaison bizarre d'un chlorure avec un sulfate. On a essayé de représenter sa composition par l'une des deux formules :

$$KCl + 2MgO, SO^3 + 6HO,$$
$$KO, SO^3 + MgO, SO^3 + MgCl + 6HO.$$

Le premier groupement est le plus généralement admis; mais, au contact de l'air humide, la kainite donne du chlorure de magnésium et un sulfate double de potasse et de magnésie.

La kainite est très activement exploitée; on a vainement essayé d'en extraire du sulfate de potasse, en se basant sur les différences de solubilité des divers éléments qui la constituent. Aujourd'hui, elle est surtout employée, soit pure, soit mélangée à d'autres sels, comme amendement dans l'agriculture.

4° *La kiesérite*, — sulfate de magnésie hydraté; elle est livrée par les mines à l'état de mélange avec le kalisalz. Parfois, lorsqu'elle fait l'objet d'une commande spéciale, on la sépare grossièrement par klaubage des autres sels. On a essayé d'utiliser l'acide sulfurique qu'elle renfermait pour préparer le sulfate de potasse. On la fait entrer aussi dans les engrais où l'on désire avoir une notable quantité de magnésie.

5° *La stassfurtite*, — combinaison de borate de magnésie

et de chlorure de magnésium; on la sépare par un simple triage de la carnallite, de la kiesérite et du sel gemme, avec lesquels elle est mélangée.

II. — TRAITEMENT INDUSTRIEL.

Il existe aujourd'hui, dans la région de Stassfurt, plus de trente fabriques de produits chimiques occupant environ 3.500 ouvriers. Les méthodes employées sont assez analogues pour qu'il soit possible de donner un résumé d'ensemble.

Nous examinerons successivement la préparation des divers produits industriels livrés par ces usines au commerce.

Chlorure de potassium.

Le problème à résoudre consiste à séparer le chlorure de potassium des autres sels avec lesquels il est mélangé dans le kalisalz. On utilise pour cela la solubilité variable des divers sels et la cristallisation.

Tout d'abord, on peut observer que la carnallite est notablement plus soluble que la kiesérite et le sel gemme, surtout lorsqu'on opère à chaud; dès lors, en se servant d'une quantité limitée d'eau, on ne dissout guère que la première de ces substances. La solution, pendant le refroidissement, laisse déposer, d'abord du chlorure de potassium, puis du chlorure de sodium et de magnésium. Le premier sel est de beaucoup le plus abondant, et peut être facilement séparé des deux autres.

Les premières eaux mères sont traitées par évaporation, et laissent déposer du chlorure de sodium, du chlorure de magnésium et du sulfate de chaux. Par refroidissement, on obtient ensuite du chlorure de potassium, ou,

lorsque la proportion de chlorure de magnésium est considérable, de la carnallite artificielle, qui est ensuite traitée par le même principe. Les secondes eaux mères renferment 1 à 2 p. 100 de chlorure de potassium, avec de très grandes quantités de chlorure de magnésium et de chlorure de sodium.

Cette méthode est appliquée d'une manière générale, sauf quelques changements insignifiants, dans les fabriques des environs de Stassfurt.

Les résidus restés insolubles, lors du premier traitement, par une petite quantité d'eau, et composés principalement de kiesérite et de sel gemme, servent pour la fabrication du sulfate de soude, du sulfate de magnésie et de la kiesérite artificielle. Autrefois on les a utilisés pour l'extraction de l'acide borique.

Le chlorure de potassium de première précipitation, grossièrement purifié, est livré directement au commerce, avec une richesse de 80 à 85 p. 100.

Les divers sels se déposant pendant l'évaporation des premières eaux mères servent comme amendements dans l'agriculture.

Le chlorure de potassium séparé pendant le second refroissement ou obtenu par le traitement de la carnallite artificielle est plus pur; il est souvent riche à 90 p. 100.

Les secondes eaux mères sont utilisées en grande partie pour la préparation du chlorure de magnésium ou du brome.

Des 16 p. 100 de chlorure de potassium contenus dans le kalisalz brut, on ne retire que 10 à 11 p. 100, soit environ les deux tiers; le reste passe dans les déchets ou dans les produits accessoires. Ainsi, notamment :

Les premiers résidus non dissous renferment 2 p. 100 de chlorure de potassium.

Les sels se déposant pendant l'opération, également 2 à 3 p. 100.

Les secondes eaux mères, 1 à 2 p. 100.

On ne peut pas d'ailleurs établir de règle générale à ce sujet; en moyenne, il faut 800 kilogrammes de kalisalz pour obtenir 100 kilogrammes de chlorure de potassium commercial.

Examinons maintenant le détail des opérations :

Dissolution du kalisalz. — Les sels bruts sortant du puits sont immédiatement amenés par des wagons en face des cuves où s'opère la dissolution. Ils contiennent souvent des blocs de sels étrangers, notamment de kiesérite, ne renfermant presque pas de carnallite. Cependant le triage ne peut être poussé bien loin à cause du peu de valeur de la matière.

Les gros morceaux de sel sont d'abord concassés; ce travail se faisait autrefois à la main, au moyen de marteaux. Les nouvelles usines emploient le concasseur Black. Il doit être fréquemment nettoyé, car les sels, par suite de leur déliquescence, s'agglomèrent facilement et interrompent la marche régulière.

Le produit concassé est ensuite chargé à la pelle ou au moyen d'un élévateur. Les caisses les plus employées aujourd'hui sont cylindriques, avec une hauteur de 3 à 4 mètres, et un diamètre de $1^m,50$ à 2 mètres; elles peuvent recevoir de 30 à 60 mètres cubes de dissolution et 3.000 à 5.000 kilogrammes de sel. Elles sont en tôle avec un revêtement de bois destiné à diminuer les pertes de chaleur par rayonnement. Elles offrent, à une distance de 10 à 20 centimètres de leur partie inférieure, un fond mobile, sur lequel reposent les sels à traiter et qui est percé de trous de 1 centimètre de diamètre, éloignés les uns des autres de 2 à 3 centimètres.

L'échauffement du liquide se fait par un tuyau amenant de la vapeur d'eau. Ce système a remplacé avec avantage l'action directe du feu, qui nécessitait un bras-

sage continu du mélange, si l'on voulait empêcher les sels d'adhérer aux parois.

Autrefois on prenait de l'eau pour opérer la dissolution; mais on a observé qu'en ce cas, le chlorure de potassium de première cristallisation renfermait au moins 50 p. 100 de chlorure de sodium, et que, par des cristallisations répétées, on ne pouvait élever sa teneur à plus de 70 p. 100. On eut alors l'idée de prendre des liqueurs riches en chlorure de magnésium, qui dissolvent facilement le chlorure de potassium, tandis que le chlorure de sodium y est très peu soluble.

On prend donc le kalisalz concassé en fragments de la grosseur du poing, quelquefois même broyé, ce qui assure un meilleur rendement en chlorure de potassium, mais introduit une plus forte proportion de sels étrangers; on traite 100 kilogrammes de ce kalisalz par 1 mètre cube de lessive, formée de deux parties d'eaux mères du traitement pour une partie d'eau; la dissolution remplit au plus la moitié de la cuve précédemment décrite. Lorsque la température atteint 100 degrés, on agite à plusieurs reprises le mélange avec une spatule en bois. On arrête le courant de vapeur, et on laisse la liqueur en repos pendant une durée d'une demi-heure à une heure, jusqu'à ce qu'elle soit à peu près claire; elle marque alors 32 à 33° Baumé.

On la fait ensuite écouler dans des caisses rectangulaires de clarification, où les parties en suspension achèvent de se déposer; de là, elle passe dans les bassins de cristallisation.

Le résidu de l'opération est principalement formé de sel gemme, de kiesérite, de stassfurtite, d'anhydrite, d'argile avec quelque peu de carnallite.

On le traite une dernière fois par une très petite quantité d'eau, de manière à en extraire encore un peu de chlorure de potassium. La liqueur que l'on obtient ainsi

ne peut être traitée seule, car elle renferme plus de chlorure de sodium que de chlorure de potassium, mais on la mélange aux eaux mères servant à la dissolution de la carnallite.

Le résidu insoluble atteint une proportion de 30 à 50 p. 100 du poids de sel traité.

Voici les analyses qui se rapportent à cette opération :

Dissolution, 11° centigr., 32 à 33° Baumé.

Chlorure de potassium.	11,50	12,07
Chlorure de sodium	4,92	2,59
Chlorure de magnésium.	20,01	21.05
Sulfate de magnésie	2,44	2,45
Eau	61,13	61,84

Résidus non dissous après un seul traitement.

Chlorure de potassium.	5,08	6,86
Chlorure de sodium.	50,07	45,80
Chlorure de magnésium.	2,59	3,50
Sulfate de magnésie.	29,65	29,46
Partie insoluble.	8,50	8,51
Eau	4,00	5,87

Après le second traitement, ces résidus ne contiennent plus guère que 2 à 3 p. 100 de chlorure de potassium. On les rejetait autrefois, de sorte qu'on était arrivé à en couvrir d'immenses espaces de terrain autour des fabriques : aujourd'hui on en utilise une partie, comme nous le verrons bientôt, pour la production de la kiesérite artificielle et du sulfate de soude.

Cristallisation et purification du premier chlorure de potassium. — Les dissolutions sont abandonnées à elles-mêmes pendant deux ou trois jours dans les caisses de cristallisation jusqu'à ce que leur température s'abaisse à 20 ou 25 degrés.

Les caisses de cristallisation sont en fer forgé, de

forme rectangulaire; la longueur est de 2 à 3 mètres, la largeur de 1 mètre à 1^{m},50 et la profondeur de 0^{m},50 à 2 mètres.

Les caisses peu profondes offrent l'avantage de donner lieu à un refroidissement plus rapide, de sorte que le chlorure de potassium se sépare plus vite; mais, par contre, il est en plus petits cristaux. En outre, le sel qui se dépose au fond est plus impur que celui qui se dépose sur les parois; le premier renferme de 50 à 60 p. 100 de chlorure de potassium, le second de 60 à 70 p. 100. On préfère donc souvent prendre des cuves profondes, bien qu'on soit forcé, pour une même production, d'en avoir un nombre un peu plus grand.

Après la formation des cristaux, les eaux mères sont soutirées et conduites dans de grands bassins où on les recueille pour les traiter par évaporation. Les cristaux de chlorure de potassium sont enlevés et disposés en tas; on les laisse égoutter, puis on les conduit dans de petits wagonnets aux cuves de purification.

Analyse de la première eau mère (20° *à* 25° *centigr.*, 31° *à* 32° *Baumé*).

Chlorure de potassium	6,42	5,86	4,09
Chlorure de sodium	2,06	2,87	1,74
Chlorure de magnésium	19,98	20,95	20,49
Sulfate de magnésie	3,10	2,80	2,98
Eau	68,44	67,52	70,70

Analyse des premiers cristaux de chlorure de potassium.

Chlorure de potassium	57,86	56,13	54,46
Chlorure de sodium	24,75	25,42	20,64
Chlorure de magnésium	5,44	6,34	6,70
Sulfate de magnésie	1,34	1,48	1,92
Eau	10,01	10,63	16,28

Lorsqu'on laisse séjourner longtemps les premières eaux mères dans les réservoirs, il se produit souvent des

cristaux dont la teneur en chlorure de potassium atteint environ 40 p. 100. Voici leur composition :

Chlorure de potassium	40,20	39,19
Chlorure de sodium	39,16	38,14
Chlorure de magnésium	5,46	4,34
Sulfate de magnésie	4,12	3,86
Partie insoluble	1,34	4,73
Eau	9,72	9,74

Ces cristaux sont employés tels quels comme amendement pour l'agriculture.

Le chlorure de potassium brut ne peut être purifié par cristallisation; cette opération donnerait lieu à des frais trop grands, en même temps qu'à des pertes considérables.

Pour éliminer une partie des impuretés, on les traite par une solution saturée de chlorure de potassium, qui possède la propriété de dissoudre la plupart des substances étrangères.

Le sel est placé dans des caisses cubiques ou des cuves cylindriques de 2 mètres de diamètre et de 2 mètres de profondeur. On verse sur lui la solution en question, de manière à le couvrir d'une hauteur de liquide d'environ 8 centimètres. Au bout d'une à deux heures on fait écouler la liqueur.

Après un traitement de cette nature, la teneur en chlorure de potassium atteint 75 à 80 p. 100; quelquefois on procède à une seconde opération analogue qui donne une richesse de 85 à 90 p. 100.

Souvent aujourd'hui, au lieu d'une solution saturée de chlorure de potassium, on préfère employer simplement de l'eau pure qui dissout le chlorure de sodium, le chlorure de magnésium, le sulfate de magnésie. Une partie du chlorure de potassium se dissout également, mais en faible quantité, parce que le chlorure de potas-

sium est peu soluble dans l'eau froide et que la dissolution des impuretés détermine un abaissement de température favorable.

Voici les résultats de ce dernier travail (emploi de l'eau pure) :

Analyse du chlorure de potassium.

	Brut.	Après une seule purification.	Après deux purifications.
Chlorure de potassium	67,54	75,65	88,31
Chlorure de sodium	25,27	22,18	10,92
Chlorure de magnésium	5,50	1,32	0,04
Sulfate de magnésie	1,69	0,84	0,72

Les liqueurs repassent dans le travail et servent à la dissolution du kalisalz. Voici leur composition :

	Liqueur de première purification.	Liqueur de deuxième purification.
Chlorure de potassium	7,59	8,90
Chlorure de sodium	9,07	13,10
Chlorure de magnésium	11,28	5,62
Sulfate de magnésie	1,85	1,10
Eau	70,21	71,26

Évaporation des premières eaux mères. — Les eaux mères sont traitées dans des bassines en fer dont la forme varie beaucoup avec les diverses usines. Tantôt on leur donne une section en W de manière à augmenter la surface de chauffe ; tantôt on les fait traverser par des tuyaux où circulent les gaz chauds. Nous représentons ici en coupe transversale trois des dispositions qu'on rencontre le plus souvent (Pl. XI, *fig.* 5, 6 et 7).

Les dimensions des appareils sont 8 à 9 mètres en longueur, 2 mètres à 2^m,50 en largeur, 1^m,80 à 2 mètres en hauteur. (Voir *fig.* 8 et 9.)

Les bassines sont directement chauffées par les gaz de

la combustion ; la planche ci-contre donne le plan et la coupe longitudinale de l'un de ces appareils.

Les eaux mères sont concentrées jusqu'à 35° Baumé. A mesure que la liqueur s'évapore, on ajoute de l'eau mère de manière à maintenir les bassines pleines. Bientôt il se produit un dépôt composé de chlorure de sodium et de sulfate de magnésie.

Lorsqu'on est arrivé au degré de concentration voulu, on fait couler la liqueur dans des cuves de cristallisation.

Il reste dans les bassines un résidu partiellement adhérent aux parois, s'élevant à 5 ou 10 p. 100 du poids de l'eau mère évaporée ; voici quelques analyses de ce produit :

Sulfate de potasse	13,69	14,19
Sulfate de magnésie	9,08	9,58
Chlorure de sodium	49,05	49,05
Chlorure de magnésium	12,94	12,91
Partie insoluble	4,15	4,18
Eau	11,09	10,09

Ce sel impur auquel on donne le nom de *bühnensalz* est séché et calciné ; sa principale application est d'entrer, pour une importante proportion, dans les amendements agricoles artificiels qu'on fabrique aujourd'hui avec les sels de Stassfurt.

On a essayé aussi de le traiter par dissolution et évaporation, en vue de sulfate de potasse et de chlorure de sodium. On n'a jamais pu réussir.

Cristallisation de carnallite artificielle et production du deuxième chlorure de potassium. — La dissolution est abandonnée pendant trois jours dans les cuves de cristallisation. Par suite de sa teneur élevée en chlorure de magnésium, elle laisse déposer des cristaux de carnallite artificielle auxquels les ouvriers donnent le nom de *doppelsalz*.

Composition des premières eaux mères après évaporation (110° centigr., 35° Baumé).

Chlorure de potassium	8,34
Chlorure de sodium	8,85
Chlorure de magnésium	30,71
Sulfate de magnésie	2,11
Eau	49,99

La carnallite artificielle a la même formule chimique que la carnallite naturelle ($KCl + MgCl + 12HO$), mais elle entraîne avec elle une notable quantité de sels contenus dans la liqueur ainsi que le montrent les analyses suivantes :

Chlorure de potassium	19,13	20,15	15,78
Chlorure de magnésium	28,80	27,35	28,17
Chlorure de sodium	6,34	12,34	9,34
Sulfate de magnésie	1,47	3,11	2,99
Eau	44,26	37,05	43,72

Après la cristallisation, il ne reste dans la liqueur qu'environ 1,5 p. 100 de chlorure de potassium. Voici sa composition :

Chlorure de potassium	1,34	1,29	2,17
Chlorure de sodium	0,56	0,17	0,54
Chlorure de magnésium	27,20	28,09	26,97
Sulfate de magnésie	2,61	2,14	1,95
Eau	68,69	68,31	68,37

Ces deux dernières eaux mères, qui marquent à peu près 33° Baumé, sont envoyées dans des bassins de clarification où elles laissent déposer la carnallite mécaniquement entraînée.

La carnallite artificielle n'a par elle-même aucune application; elle est aussitôt redissoute et traitée pour deuxième chlorure de potassium.

La caisse de dissolution est semblable à celles que nous avons décrites précédemment. Le chauffage s'effectue à la vapeur d'eau.

La carnallite est traitée par une liqueur formée de trois parties d'eau et d'une partie de deuxième eau mère. La dissolution est complète au bout d'une heure. Bientôt on fait passer le tout dans des cuves de cristallisation et on l'y abandonne pendant trois ou quatre jours; il se dépose par refroidissement des cristaux de deuxième chlorure de potassium.

Ce chlorure de potassium est purifié séparément ou mélangé avec les premiers cristaux.

Voici quelques analyses à ce sujet :

Dissolution de carnallite artificielle.

Chlorure de potassium	13,21	12,32
Chlorure de sodium	1,32	1,64
Chlorure de magnésium	19,64	20,45
Sulfate de magnésie	0,94	0,87
Eau	64,89	64,72

Deuxièmes cristaux bruts de chlorure de potassium.

Chlorure de potassium	68,11	66,45
Chlorure de sodium	14,98	12,14
Chlorure de magnésium	5,93	6,19
Sulfate de magnésie	0,31	0,49
Eau	10,67	14,73

Cristaux purifiés.

	Une seule fois.	Deux fois.
Chlorure de potassium	87,65	92,12
Chlorure de sodium	1,09	0,02
Chlorure de magnésium	0,90	0,02
Sulfate de magnésie	0,12	0,11
Eau	10,24	7,73

Séchage ou calcination du chlorure de potassium. — Le chlorure de potassium est, soit séché à l'air, soit calciné.

Le séchage ne s'effectue que pour une quantité relativement faible de chlorure de potassium. Le sel est placé dans des hangars, sur des aires planes entourées de

planches où on le laisse égoutter pendant trois ou quatre jours. Quelquefois on détermine le départ de l'eau par l'action de la force centrifuge. Ce dernier procédé a l'inconvénient de ne produire qu'une dessiccation imparfaite, tout en exigeant une grande force motrice.

Beaucoup de fabricants de salpêtre préfèrent le chlorure de potassium séché à l'air au sel calciné, parce qu'il est plus facilement soluble que ce dernier, auquel sont souvent mélangées quelques parties fondues qui ne se dissolvent que lentement dans l'eau.

La calcination a pour but de réduire au minimum la proportion d'eau contenue dans le chlorure de potassium. Elle se fait sur la sole d'un four à réverbère, assez analogue à ceux qu'on rencontre dans la fabrication de la soude artificielle, mais la température que l'on cherche à obtenir est notablement moins élevée (Pl. XI, *fig.* 10 et 11).

Les portes de travail sont au nombre de trois.

Le chlorure de potassium est chargé à la pelle et étendu au moyen d'un râteau. Pour une charge de 350 kilogrammes, l'épaisseur de la couche est de 25 à 30 centimètres.

On ferme pour quelques minutes les ouvertures, puis, quand le sel a pris la température du four, on remue activement la masse avec des râteaux. Sans cete précaution les parties voisines de la surface entreraient en fusion, pendant que celles qui reposent sur la sole resteraient encore humides.

Pour éviter que le sel soit sali par de la suie provenant du foyer, on emploie généralement de la houille de bonne qualité, et non du lignite de Stassfurt, comme lorsqu'il s'agit de chauffer les bassines d'évaporation.

La durée d'une opération est d'environ une heure. La charge est ensuite jetée sur un crible dont les trous ont 8 à 10 millimètres de diamètre. Les morceaux qui restent sur le tamis sont broyés par un pilon.

Voici quelques analyses du produit commercial :

Chlorure de potassium.	86,41	92,43	98,41
Chlorure de sodium	12,05	4,76	0,25
Chlorure de magnésium.	0,40	0,18	0,05
Sulfate de magnésie	0,21	0,40	0,10
Eau	0,93	2,23	1,19

Le chlorure de potassium est ensuite mis en sacs d'une contenance de 90 kilogrammes et livré au commerce à un prix qui oscille autour de 17 francs les 100 kilogrammes.

Application des sels de potasse à l'agriculture. — L'action bienfaisante que les sels de potasse exercent sur certaines cultures a donné l'idée de préparer des amendements artificiels avec les sels de Stassfurt.

Tout d'abord on essaya d'utiliser la carnallite elle-même, mais, comme on pouvait s'y attendre, la présence du chlorure de magnésium rendit son emploi plutôt nuisible que bienfaisant, et l'expérience d'une seule année suffit pour y faire complètement renoncer.

Il fallut donc avoir recours aux produits des usines ; il est d'ailleurs complètement inutile de prendre du chlorure de potassium ou du sulfate de potasse purs. On préfère utiliser des déchets de fabrication presque sans valeur, notamment les dépôts qui se produisent pendant l'évaporation des eaux mères.

La préparation de ces amendements artificiels (Düngesalz) est très simple. On part de mélanges impurs de sulfates et de chlorures fournis par les usines, ou de composés spéciaux livrés par les mines, comme la kainite. On en place une couche de 30 à 50 centimètres sur la sole d'un four à réverbère analogue à celui qui sert pour la calcination du chlorure de potassium, et on brasse énergiquement le mélange pour empêcher la partie supérieure de fondre.

Le but de cette calcination est de chasser l'eau et de

détruire une notable quantité de chlorure de magnésium. Pour un sel à 29 p. 100, la teneur s'abaisse à 22.

Au bout de deux à quatre heures, on extrait la charge par la porte de travail.

Un four dont la sole a 6 mètres de long avec une largeur de $3^m,50$, peut calciner 10 tonnes de sel par jour.

Le produit final est broyé par des meules et mis en sacs d'une contenance de 100 à 150 kilogrammes. Il est exporté sous cette forme dans le monde entier.

Kiésérite artificielle.

Depuis longtemps on a cherché à extraire la kiesérite contenue (à la proportion de 20 à 30 p. 100) dans le premier résidu provenant du traitement du kalisalz par une quantité limitée d'eau. Ce problème fut résolu, en 1864, par le docteur Grüneberg ; il remarqua que, mise en contact avec l'eau chaude, dans laquelle elle est très difficilement soluble, la kiesérite tombe en une fine poussière, tandis que les autres composés avec lesquels elle est mélangée dans les résidus se dissolvent. La matière fut donc traitée sur des cribles par un courant d'eau qui dissolvait les chlorures de potassium, de sodium, de calcium, la carnallite, etc., tandis que la kiesérite se délitait en restant insoluble, traversait les mailles du crible et tombait dans des caisses où on la laissait se déposer. Bientôt elle donnait une masse compacte, tandis qu'une autre partie du sulfate de magnésie s'emparait de sept équivalents d'eau en donnant de l'epsomite ou bittersalz.

D'autres expériences furent faites par les docteurs Lindemann, Muller et Leisler. Les appareils ont subi depuis quelques modifications de détail, et voici comment on procède aujourd'hui :

Les résidus encore chauds sont traités immédiatement

afin d'éviter qu'au contact de l'air, la kiesérite s'hydrate et donne de l'epsomite facilement soluble. Voici leur composition :

Sulfate de magnésie	26,79
Chlorure de potassium	2,14
Chlorure de sodium	34,25
Chlorure de magnésium	9,86
Sulfate de chaux	8,46
Partie insoluble	10,25
Eau	8,25

Les résidus sont placés dans des trémies dont le fond est formé par une grille. Chaque trémie A est placée au-dessus d'un tamis B placé lui-même au-dessus d'une rigole inclinée C (Pl. XI, *fig.* 12). Une pomme d'arrosoir *d* lance de l'eau sur les matières contenues dans la caisse. Bientôt il ne reste plus sur la grille que 0,2 à 0,3 p. 100 de la charge primitive, le résidu étant constitué exclusivement par des blocs de sel gemme trop gros pour pouvoir passer entre les barreaux.

Le tamis B offre des trous d'environ 1 millimètre de diamètre. Il retient de petits cristaux d'anhydrite, de stassfurtite, de sel gemme et très peu de kiesérite.

La majeure partie de celle-ci traverse le tamis, avec la solution renfermant des chlorures de potassium, de sodium, de magnésium, un peu de sulfate de chaux et de sulfate de magnésie. Tout cela tombe en même temps dans un réservoir en fer, ou dans une fosse rectangulaire maçonnée et cimentée. La kiesérite, qui possède un fort poids spécifique, se dépose presque aussitôt au fond, tandis que la solution et les corps légers qui restent en suspension sont aussitôt entraînés par le jeu d'un siphon partant de la partie supérieure.

Le sel gemme qui reste dans la caisse supérieure est séché et broyé ; il sert pour l'alimentation des bestiaux. L'anhydrite et les autres corps arrêtés par le tamis

(0,1 p. 100 environ du poids traité) ne sont pas utilisables.

La dissolution finale ne l'est pas non plus.

La bouillie de kiesérite est enlevée à la pelle, étendue sur des aires pavées entourées de petits murs, homogénéisée par agitation et moulée aussitôt. Les moules sont ou cylindriques ou rectangulaires; ils sont évasés vers le haut. Après une dessiccation qui n'exige que quelques heures, la kiesérite se prend en une masse compacte.

Chaque bloc de kiesérite artificielle (kieseritstein) pèse ordinairement 25 à 28 kilogrammes. Le moulage a pour but de donner à ce produit, qui se vend très bon marché, une forme commode pour les transports tout en supprimant les frais d'emballage.

Voici la composition ordinaire de la kiesérite artificielle :

Sulfate de magnésie	59,90	59,40	56,64
Sulfate de chaux	8,89	2,48	5,93
Chlorure de sodium	2,17	1,37	1,99
Partie insoluble.	12,71	10,43	8,51
Eau	16,33	26,32	24,93

La partie insoluble est constituée principalement par de l'argile, de la stassfurtite et de petits cristaux d'anhydrite.

En hiver, la kiesérite ne durcit pas si bien qu'en été. La prise en une masse compacte résulte d'une combinaison de la kiesérite naturelle $MgOSO^3 + HO$ avec un équivalent d'eau, ce qui donne la formule $MgOSO^3 + 2HO$; il en résulte une notable élévation de température.

La kiesérite doit être bien lavée, car lorsque la teneur en chlorure de sodium atteint 5 p. 100, la prise se fait mal et le produit est très friable.

Le rendement s'élève à peu près aux trois quarts de la kiesérite contenue dans les résidus traités.

Le prix des 100 kilogrammes de kiesérite artificielle

varie de $0^f,50$ à 1 franc. La plupart des fabriques de Stassfurt garantissent une teneur de 55 p. 100 en sulfate de magnésie.

La kiesérite artificielle est exportée sur une vaste échelle, en Angleterre et en Allemagne, où on l'utilise principalement pour la préparation des sulfates de potasse et de magnésie. Pour obtenir ce dernier sel, la kiesérite est le produit de beaucoup le meilleur marché que l'on puisse prendre comme point de départ.

On utilise encore la kiesérite pour la préparation du sulfate de baryte artificiel (blanc fixe) en la faisant agir sur une solution de chlorure de baryum.

Epsomite.

L'epsomite ou bittersalz ($MgO, SO^3 + 7HO$) se prépare au moyen de la kiesérite. On dissout celle-ci et on évapore la solution.

Vers l'année 1865, un grand nombre de fabriques s'occupèrent de cette préparation. L'excès de production fit beaucoup baisser les prix, de sorte que la plupart des établissements ne purent continuer le traitement.

Pour retirer l'epsomite de la kiesérite, on abandonne celle-ci en grands tas, pendant un temps assez long, au contact de l'air, de manière qu'elle absorbe de l'eau et devienne plus facilement soluble. Lorsqu'on veut la traiter immédiatement, il faut débuter par une forte calcination qui augmente la solubilité de la matière.

La dissolution s'opère dans de grandes cuves cylindriques, chauffées par de la vapeur d'eau.

Lorsque la liqueur marque 30 à 31° Baumé, on arrête le courant de vapeur, on laisse reposer jusqu'à clarification complète et on fait passer le liquide dans des cuves de cristallisation où l'on a disposé plusieurs fils tendus par un petit poids en plomb, autour desquels les

cristaux viennent se déposer pendant le refroidissement. Au bout de quinze jours, on soutire l'eau mère et on lave les cristaux avec une très petite quantité d'eau tiède. Les eaux mères et les eaux de lavage servent à la dissolution de nouvelles quantités de kiesérite.

Les cristaux sont ensuite séchés à l'étuve à une température qui ne doit pas dépasser 28 degrés. Sinon ils se détruisent en perdant plusieurs équivalents d'eau. L'epsomite est ensuite placée dans des barriques, qui en contiennent de 50 à 300 kilogrammes.

Le produit, ainsi préparé, est presque chimiquement pur. Il se vend à raison de 12 francs les 100 kilogrammes.

Sulfate de soude.

La réaction mutuelle du sulfate de magnésie et du chlorure de sodium donnant, à une température de 5°, du sulfate de soude et du chlorure de magnésium, fut découverte par Balard et appliquée d'abord aux eaux mères des marais salants et de diverses sources salées. Ce n'est qu'en 1865 que le gouvernement prussien, désireux de voir appliquer cette réaction à Stassfurt, envoya en mission dans le sud de la France MM. Grüneberg et Althaus, afin d'étudier le fonctionnement des machines Carré, que l'on employait alors pour produire l'abaissement de température nécessaire. Leur rapport conclut à l'utilisation exclusive du froid de l'hiver, les machines réfrigérantes artificielles, occasionnant, selon eux, des frais trop grands, eu égard à la faible valeur du produit.

Les matières premières les mieux appropriées à l'extraction du sulfate de soude sont évidemment les résidus insolubles de la dissolution du kalisalz, renfermant de fortes proportions de chlorure de sodium et de sulfate

de magnésie, et que nous avons déjà vu traiter pour kiesérite. Ils sont utilisés à cette fin dans presque toutes les fabriques de produits chimiques de Stassfurt. Malheureusement, le traitement ne peut se faire qu'en hiver.

Le matériel est installé au grand air; il se compose uniquement de caisses de dissolution et de grands bassins de cristallisation. Il vaut mieux se servir de caisses en bois qu'en fer, car la présence de traces de ce métal dans le produit final offre de graves inconvénients pour l'emploi du sulfate de soude dans les verreries.

Les résidus en question sont abandonnés à l'air pendant plusieurs années, de manière à rendre la kiesérite facilement soluble. On les traite dans de grandes caisses, par de l'eau tiède, en agitant constamment, jusqu'à ce que la dissolution ait une température de 30 à 40° et marque environ 30° Baumé.

On laisse reposer quelque temps la partie claire, et on la fait passer au moyen d'un siphon dans des bassins de cristallisation ayant environ 30 mètres de long, 30 mètres de large et $0^m,50$ de profondeur, où on la laisse exposée à l'action du refroidissement.

Au bout de quelques jours, les eaux mères sont séparées du sulfate de soude, qu'on enlève à la pelle et qu'on laisse égoutter pendant quelques heures. Elles ne sont pas utilisées.

La présence du chlorure de magnésium libre gêne, tandis que celle d'un excès de chlorure de sodium favorise la formation du sulfate de soude.

Voici quelques analyses à ce sujet :

Liqueurs obtenues par le traitement des résidus (30° *Baumé.*)

Sulfate de magnésie	7,94	8,51
Chlorure de sodium	17,10	20,15
Chlorure de potassium	1,05	1,20
Chlorure de magnésium	2,01	3,01
Eau	71,90	67,13

Eaux mères après séparation du sulfate de soude (26° Baumé).

Sulfate de magnésie	4,53	5,91
Chlorure de potassium	1,25	1,60
Chlorure de sodium	14,46	11,27
Chlorure de magnésium	6,23	8,67
Eau	73,53	72,55

Sulfate de soude brut.

Sulfate de soude	40,88	41,90
Chlorure de sodium	2,15	1,41
Chlorure de potassium	1,62	1,70
Chlorure de magnésium	0,81	1,76
Sulfate de potasse	0,21	0,44
Partie insoluble	0,26	0,50
Eau	53,97	52,29

Sulfate de soude à l'état de pureté.

Sulfate de soude	44,09
Eau	55,91

Le sulfate de soude brut est, comme on le voit, mélangé à des chlorures de potassium, de sodium et de magnésium, qui ne lui permettraient d'avoir que des applications très limitées. La purification se fait par dissolution et cristallisation. Le sel raffiné ($NaO,SO^3 + 10HO$) renferme encore 0,5 à 1 p. 100 de chlorure. Il se vend de 9 à 10 francs les 100 kilogrammes.

Quelques usines préparent aussi du sulfate de soude exempt d'eau. La calcination se fait dans une bassine en fonte de 2 mètres de long, 1 mètre de large et $0^m,05$ de haut, placée sur la sole d'un four à réverbère. Ce sel calciné offre la composition suivante :

	1re sorte.	2e sorte.
Sulfate de soude	97,00	94,00
Sulfate de chaux	1,10	1,10
Chlorure de sodium	1,60	2,50
Partie insoluble	0,30	2,20
Sesquioxyde de fer	0,04	0,07

Le sulfate de soude est employé tel quel dans les verreries; il sert aussi à la fabrication du carbonate de soude par le procédé Leblanc.

Chlorure de magnésium.

Les dernières eaux mères de la fabrication du chlorure de potassium qui, avec quelques centièmes de sels étrangers, renferment de 27 à 30 p. 100 de chlorure de magnésium, sont partiellement utilisées pour la préparation du chlorure de magnésium.

Les eaux mères sont évaporées dans des bassins jusqu'à ce qu'elles marquent 40° Baumé. On les fait passer dans des cuves de cristallisation en fer ou en pierre. Il reste dans les bassines d'évaporation un composé formé de sulfate de magnésie, de chlorure de sodium et de magnésium. On doit l'enlever aussitôt, car autrement il donne des incrustations très difficiles à détacher.

Au bout de quelques jours, la liqueur refroidie laisse déposer des cristaux de chlorure de magnésium hydraté ($MgCl + 6HO$).

Souvent on pousse la concentration jusqu'à 43 ou 44° Baumé. Par refroidissement, la dissolution versée dans des cuves à fortes parois, se prend en une masse compacte d'aspect analogue à celui d'un gâteau de cire.

Le chlorure de magnésium est ensuite fondu sur la sole d'un four à réverbère.

Nous donnons ici quelques analyses de ces divers produits.

Chlorure de magnésium cristallisé.

Chlorure de magnésium	41,76	42,91	44,99
Chlorure de sodium	9,14	10,51	9,87
Chlorure de potassium	0,75	1,51	0,87
Sulfate de magnésie	0,35	0,21	0,25
Eau	48,00	44,86	44,02

Chlorure de magnésium fondu.

Chlorure de magnésium	47,04

Chlorure de sodium	3,54
Chlorure de potassium	0,75
Sulfate de magnésie	0,40
Eau	48,24

100 kilogrammes de chlorure de magnésium se vendent 3 francs; on paie en sus le vase qui vaut 5 francs et peut contenir de 200 à 270 kilogrammes de ce sel.

Le chlorure de magnésium fondu est vendu en blocs du poids de 100 à 500 kilogrammes.

Les usages de ce corps sont malheureusement encore aujourd'hui, assez restreints. On en emploie de petites quantités dans l'industrie des tissus et dans celle du sucre de betteraves. Il sert à la préparation des chlorures de baryum, de calcium et de manganèse. On le fait entrer dans un grand nombre de produits médicinaux qui sont administrés en bains. On a encore proposé de l'appliquer à l'arrosage des rues, à l'extinction des incendies, etc.

Brome.

Jusqu'à la découverte du brome dans les sels de Stassfurt, la préparation de ce métalloïde ne se fit que sur une très petite échelle. Il n'avait guère d'usage que dans les laboratoires de chimie et de pharmacie. Lorsque la photographie commença à en employer d'assez notables quantités, il fallut rechercher d'autres sources.

Autrefois on retirait le brome des eaux mères des marais salants, en Bretagne et dans le midi de la France, des eaux mères des cendres de varech en Angleterre, et de celles des salines de Kreuznach, en Allemagne. La source la plus importante de brome que l'on connaisse dans le monde entier, est l'eau de la mer Morte, mais elle est restée jusqu'à présent à peu près inutilisée. Au contraire, à Stassfurt, on a pu réaliser cette extraction sur une grande échelle.

C'est le docteur Reichardt qui signala le premier l'existence de traces de brome dans les diverses eaux mères du traitement courant, mais cette observation resta inutilisée jusqu'en 1865. Pendant l'été de cette année, le docteur Frank entreprit l'extraction du brome, et en fabriqua 800 kilogrammes; la progression de la production fût extrêmement rapide, comme le montrent les chiffres suivants :

1865	800 kilogr.
1870	20.000
1876	50.000
1882	170.000
1885	400.000

Voici la méthode du docteur Frank.

Le point de départ est constitué par les deuxièmes eaux mères de la fabrication du chlorure de potassium, qui sont principalement formées de chlorure de magnésium, de sodium, de potassium et de sulfate de magnésie. Elles marquent de 32 à 35 degrés Baumé. Leur teneur en brome varie de 0,10 à 0,55 p. 100.

Les eaux mères sont traitées par un mélange de bioxyde de manganèse et d'acide sulfurique dans une cuve en pierre, consolidée par des cercles en fer et recouverte d'un dôme. L'échauffement est produit par un courant de vapeur d'eau amené par un tuyau de terre qui traverse le dôme. Au bout d'un quart d'heure environ, on voit se développer des vapeurs rouges qui s'échappent de l'appareil par un tube abducteur en plomb, et sont condensées dans un serpentin de terre. A l'extrémité inférieure du serpentin se trouve une allonge de verre qui vient déboucher dans un flacon à trois tubulures contenant de l'eau. La majeure partie du brome se condense sous l'eau.

Les vapeurs non condensées s'échappent par un tuyau de plomb et passent dans une bonbonne remplie de ro-

gnures de fer humectées d'eau, où elles sont complètement absorbées. L'eau de brome et le bromure de fer ainsi obtenus repassent à la distillation.

Les premiers produits de cette distillation sont presque exclusivement formés de brome, les bromures étant plus facilement décomposables que les chlorures, puis on a un mélange ou une combinaison de brome et de chlore, enfin du chlore pur. On interrompt l'opération avant d'avoir recueilli tout le brome contenu; néanmoins le brome est assez riche en chlore; il est en outre souillé par du bromure de plomb et des composés organiques.

Pour le purifier, on le chauffe légèrement, de manière à déterminer le départ du chlorure de brome, puis on le distille dans de grandes cornues en verre. Les premières parties qui passent contiennent du chlore. On les recueille à part, et on n'adapte les récipients définitifs que lorsque le gaz qui se dégage est parfaitement pur. Les vapeurs non condensées sont absorbées par le fer.

Le brome est versé dans des flacons qui en renferment de 2 kilogrammes à $2^{kg},5$; quatre flacons sont placés ensemble dans une caisse en bois. On ne vend pas moins d'une caisse entière à la fois. Pour l'exportation lointaine, on combine le brome au fer, et on évapore à siccité la solution. La masse sèche offre une teneur de 60 à 70 p. 100 en brome.

Lorsqu'on veut l'utiliser, il suffit de traiter par l'eau et de faire passer un courant de chlore qui détermine le dégagement du brome.

Pour éviter les interruptions de travail et diminuer les pertes de brome, on a cherché à modifier un peu ce procédé, de manière à le rendre continu.

Pour cela, on a fait agir du chlore gazeux sur les eaux mères; ce chlore est obtenu dans un appareil distinct, par l'action de l'acide chlorhydrique sur le bioxyde de manganèse. L'eau mère circule dans une série de quatre vases

de grès superposés communiquant entre eux par des tuyaux. Elle arrive par la partie supérieure, parcourt successivement les divers vases, où elle est portée à une température convenable, et soumise à l'action du courant de chlore, et sort de l'appareil complètement privée de brome.

Il existe encore un autre procédé, celui du docteur Leisler, qui a été appliqué pendant quelques années, mais a dû être abandonné à cause de la cherté du réactif qu'il employait. Il consiste à faire agir sur les eaux mères un mélange d'acide sulfurique et de bichromate de potasse. Le brome distille sous l'influence de la chaleur, et se rend dans des flacons où se trouvent des rognures de fer.

Le brome de Stassfurt se distingue par sa pureté presque absolue; comme les sels desquels il est extrait ne renferment aucune trace d'iode, il est complètement exempt de ce métalloïde, qui existe au contraire en quantité appréciable dans le brome des eaux mères des marais salants et des cendres de varech.

Les prix ont beaucoup baissé depuis vingt ans par suite de l'accroissement considérable dans la production. Ils étaient de 60 à 70 francs pour un kilogramme, ils sont tombés aujourd'hui à 3 francs. On prépare à Stassfurt, non seulement le brome, mais encore les bromures de potassium, de sodium, de calcium et de magnésium.

Sulfate de potasse.

De tous les sels de Stassfurt, la kainite paraît, au premier abord, le composé se prêtant le mieux à l'extraction du sulfate de potasse. En effet, ce composé, traité par l'eau ou longtemps exposé au contact de l'air humide, se dédouble en chlorure de magnésium et sulfate double de magnésie et de potasse. Il suffit donc d'isoler le sulfate dans ce sel double.

La principale difficulté provient de ce que la kainite à peu près pure n'est fournie par les mines qu'en très petite quantité. Presque toujours, cette substance est mélangée à de la carnallite, du sel gemme, etc., de sorte que la teneur en sulfate de potasse ne dépasse pas 20 à 25 p. 100. Aussi les essais tentés dans ce sens n'ont-ils pas donné de résultats satisfaisants.

On essaya alors d'utiliser l'acide sulfurique contenu dans la kiesérite. Une dissolution de sulfate de magnésie et de chlorure de potassium portée à l'ébullition fournit la réaction :

$$KCl + 2(MgO, SO^3) = KO, SO^3, MgO, SO^3 + MgCl.$$

Le sulfate double de potasse et de magnésie est ensuite dissous dans une quantité limitée d'eau. La moitié du sulfate de potasse se sépare à l'état cristallin, tandis que l'autre moitié reste dans la dissolution dont la composition répond à peu près à la formule $KO,SO^3,2(MgO,SO^3)$. On ajoute ensuite du chlorure de potassium qui donne du sulfate de potasse et du chlorure de magnésium

$$KO, SO^3, 2(MgO, SO^3) + 2KCl = 3(KO, SO^3) + 2MgCl.$$

Le sulfate de potasse se sépare à l'état de grenu.

Pour toutes ces réactions, il faut prendre du chlorure de potassium à peu près exempt de chlorure de sodium; autrement le sulfate de potasse serait mélangé de sulfate de soude.

Malgré tous les efforts de nombreux fabricants pour faire passer ces méthodes dans la pratique, les résultats n'ont pas été très satisfaisants; le sulfate de potasse, ainsi préparé, a un prix de revient plus élevé que celui qui résulte de l'action de l'acide sulfurique sur le chlorure de potassium. Aussi aujourd'hui, c'est cette dernière réaction qu'on applique presque partout. Le sulfate de potasse est en partie livré au commerce, en partie utilisé pour

la préparation du carbonate de potasse, ainsi que nous le verrons tout à l'heure. Comme produit accessoire, on obtient de l'acide chlorhydrique.

Le sulfate de potasse sert principalement à la fabrication de l'alun. Il entre dans la composition de beaucoup de verres et est aussi employé comme engrais.

Carbonate de potasse.

Avant la découverte du gîte de Stassfurt, la plus grande partie de la potasse du commerce provenait du lessivage des cendres des végétaux, du traitement des vinasses de betteraves ou du lavage de la laine. En 1861, le docteur Grüneberg introduisit à Stassfurt l'application à la potasse du procédé Leblanc concernant la soude.

Le point de départ est le sulfate de potasse que l'on fond sur la sole d'un four à réverbère avec du carbonate de chaux et du charbon. Il faut employer autant que possible du calcaire pur et du charbon exempt de cendres, car les impuretés donnent des composés insolubles avec le chlorure de potassium, et diminuent le rendement en potasse.

La fusion, le lessivage, l'évaporation des solutions. la calcination finale, sont des opérations trop connues pour que nous insistions sur elles.

La potasse de Stassfurt est très pure. Voici la composition des deux qualités qui sont livrées au commerce :

	Première sorte.	Seconde sorte.
Carbonate de potasse	92,2	84,9
Carbonate de soude	2,4	8,2
Sulfate de potasse	1,4	2,8
Chlorure de potassium.	2,9	3,5

La potasse de première marque est blanche, grenue, et se dissout sauf un très faible résidu dans quatre parties d'eau. On l'utilise dans la cristallerie et dans l'industrie des savons mous.

Le prix des 100 kilogrammes est de 90 francs.

Un autre procédé, dû à M. Engel, a été récemment essayé par une Société française qui est venue établir une fabrique à Stassfurt, en vue d'obtenir du carbonate de potasse par la transformation directe du chlorure de potassium.

Voici le principe de la méthode :

Le chlorure de potassium est mélangé à une bouillie de magnésie, en même temps qu'on fait arriver dans la solution un courant d'acide carbonique sous une pression de trois atmosphère. Il se produit alors un carbonate double de potasse et de magnésie, et du chlorure de magnésium.

L'opération s'effectue dans de grandes chaudières cylindriques, en forte tôle, ayant 11 mètres de long, $1^{m},40$ de diamètre.

La magnésie et l'acide carbonique sont obtenus tous deux par la calcination du carbonate de magnésie naturel, que l'on trouve abondamment à l'île d'Eubée.

La décomposition du sel double s'obtient par une légère calcination sur la sole d'un four à réverbère et par dissolution dans l'eau.

Enfin on espérait pouvoir utiliser le chlorure de magnésium produit par la réaction, pour la régénération de la magnésie, mais les essais tentés dans ce sens paraissent avoir échoué.

Acide borique.

Les premiers essais pour extraire l'acide borique des sels de Stassfurt ont été faits en 1865. On a utilisé pour cela la stassfurtite et les résidus de fabrication du chlorure de potassium.

Les ouvriers des fabriques stimulés par une prime importante retirent à la main les fragments notables de

stassfurtite avant le traitement du kalisalz. A la fin, il ne reste plus que de petits grains du minéral dans les résidus, qui sont traités pour sulfate de soude et kiesérite.

On a essayé d'extraire de l'acide borique des résidus de la fabrication du sulfate de soude. Pour cela on les soumettait au lavage afin d'enlever les composés facilement solubles, puis on attaquait le borate de magnésie par l'acide chlorhydrique et on faisait cristalliser l'acide borique par refroidissement.

Par suite de la faible teneur en acide borique, le prix de revient était trop élevé pour que l'on pût lutter avec les produits de la Toscane.

Il est plus avantageux de partir de la stassfurtite fournie par l'exploitation directe, dont on a sous la main de grandes masses qui ne sont mélangées qu'avec très peu de matières étrangères. De 1866 à 1874, on retira de notables quantités d'acide borique de la stassfurtite par un procédé qui fut tenu secret. Il en est de même de celui qui est encore employé aujourd'hui dans deux grandes fabriques des environs de Hanovre traitant la boracite de Stassfurt.

Voici la méthode suivie aujourd'hui dans les usines des environs de Stassfurt :

La stassfurtite est grossièrement broyée; on en fait passer 105 kilogrammes dans une bassine de plomb avec une quantité d'eau suffisante pour humecter la poussière et former avec elle une bouillie homogène. La bassine est disposée de manière à être chauffée en dessous par les gaz du foyer, sans être soumise à l'action directe des flammes. Elle repose ordinairement sur une assise en briques réfractaires; l'interposition d'une plaque de fonte donne de moins bons résultats.

La bouillie est fréquemment remuée avec une spatule en bois, et après deux heures, on détermine le départ de la partie liquide, par une ouverture de 3 à 4 centimètres

de diamètre, placée à la partie inférieure de la chaudière.

L'ouverture est munie intérieurement d'un tamis en fil de fer à mailles de 1 millimètre destiné à arrêter les poussières. A l'extérieur on peut la fermer par un tampon de bois ou mieux par une soupape en plomb ou en gutta-percha.

Le liquide qui s'écoule est d'abord très trouble. On le fait passer à nouveau dans la bassine pour éviter les pertes. Lorsqu'il est complètement évacué, on verse sur la bouillie solide de 10 à 20 litres qu'on laisse immédiatement écouler.

Le but de ces lavages avec une très petite quantité d'eau est d'éliminer la plus grande partie du chlorure de potassium, sans produire des pertes en acide borique, le borate de magnésie étant notablement soluble dans les solutions chlorurées.

On ferme alors l'ouverture, on ajoute dans la bassine 300 litres d'eau, 150 kilogrammes d'acide chlorhydrique de densité 1,16, puis on agite vivement. La bassine est ensuite chauffée à une température qui ne doit pas dépasser 150 degrés. Pour déterminer la dissolution complète, il est nécessaire d'agiter à plusieurs reprises. Aussitôt ce résultat atteint, on cesse de chauffer et l'on fait écouler le liquide dans des cuves de cristallisation.

La majeure partie de l'acide borique cristallise par refroidissement : on s'arrête lorsque la température du mélange s'est abaissée à 15 ou 20 degrés. On fait alors écouler le liquide, on presse l'acide borique, on le lave avec une quantité limitée d'eau pour achever d'enlever le chlorure de magnésium et on le sèche. Cet acide borique de premier jet est presque chimiquement pur.

La liqueur chlorhydrique est ensuite évaporée jusqu'à ce qu'elle ne laisse plus déposer d'acide borique. Les dernières parties de cet acide sont mélangées de 5 à

10 p. 100 de sels étrangers. La purification se fait simplement par l'action de l'eau.

La liqueur finale est ordinairement rejetée : quelquefois elle est concentrée jusqu'à 44° Baumé et laisse alors déposer du chlorure de magnésium impur. Par simple refroidissement, la dissolution se prend en une masse compacte.

Borax.

Pour préparer le borax au moyen de la stassfurtite, on suit plusieurs méthodes différentes :

Tout d'abord on peut en retirer de l'acide borique et le faire agir sur du carbonate de soude.

Quelquefois on dissout la stassfurtite dans l'acide chlorhydrique, puis on sature par le carbonate de soude l'acide borique se trouvant dans la solution. Par refroidissement il se dépose des cristaux de borax. Récemment on a fait bouillir directement la stassfurtite, avec une solution concentrée de carbonate de soude, donnant par double décomposition du carbonate de magnésie insoluble et du borax pouvant cristalliser par refroidissement. Au lieu de carbonate de soude, on a aussi employé de la soude caustique.

Enfin on a soumis un mélange de stassfurtite et de carbonate de soude à une fusion ignée sur la sole d'un four à réverbère. Le lessivage du produit fournit une dissolution du borax.

Nous ne décrirons ici que la méthode d'ébullition avec de la soude caustique, qui, tout en n'étant pas la plus économique paraît donner les meilleurs résultats au point de vue du rendement.

Tout d'abord, comme dans l'extraction de l'acide borique, on traite 100 kilogrammes de stassfurtite par une quantité limitée d'eau, de manière à enlever la plus

grande partie des sels étrangers. Cette opération s'effectue dans des caisses en fonte chauffées par dessous, dont la disposition générale est analogue à celles des bassines en plomb qui servaient pour l'opération précédente. Après écoulement de la partie liquide, on ajoute 300 kilogrammes d'une solution de soude caustique de densité 1,33, et on porte à l'ébullition. Il est nécessaire d'agiter énergiquement de temps en temps de manière à empêcher l'adhérence du sel aux parois. Au bout d'une heure on ajoute 200 litres d'eau, de manière à éviter une trop grande concentration; on continue à chauffer quelque temps, puis on laisse tomber le feu. Quand la liqueur s'est éclaircie, on la décante au moyen d'un siphon et on la fait passer dans des cuves de cristallisation; le borax qui s'y dépose par refroidissement est presque chimiquement pur.

La liqueur est ensuite évaporée et laisse encore déposer des quantités notables de borax, un peu moins pur que le précédent.

Le résidu insoluble resté dans la cuve, composé presque exclusivement de magnésie, est épuisé encore une fois par l'eau bouillante, et le peu de borax qu'il retenait se trouve ainsi récupéré.

PRODUCTION D'ENSEMBLE

Le magnifique développement qu'a pris depuis trente ans l'industrie des sels de potasse dans la région de Stassfurt, est une conséquence de la richesse incomparable de la mine; les recherches faites dans les salines du Salzkammergut, de la Galicie, de la Hongrie et de la Transylvanie n'ont jamais mis en évidence un gisement analogue. Cependant on a trouvé et exploité assez longtemps à Kalusz (Galicie) une couche riche en sels de

potasse, mais le traitement de ces substances n'ayant pas donné de bénéfices, on y a à peu près renoncé aujourd'hui.

Les cendres de varech, les eaux mères des marais salants, les vinasses de betteraves, qui étaient autrefois les principales sources des sels de potasse, n'en fournissent plus aujourd'hui qu'une faible quantité.

Le cours des sels de potasse dépend presque uniquement des variations de l'extraction à Stassfurt. Dans ces dernières années, l'excès de la production a amené un grand avilissement des prix qui a déterminé les fabricants à former un syndicat ayant pour but de limiter cette production d'après les besoins du marché. En 1884, les mines ont fourni 344.798 tonnes de sel gemme, 203.040 tonnes de kainite, 979.597 tonnes de kalisalz, et comme produits accessoires 12.388 tonnes de kiesérite, et 159 tonnes de stassfurtite. Le traitement sur place du kalisalz a donné 112.950 tonnes de chlorure de potassium, représentant une valeur d'environ 20 millions de francs.

NOTE

SUR

L'EXPLOSION DE DEUX CHAUDIÈRES A VAPEUR

A COMINES (NORD)

Par M. OLRY, ingénieur en chef des mines.

Le 16 janvier 1888, deux générateurs ont fait explosion dans la blanchisserie de MM. Blanquart et Cie, à Comines (Nord). Quatre ouvriers ont été tués et six personnes grièvement blessées. Les dégâts matériels ont été considérables.

Description des lieux. — L'établissement Blanquart est situé sur la rive droite de la Lys, qui sépare à cet endroit la France de la Belgique; il comprend la blanchisserie proprement dite avec ses dépendances, plusieurs magasins, un certain nombre de séchoirs et une maison d'habitation (Pl. XIII, *fig.* 1).

Les chaudières à vapeur, au nombre de deux, formaient une batterie installée vers le centre de l'usine. Le local qu'elles occupaient, isolé sur deux faces et sur une partie de la troisième, était contigu en arrière à une cuverie, et sur le côté gauche à un magasin et à un petit bâtiment renfermant la machine. La blanchisserie était placée à gauche de cet ensemble, la maison d'habitation en face; sur la droite, des séchoirs et des magasins séparaient l'usine d'une propriété appartenant au sieur Carissimo. Enfin un séchoir, avec plancher à claire-voie, était établi au-dessus des générateurs.

Description des chaudières. — Chaque chaudière était composée d'un corps cylindrique horizontal relié à deux bouilleurs inférieurs par quatre communications basses. Elles portaient, de la gauche vers la droite, les n°s 1 et 2; la chaudière n° 2 était pourvue, en outre, d'un dôme de vapeur.

Leurs capacités respectives étaient de 8^m3^,653 et 11^m3^,787, et elles étaient timbrées à 5 kilogrammes; elles présentaient, d'après cela, les produits caractéristiques de 502 et 684.

Appareils de sûreté. — Leurs appareils de sûreté consistaient en un tube de verre, un indicateur magnétique Lethuillier-Pinel avec sifflet de manque d'eau, un manomètre, deux soupapes de sûreté et un appareil Wattrelot pour l'alimentation qui se faisait au moyen d'une pompe.

Usage des générateurs. — Les générateurs fournissaient la vapeur nécessaire aux bacs de la blanchisserie et à la machine conduisant les pompes (Pl. XIII, *fig.* 4). Le tuyau de prise de vapeur pour la machine avait 40 millimètres de diamètre et était en relation avec les deux chaudières par des branchements pourvus de robinets. Le tuyau conduisant la vapeur aux bacs, dont le diamètre était de 60 millimètres, partait du dôme du générateur n° 2 et n'était pas en communication avec le générateur n° 1; mais un troisième tuyau, également de 60 millimètres, muni d'un robinet à chacune de ses extrémités, réunissait les deux chaudières, de sorte que, par son intermédiaire, le générateur n° 1 concourait au chauffage des bacs.

Origine. Épreuves. Réparations. — La chaudière n° 1, dont le constructeur est inconnu, a été achetée d'occasion et installée en 1867. Son ancienneté était caractérisée par des rivures à têtes plates à l'intérieur, et coniques à l'extérieur. Elle avait été fréquemment réparée; les réparations étaient accusées par l'existence d'un assez grand nombre de rivets à têtes rondes et à têtes fraisées, qui se distinguaient nettement de ceux employés à l'origine. Les réparations les plus récentes remontaient à 1875.

La chaudière n° 2 a été construite par le sieur Delvordre, chaudronnier à la Madeleine-lès-Lille, et a été installée, neuve, en 1875. Elle n'avait subi aucune réparation.

Les deux appareils avaient été visités en dernier lieu par le service des mines, le 10 juin 1884; ils paraissaient alors en bon état et étaient parfaitement en règle. Ils ont subi tous deux l'épreuve décennale le 15 juillet suivant.

Circonstances de l'accident. — Le lundi 16 janvier 1888, à sept heures dix minutes du matin, une heure environ après le commencement du travail, l'explosion se produisit. Le générateur n° 1 vola en éclats; quelques tronçons seulement de ses bouilleurs restèrent à peu près cylindriques; les autres morceaux se déformèrent complètement. M. l'ingénieur Soubeiran a retrouvé la plupart de ses fragments, dont quelques-uns avaient été lancés à plus de 100 mètres; on en a ramassé trois, qui étaient tombés au delà de la Lys, sur le territoire belge. Le plus grand nombre d'entre eux ont été projetés vers l'avant, vers l'arrière et à gauche de la batterie.

En même temps, le générateur n° 2 se divisa en trois parties. Le morceau principal, comprenant le corps cylindrique et le bouilleur de droite, fut projeté vers la droite dans le jardin du sieur Carissimo, à une distance

de 27 mètres (Pl. XIII, *fig.* 1). La partie antérieure du bouilleur de gauche, lancée vers l'avant, traversa la cuisine ainsi que le salon du rez-de-chaussée de la maison d'habitation, et le complément de ce bouilleur retomba en arrière du massif.

Le chauffeur Dauchy, qui était à son poste, fut tué sur le coup. Il en fut de même de trois ouvriers qui travaillaient dans le séchoir à claire-voie situé au-dessus des chaudières; leurs corps ont été retrouvés à une assez grande distance.

Le bâtiment des générateurs fut complètement rasé (Pl. XIII, *fig.* 2 et 3); vers la gauche, le bâtiment de la machine, le magasin y attenant, la cuverie, et un coin de la blanchisserie furent renversés; vers la droite, le toit et la façade d'un séchoir contigu à la propriété Carissimo s'effondrèrent. Trois ouvriers furent blessés dans ce séchoir et un quatrième dans la blanchisserie. Enfin, les deux enfants de M. Blanquart, qui se trouvaient dans la cuisine de la maison d'habitation, furent atteints par les débris arrachés sur le passage de la partie antérieure du bouilleur de gauche du générateur n° 2.

Constatations faites par l'ingénieur ordinaire. — M. l'ingénieur des Mines Soubeiran, qui a procédé avec beaucoup de soin à l'enquête, est parvenu à reconstituer presque complètement les chaudières détruites. Il n'y a reconnu aucune trace de surchauffe; leurs rivures n'étaient pas dilatées.

Les tôles du générateur n° 2 étaient propres, ce qui s'explique par le fait que cet appareil avait été nettoyé la veille. Il en était de même des tôles du corps principal de la chaudière n° 1, mais les clouures des bouilleurs de cette chaudière étaient emmarnées : les têtes de leurs rivets étaient en quelque sorte noyées dans les incrustations. De plus, l'une des branches de la fourche d'ali-

mentation du générateur n° 2 était complètement obstruée, mais l'autre branche était suffisante, à elle seule, pour l'alimentation de ce générateur.

Les cassures des tôles avaient un aspect rouillé provenant de la vapeur d'eau, de la poussière, et du givre tombé dans la nuit du 16 au 17 janvier. Cet aspect aurait empêché de distinguer les cassures anciennes, en tant qu'il en existât, de celles produites par l'explosion même.

Des éprouvettes de 20 centimètres de longueur utile, prélevées dans les tôles des deux chaudières, ont été essayées à la traction et ont fourni les résultats suivants :

		GÉNÉRATEUR N° 1.		GÉNÉRATEUR N° 2.	
		Corps principal	Bouilleurs (Pièces)	Corps principal	Bouilleurs
Résistance à la rupture.	En long . . .	30k,6 à 35k,6	37k,1 à 37k,2	28k,09 à 32k,3	27k,7 à 32k,8
	En travers. .	27k,1 à 32k,2	30k à 30k,3	27k,7	27k,3 à 30k
Allongement pour 100. .	En long . . .	3 1/2 à 5 1/2	14 à 14 1/2	2 3/4 à 5 1/2	5 1/2 à 6
	En travers. .	3 1/2 à 4	4 1/4 à 5	3 1/2	2 1/2 à 4

Ces chiffres démontrent que les tôles des deux appareils étaient de qualité très commune ; seules, les pièces mises après coup aux bouilleurs du générateur n° 1 ont donné de bons résultats.

Ces tôles avaient conservé à peu près leurs épaisseurs de construction : 10 et 12mm,5 pour les corps principaux, 9 et 10 millimètres pour les bouilleurs. Toutefois, le corps principal de la chaudière n° 1 avait été rongé extérieurement ; à sa partie supérieure, la corrosion s'étendait sur 2 à 3 millimètres environ de profondeur, ce qui avait réduit son épaisseur moyenne dans cette région à 7 ou 8 millimètres. La tôle n'était pas usée d'une façon uniforme dans les parties corrodées ; elle était criblée

d'une quantité de légères dépressions rappelant les marques de petite vérole. De plus, cette même région présentait vingt trous peu distants les uns des autres, y compris le trou d'homme (*fig.* 4) ; la moitié d'entre eux, depuis longtemps sans emploi, avaient été bouchés au moyen de plaques boulonnées ou rivées.

Les soupapes du générateur n° 1 étaient de construction peu soignée et chargées pour la pression de 3kg,5 ; celles du générateur n° 2 étaient de construction meilleure et chargées pour la pression de 5 kilogrammes faible.

Les autres appareils de sûreté devaient bien fonctionner, à l'exception de l'indicateur magnétique de la chaudière n° 2, dont le sifflet était cravaté.

Causes de l'explosion. — M. l'ingénieur Soubeiran a reconnu que l'explosion du générateur n° 2 n'a été que la conséquence de celle du générateur n° 1, situé à gauche de la batterie. En effet, le générateur n° 2 était en bon état, bien que ses tôles fussent de médiocre qualité ; rien n'indique que ses soupapes aient été calées ; il ne portait aucune trace de surchauffe ; on ne comprendrait donc pas qu'il ait fait explosion sans une cause extérieure. D'autre part, les tronçons de son bouilleur de gauche étaient sensiblement ovalisés dans les viroles attenantes à la cassure, comme s'ils avaient été soumis à l'effet d'une violente pression latérale ; cette ovalisation se remarquait aussi dans la partie médiane du bouilleur de droite ; de plus, les faces latérales voisines des deux bouilleurs portaient des empreintes profondes produites par des têtes de rivets, et provenant de ce que ces bouilleurs avaient été fortement comprimés l'un par l'autre. Enfin le mur de séparation des deux générateurs, dont l'épaisseur à la base était de 1m,30, avait été chassé vers la droite dans sa partie centrale, ce qui indique nette-

ment un choc allant de la chaudière n° 1 à la chaudière n° 2.

Si l'on admet que ce choc a bien été la cause de l'explosion de cette dernière chaudière, on s'explique facilement les conséquences qui en sont résultées. Le bouilleur de gauche ayant été rompu vers son milieu dans une clouure transversale, ses deux tronçons, devenus libres, en ont sollicité violemment les communications, l'une vers l'avant, l'autre vers l'arrière, les ont arrachées du corps principal, et sont partis droit devant eux. Par suite des larges ouvertures faites au corps principal par l'arrachement des communications, il s'est produit du côté opposé, c'est-à-dire vers la droite et vers le haut, une réaction suffisante pour enlever ce générateur et le projeter dans le jardin Carissimo.

Quant au générateur n° 1, qui a sauté le premier, il paraît certain qu'il s'est ouvert au trou d'homme, le long de la génératrice supérieure, c'est-à-dire dans la région où ses tôles étaient à la fois amincies et affaiblies par de nombreux trous. On remarque, en effet, que son corps principal a été affecté de longues déchirures orientées à peu près suivant des génératrices (Pl. XII); en outre, le rabattement violent des tôles de ce corps principal est accusé par l'impression très nette de ses rivures sur les tôles des bouilleurs, et inversement; enfin, sous l'influence de la réaction de haut en bas due à l'ouverture de la chaudière à sa partie supérieure, les bouilleurs ont été brisés et comprimés vers le sol; leurs supports ont pénétré dans les tôles, où ils ont enlevé, comme à l'emporte-pièce, les parties en contact avec eux, et ceux de leurs tronçons qui étaient restés à peu près intacts ont été aplatis dans le sens vertical.

Le générateur n° 1 était vieux et fatigué; son état, aggravé par l'amincissement de ses tôles et par l'existence de nombreux trous au voisinage du trou d'homme,

a-t-il suffi pour occasionner l'accident à la pression normale? M. Soubeiran ne l'a pas pensé. Il a été d'avis que ses soupapes avaient été calées et que la catastrophe a été la conséquence de la surpression ainsi produite. A cet égard, il a fait remarquer qu'au dire même du directeur de l'établissement, on marchait habituellement à $4^{kg},5$; or, les soupapes de la chaudière n° 1 étaient réglées pour la pression de $3^{kg},5$ seulement; il fallait donc qu'elles fussent surchargées ou calées. L'enquête ayant révélé qu'elles ne portaient pas de poids additionnels, on est amené naturellement à conclure qu'elles étaient calées. Cette hypothèse est d'autant plus vraisemblable que leur construction étant peu soignée, elles devaient mal tenir la vapeur, ce qui était un grave inconvénient, eu égard au séchoir qui existait au-dessus d'elles. Enfin, M. Soubeiran a découvert, dans le voisinage des débris de l'une d'elles, un morceau de fer rectangulaire de 27 centimètres de long, 6 centimètres de large et 11 à 12 millimètres d'épaisseur, dont une des extrémités avait été amincie et réduite à $5^{mm},5$ d'épaisseur. En reconstituant la soupape et en chassant ce morceau de fer dans le guide du levier, on obtenait un calage complet. Y a-t-il là une simple coïncidence? Les circonstances relatées ci-dessus donnent lieu de croire au contraire que cette cale avait servi à paralyser la soupape auprès de laquelle on l'a retrouvée.

Il convient d'ajouter que, dans les conditions ordinaires, le calage des soupapes du générateur n° 1 devait paraître peu dangereux, car cet appareil était en communication normale avec le générateur n° 2 dont les soupapes étaient en bon état de fonctionnement. Mais il n'en était pas ainsi le jour de l'accident; les robinets du tuyau réunissant les deux chaudières ont été trouvés l'un partiellement ouvert, l'autre complètement fermé; nous avons déjà dit qu'on avait nettoyé la veille la chaudière n° 2, et, pour ce faire, on l'avait isolée de la chau-

dière voisine, qui était restée en pression ; le chauffeur a probablement omis de rétablir la communication le lendemain matin. Dès lors, la vapeur du générateur n° 1 ne pouvait plus s'échapper que par le branchement de 40 millimètres de diamètre servant de prise de vapeur pour la machine ; cet émissaire d'écoulement étant insuffisant, la pression a pu monter dans l'appareil au delà du numéro du timbre et occasionner l'explosion.

Avis de l'ingénieur en chef. — M. l'ingénieur en chef Peslin a complètement approuvé les conclusions de l'ingénieur ordinaire. Il a insisté particulièrement sur ce que le calage des soupapes de la chaudière n° 1, dont les poids correspondaient à la pression de $3^{kg},5$, était indispensable pour que l'on pût atteindre, dans cet appareil, la pression normale de marche de $4^{kg},5$.

Avis de la Commission centrale des machines à vapeur. — La Commission centrale des machines à vapeur a partagé la manière de voir de M. Soubeiran ; elle a admis, avec lui, que l'explosion du générateur n° 2 a été la conséquence de celle du générateur n° 1, et cette dernière lui a paru devoir être attribuée tant à l'état de fatigue de l'appareil qui était notablement affaibli dans la partie supérieure du corps principal, qu'à une surpression occasionnée par le calage des soupapes et par l'isolement accidentel de la chaudière voisine.

En conséquence, sur la proposition de son rapporteur, la Commission centrale a émis l'avis suivant :

« L'explosion de deux générateurs survenue, le 16 janvier 1888, dans la blanchisserie Blanquart, à Comines (Nord), est due à la fois à l'état de fatigue du générateur n° 1, qui était notablement affaibli par des corrosions et par des trous nombreux dans la partie supérieure de son corps principal, et à une surpression

occasionnée par le calage de ses soupapes et par son isolement accidentel de la chaudière voisine. Sous l'influence de ces causes réunies, le générateur n° 1 s'est ouvert le long de sa génératrice supérieure.

L'explosion du générateur n° 2 a été la conséquence de celle du générateur n° 1.

Les ingénieurs locaux ont donné à cette affaire la suite qu'elle comportait. »

En outre, la Commission a demandé l'insertion de la présente note dans les *Annales des Mines*, afin de mettre les industriels en garde contre les dangers qui peuvent résulter de l'affaiblissement des chaudières occasionné par des trous trop nombreux pratiqués à leur partie supérieure, surtout lorsqu'une élévation accidentelle de pression vient à se produire.

NOTE

SUR DES

MOUVEMENTS VIBRATOIRES DU SOL

DÉTERMINÉS PAR UN EFFONDREMENT INTÉRIEUR

AUX HOUILLÈRES DE MONTRAMBERT (LOIRE)

Par M. PRIMAT, ingénieur des mines.

Le 13 janvier 1888, vers neuf heures du matin, un ouvrier boiseur, travaillant dans la couche des Littes, exploitée par le puits Devillaine, de la concession de Montrambert (Loire), a été gravement contusionné dans des circonstances qui présentent un certain intérêt.

La couche des Littes a, dans la région exploitée par le puits Devillaine, une puissance de 1 mètre à $1^{m},20$ et une inclinaison de 40 à 45 degrés. Le toit de la couche est formé de grès très résistants et d'une grande puissance (voir la coupe XY de la *fig.* 6, Pl. XIII).

L'exploitation se fait par traçage en massifs longs et dépilage avec remblais par tailles chassantes disposées en gradins renversés.

Le 13 janvier, vers neuf heures du matin, il y avait au niveau de 306 mètres (profondeur au-dessous de l'orifice du puits Devillaine), et dans les deux tailles par lesquelles on achevait le déhouillement de la partie comprise entre les niveaux de 306 mètres et de 356 mètres, un certain

nombre d'ouvriers (voir la *fig.* 5, Pl. XIII). Soudain, et sans craquement préalable, le toit de la couche s'affaissa sur une grande surface. Les ouvriers entendirent une violente détonation due sans doute à la rupture des bancs du toit et une rapide chasse d'air éteignit toutes les lampes dans un rayon de plus de 100 mètres.

Dans la région limitée sur la *fig.* 5 par un trait ponctué, les bois furent presque tous brisés et la partie AB du niveau de 306 mètres, située en regard de la pile de charbon qui restait à enlever, fut obstruée par suite de l'écrasement de la houille. A chacune des extrémités A et B, la section transversale du niveau présentait l'aspect figuré par la *fig.* 7. Vers le milieu le boursoufflement de la pile s'accentuait rapidement (*fig.* 8). La voie ferrée fut appliquée contre la paroi d'amont du niveau, passant ainsi de a en a'.

La longueur de la partie obstruée était de 35 mètres, et c'est vers le milieu que l'ouvrier boiseur fut serré entre la sole et le toit du niveau.

Lors de l'écrasement de la pile, des débris de charbon furent projetés avec violence, et tous les ouvriers qui se trouvaient en regard du massif reçurent sur les parties du corps non protégées par les vêtements des écorchures nombreuses.

Les tailles d'abatage furent presque complètement comblées.

En même temps, on entendit au jour une sourde détonation, et il se produisit des secousses ondulatoires qui firent croire à un tremblement de terre.

La détonation a été perçue assez distinctement au hameau de la Mine (*fig.* 6), à la carrière à remblais du puits de Lyon et au hameau de la grande Pinatelle.

Les secousses ont été ressenties aux points suivants :

	DISTANCE horizontale du centre de l'affaissement	DISTANCE verticale du niveau de 306m	OBSERVATIONS
Hameau de la Grande-Pinatelle.	800m au nord.	465m	Secousses faibles.
Bureau des mines de la Béraudière	1.800m à l'est.	384m	Id.
Habitation de M. Lemaire, entrepreneur de travaux publics à la Croix-de-l'Orme.	2.250m à l'est.	390m	Secousses très faibles que M. Lemaire fils, qui était couché, a seul ressenties.
Hameau de la Mine.	600m au S.-E.	325m	Secousses violentes qui ont causé une panique.
La Verrerie.	850m au S.-E.	300m	Secousses faibles.
Habitation de M. Griot, ingénieur divisionnaire des mines de Montrambert.	800m au sud.	303m	Id.
Habitation de M. Clamens, ingénieur à Trablaine	1.250m au S.-O.	280m	Id.
Habitation de M. le docteur Nodet, au Chambon.	2.500m au S.-O.	275m	Secousses très faibles que M. Nodet, qui était couché, a seul ressenties.

La partie du toit de la couche des Littes qui s'est affaissée n'avait pas plus de 5.000 mètres carrés de surface. D'autre part, les remblais qui ont cédé à la pression du toit étaient en place depuis quatre mois en moyenne et le rapport du volume des remblais au volume du charbon était de 41.70 p. 100. La couche ayant une puissance de 1 mètre à 1m,20, l'amplitude maxima du mouvement du toit a donc été au plus de 5 à 6 décimètres.

Les exploitants de Montrambert, se fondant sur ce que des effondrements aussi importants que celui du 13 janvier se seraient produits parfois dans la couche des Littes sans avoir pour conséquence des mouvements du sol, n'ont pas cru pouvoir admettre que l'affaissement souterrain fut la cause des phénomènes observés à la surface.

Toutefois, l'intensité des secousses ressenties au hameau de la Mine, la simultanéité des détonations entendues dans les travaux souterrains et au jour, et la répartition des points où les secousses ont été ressenties tout autour du centre de l'affaissement nous paraissent des raisons suffisantes pour écarter l'hypothèse d'un tremblement de terre.

Les faits que nous venons d'exposer semblent donc confirmer les inductions des géologues sur la faible profondeur du siège initial de l'ébranlement superficiel dans les tremblements de terre, et à cet égard il n'est sans doute pas inutile de rappeler que lors de l'effondrement de la mine de sel gemme de Varangéville, le 31 octobre 1873, la secousse fut, paraît-il, ressentie à plus de 15 kilomètres de distance, et qu'à Nancy, c'est-à-dire à 12 kilomètres de Varangéville, elle fut assez sensible pour faire croire à un tremblement de terre.

SUR LA

RÉSISTANCE DES FONDS PLATS CIRCULAIRES

DES APPAREILS A VAPEUR

Par M. H. RÉSAL.

Le calcul de l'épaisseur de ces fonds, quand il est basé exclusivement sur la théorie mathématique de l'élasticité, présente des difficultés telles que jusqu'ici elles n'ont pu être surmontées.

Aussi Lamé, qui s'est beaucoup occupé de la question, s'est-il trouvé réduit à avoir recours à une induction théorique qui l'a conduit à la formule

$$e' = \sqrt{\mathrm{R}e},$$

où e',R représentent l'épaisseur et le rayon du fond et e l'épaisseur du corps cylindrique.

L'induction de Lamé, quoique très ingénieuse, soulève une objection en ce sens qu'elle ne fait pas intervenir le mode d'ajustage du fond et du corps cylindrique.

Je me propose dans cette note de traiter la question en poussant aussi loin que possible la théorie mathématique de l'élasticité, puis, à l'exemple de Saint-Venant, et en vue d'arriver à une solution, en faisant intervenir les hypothèses de la résistance des matériaux.

J'adopterai les notations de Lamé pour les déplacements et les constantes élastiques, ensuite celles de

Saint-Venant, appropriées en conséquence, pour les pressions, les dilatations et les glissements (*).

Soient

$\mathrm{P}_0 > \mathrm{P}_1$ les pressions qui s'exercent sur l'une et l'autre faces du fond;

$\mathrm{P} = \mathrm{P}_0 - \mathrm{P}_1$ la *pression effective;*

$\varepsilon = \frac{e'}{2}$ la demi-épaisseur du fond;

$x0y$ le plan moyen de ce fond à l'état naturel;

$0z$ la partie positive de l'axe du cylindre, située dans le milieu qui produit la pression P_1.

Nous avons :

$$\mathrm{V} = 0, \quad \frac{d}{d\psi} = 0.$$

$$(1) \quad \delta_r = \frac{d\mathrm{U}}{dr}, \quad \delta_t = \frac{\mathrm{U}}{r}, \quad \delta_z = \frac{d\mathrm{W}}{dr}, \quad \gamma_{rz} = \frac{d\mathrm{U}}{dr} + \frac{d\mathrm{W}}{dr}.$$

$$(2) \quad \begin{cases} -p_{rr} = (\lambda + 2\mu)\delta_r + \lambda(\delta_t + \delta_z), \\ -p_{tt} = (\lambda + 2\mu)\delta_t + \lambda(\delta_r + \delta_z), \\ -p_{zz} = (\lambda + 2\mu)\delta_z + \lambda(\delta_r + \delta_t), \\ -p_{rz} = \mu\gamma_{rz}, \\ p_{tr} = 0, \\ p_{tz} = 0, \end{cases}$$

$$(3) \quad \begin{cases} \frac{1}{r}\left(\frac{dr\,p_{rr}}{dr} - p_{tt}\right) + \frac{dp_{rz}}{dz} = 0, \\ \frac{dp_{zz}}{dr} + \frac{dp_{rz}}{dr} + \frac{p_{rz}}{r} = 0. \end{cases}$$

Si, après avoir différentié, par rapport à r, la première des équations (3), on la multiplie par z, puis, qu'on l'ajoute à la seconde de ces équations, on est conduit à (**)

$$\frac{z}{r}\frac{d}{dr}\frac{1}{r}\left(\frac{dr\,p_{rr}}{dr} - p_{tt}\right) + \frac{d}{dr}z\frac{dp_{rz}}{dr} + \frac{p_{rz}}{r} + \frac{dp_{zz}}{dz} = 0,$$

(*) On peut consulter, à ce sujet, mon *Traité de physique mathématique*, 2e édit.

(**) J'applique ici le remarquable mode de réduction employé par M. Boussinesq dans ses études sur la théorie générale des plaques minces.

ou

$$\frac{z}{r}\frac{d}{dr}\left(\frac{dr\,p_{rr}}{dr}-p_{tt}\right)-\frac{z}{r^2}\left(\frac{dr\,p_{rr}}{dr}-p_{tt}\right)+\frac{d}{dz}\,z\,\frac{dp_{rz}}{dr}+\frac{p_{rz}}{r}+\frac{dp_{zz}}{dz}=0,$$

ou encore, en ayant égard à la première des équations (3),

$$\frac{z}{r}\frac{d}{dr}\left(\frac{dr\,p_{rr}}{dr}-p_{tt}\right)+\frac{z}{r}\frac{dp_{rz}}{dr}+\frac{d}{dz}\,z\,\frac{dp_{rz}}{dr}+\frac{p_{rz}}{r}+\frac{dp_{zz}}{dz}=0.$$

Si on multiplie par dz, que l'on intègre ensuite entre $-\varepsilon$ et ε, limites pour lesquelles p_{rz} est nul, on obtient

$$\frac{1}{r}\int_{-\varepsilon}^{\varepsilon}\frac{d}{dr}\left(\frac{dr\,p_{rr}}{dr}-p_{tt}\right)z\,dz+\frac{1}{r}\int_{-\varepsilon}^{\varepsilon}\frac{dp_{zz}}{dz}\,z\,dz+\frac{1}{r}\int_{-\varepsilon}^{\varepsilon}p_{rz}\,dz+P_1-P_0=0.$$

Or on a :

$$\int_{-\varepsilon}^{\varepsilon}\frac{dp_{rz}}{dr}\,z\,dz=(r\,p_{rz})_{-\varepsilon}^{\varepsilon}-\int_{-\varepsilon}^{\varepsilon}p_{rz}\,dz=-\int_{-\varepsilon}^{\varepsilon}p_{rz}\,dz,$$

par suite

$$-\frac{1}{r}\int_{-\varepsilon}^{\varepsilon}\frac{d}{dr}\left(\frac{dr\,p_{rr}}{dr}-p_{tt}\right)z\,dz=-P,$$

d'où, en désignant par C une constante arbitraire,

$$(4)\qquad -\int_{-\varepsilon}^{\varepsilon}\left(\frac{dr\,p_{rr}}{dr}-p_{tt}\right)z\,dz=-P\left(\frac{r^2}{2}+C\right).$$

Nous avons maintenant, en ayant égard aux valeurs (2)

$$\begin{aligned}-\left(\frac{dr\,p_{rr}}{dr}-p_{tt}\right)&=-\left(r\,\frac{dp_{rr}}{dr}+p_{rr}-p_{tt}\right)\\&=(\lambda+2\mu)\,r\,\frac{d\delta_r}{dr}+\lambda r\left(\frac{d\delta_t}{dr}+\frac{d\delta_z}{dr}\right)\\&\quad+(\lambda+2\mu)\delta_r+\lambda(\delta_t+\delta_r)-(\lambda+2\mu)\delta_t\\&\quad-\lambda(\delta_r+\delta_r)\\&=(\lambda+2\mu)\,r\,\frac{d\delta_r}{dr}+\lambda r\left(\frac{d\delta_t}{dr}+\frac{d\delta_z}{dr}\right)+2\mu(\delta_r-\delta_t).\end{aligned}$$

Mais,

$$\frac{d\delta_t}{dr}=\frac{1}{r}\frac{dU}{dr}-\frac{U}{r^2}=\frac{1}{r}(\delta_r-\delta_t),$$

par suite,

$$-\left(\frac{dr\,p_{rr}}{dr}-p_{tt}\right)=(\lambda+2\mu)\left(r\,\frac{\delta_r}{dr}+\delta_r-\delta_t\right)+\lambda r\,\frac{d\delta_z}{dr},$$

et l'équation (4) devient

$$(5)\qquad\begin{cases}(\lambda+2\mu)\displaystyle\int_{-\varepsilon}^{\varepsilon}\left(r\,\frac{d\delta_r}{dr}+\delta_r-\delta_t\right)z\,dz+\lambda r\int_{-\varepsilon}^{\varepsilon}\frac{d\delta_z}{dr}\,dz\\ \qquad\qquad=-P\left(\dfrac{r^2}{2}+C\right).\end{cases}$$

Cette dernière équation n'est soumise à aucune restriction, quand même l'épaisseur de la plaque serait variable.

Je vais maintenant quitter la voie rationnelle que j'ai suivie jusqu'ici pour faire un emprunt aux hypothèses de la théorie de la résistance des matériaux.

Soient :

ρ le rayon de courbure de la section méridienne moyenne de la plaque déformée;

W_0 la valeur de W qui se rapporte à cette section;

$$\zeta=\frac{dW_0}{dr}.$$

En négligeant ζ^2 devant l'unité, et la dilatation longitudinale (*) de la section ci-dessus, je poserai

$$(6)\qquad \delta_r=\frac{dU}{dr}=\frac{z}{\rho}=-z\,\frac{d^2W_0}{dr^2}=-z\,\frac{d\zeta}{dr},$$

équation qui est satisfaite par

$$(6')\qquad \delta_t=\frac{U}{r}=-\frac{z}{r}\frac{dW_0}{dr}=-z\,\frac{\zeta}{r}.$$

(*) Cette dilatation est d'ailleurs de l'ordre de ζ^2 dans le cas d'encastrement circulaire, le seul pratique.

On a

$$\frac{dr\delta_r}{dr} - \delta_t = -z\left(r\frac{d^2\zeta}{dr^2} + \frac{d\zeta}{dr} - \frac{\zeta}{r}\right) = -zr\left(\frac{d^2\zeta}{dr^2} + \frac{1}{r}\frac{d\zeta}{dr} - \frac{\zeta}{r^2}\right)$$

$$= -z\left(\frac{d^2\zeta}{dr^2} + \frac{d\frac{\zeta}{r}}{dr}\right) = -zr\frac{d}{dr}\frac{1}{r}\frac{dr\zeta}{dr}.$$

Comme, d'après la théorie précitée, δ_z doit être négligé, l'équation (5) devient

$$\frac{2}{3}(\lambda+2\mu)\varepsilon^3\frac{d}{dr}\frac{1}{r}\frac{dr\zeta}{dr} = P\left(\frac{r}{2} + \frac{C}{r}\right),$$

d'où

$$\frac{2}{3}(\lambda+2\mu)\frac{\varepsilon^3}{r}\frac{dr\zeta}{dr} = P\left(\frac{r^2}{4} + C\log r + \text{const. } C'\right).$$

Mais on remarquera que

$$\frac{1}{r}\frac{dr\zeta}{dr} = \frac{dW_0}{dr^2} + \frac{1}{r}\frac{dW_0}{dr},$$

et comme la somme des courbures principales du feuillet moyen ne peut pas être infini pour $r=0$, il faut que C soit nul. Il vient donc

$$\frac{2}{3}\varepsilon^3(\lambda+2\mu)\frac{dr\zeta}{dr} = P\left(\frac{r^3}{4} + C'r\right),$$

d'où

$$\frac{2}{3}\varepsilon^3(\lambda+2\mu)\frac{dW_0}{dr} = P\left(\frac{r^3}{16} + \frac{C'r}{2}\right). \tag{7}$$

On voit aussi que $\frac{dW_0}{dr}$ est nul avec r comme cela devait être.

J'admets maintenant que le fond est encastré suivant une circonférence du rayon R. On doit avoir $\frac{dW_0}{dr}=0$ pour $r=R$, par suite

$$\frac{2}{3}\varepsilon^3(\lambda+2\mu)\frac{dW_0}{dr} = \frac{P}{16}(r^3 - R^2r), \tag{8}$$

et enfin en exprimant que $W_0=0$ pour $r=R$,

$$\frac{2}{3}\varepsilon^3(\lambda+2\mu)W_0 = \frac{P}{64}(R^2-r^2)^2. \tag{9}$$

L'équation (8) donnant

$$\frac{2}{3}\varepsilon^3(\lambda+2\mu)\frac{d^2W_0}{dr^2} = \frac{P}{16}(3r^2-R^2),$$

la plus grande valeur absolue τ de δ_r correspond à $z=\varepsilon$, $r=R$ et on a

$$\frac{2}{3}\varepsilon^2(\lambda+2\mu)\tau = \frac{P}{8}. \tag{10}$$

La plus grande valeur absolue de δ_t correspond à $z=\varepsilon$, $r=0$; mais comme elle n'est que la moitié de τ, il n'y a pas lieu d'en tenir compte dans le calcul de la résistance du fond.

En se rappelant que le coefficient d'élasticité a pour expression $E=\mu\frac{3\lambda+2\mu}{\lambda+\mu}$, on devra poser

$$E\tau = \Gamma.$$

Γ étant une fraction de la résistance à la rupture d'un prisme dont la section serait égale à l'unité, fraction que l'on prend égale à $\frac{1}{10}$ de cette résistance pour obtenir une grande sécurité et que l'on élève quelquefois à $\frac{1}{6}$.

Si on suppose que la matière est isotrope on a $\mu=\lambda=\frac{2}{5}E$ et la formule (10) donne

$$\varepsilon^2 = \frac{5PR^2}{32\Gamma},$$

d'où pour l'épaisseur $e'=2\varepsilon$ du fond, en désignant par e

celle du corps cylindrique,

$$(11) \qquad e' = \sqrt{\frac{5}{8}\frac{R^2}{\Gamma}} = \sqrt{\frac{5}{8}}\sqrt{Re} = 0{,}791\sqrt{Re}.$$

Il y a aussi une réduction notable à apporter à l'épaisseur à laquelle Lamé a été conduit.

Comme question accessoire, je vais maintenant considérer le cas d'une plaque circulaire horizontale reposant par ses bords sur un tube cylindrique vertical et dont la face supérieure supporte la pression P.

On doit avoir ici $p_{rr} = 0$ pour $r = R$, ou en vertu de la première des équations (2) et de valeurs (6) et (6′)

$$3\frac{d^2W_0}{dr^2} + \frac{1}{r}\frac{dW_0}{dr} = 0 \quad \text{pour} \quad r = R,$$

en continuant à prendre $\mu = \lambda$. Par la substitution de la valeur (7) on trouve

$$C' = -\frac{5}{16}R^2,$$

et on a par suite,

$$2\lambda\frac{\varepsilon^3}{r}\frac{dW_0}{dr} = \frac{P}{16}(r^2 - 5R^2),$$
$$2\lambda\varepsilon^3\frac{d^2W_0}{dr^2} = \frac{P}{16}(3r^2 - 5R^2).$$

La plus grande valeur absolue des deux dilatations δ_t, δ_r est la même et correspond à $r = 0$. On a donc

$$e' = \frac{5}{4}R\sqrt{\frac{P}{\Gamma}}.$$

soit environ $\frac{11}{10}$ de l'épaisseur obtenue dans le cas précédent.

BULLETIN.

ACTES DE COURAGE ET DE DÉVOUEMENT.

ACCIDENTS ARRIVÉS DANS LES MINES ET LES CARRIÈRES.

Extrait de rapports du ministre de l'intérieur, approuvés par le Président de la République en 1888 (*).

NOMS, prénoms et qualités.	LIEUX et dates.	ANALYSE des faits.	RÉCOMPENSES décernées. MÉDAILLES en or.	MÉDAILLES en argent.	MENTIONS honorables. — LETTRES de félicitations.
		19 mars 1888.			
		LOIRE.		classes.	
HATON DE LA GOUPILLIÈRE, Inspecteur général des mines. DELAGE, vicaire de la paroisse de Saint-Tunnemond. PÉJON, maître-mineur à la Compagnie de Beaubrun.	Concession houillère de Beaubrun. (1er mars 1887)	Ont courageusement porté secours aux victimes d'une explosion de grisou.			Lettre de félicitations. Mention honorable. Id.
		23 avril 1888.			
		ARDÈCHE.			
DUMOULIN (Eugène), maître-mineur à la carrière de la Roupette. CERUTTI (Dominique), boiseur à la carrière du Saut-de-l'Egue. YTHIER (Louis), ouvrier à la même carrière.	» Carrière du Saut-de-l'Egue, commune de Viviers. (20 mai 1887).	A fait preuve du plus grand dévouement pour dégager le corps d'un ouvrier tué par suite d'un éboulement. Belle conduite dans la même circonstance.		2e	Mention honorable. Id.

(*) Cet extrait fait suite à celui qui a été publié dans le 2e volume de 1887 (*Bulletin*), p. 505.

NOMS, prénoms et qualités.	LIEUX et dates.	ANALYSE des faits.	RÉCOMPENSES décernées. MÉDAILLES en or.	MÉDAILLES en argent.	MENTIONS honorables. — LETTRES de félicitations.
29 juin 1888.					
SEINE-ET-OISE.			classes.		
KELLER, Ingénieur en chef des mines, à Paris.					Lettre de félicitations.
LÉVY (Léon), Ingénieur des mines, à Paris.					Id.
CAMBON, chef du cabinet du préfet de Seine-et-Oise.					Id.
LAUREAU (Amédée-Emile-Maurice), puisatier à Bullion.	Puits à eau, à Blancheface, commune de Sermaise. (21 avril-15 mai 1888).	Se sont signalés par leur belle conduite lors des travaux entrepris du 21 avril au 15 mai 1888, pour dégager le corps d'un ouvrier puisatier enseveli sous un éboulement à 33 mètres au-dessous du sol. MM. Cambon et Laureau sont déjà titulaires de la médaille d'or de 2e classe.		1re	
LARDIN DE MUSSET (Paul-Anatole), sous-préfet de Rambouillet.				2e	
DE TOURRAINE (Gaston), agent voyer cantonnal à Dourdan.					Mention honorable.
POULAIN, entrepreneur à Saint-Arnoult.					Id.
CHEVILLON (François-Jacques), ancien ouvrier forgeron.					
PRETER (Nicolas-Joseph), puisatier à Saint-Maurice.					Id.
9 juillet 1888.					
LOIRE.					
DUFOUR (Jean-Marie), DEMONTAUT (Grégoire) CONORTON (Jean-Pierre), ouvriers mineurs à la concession houillère de Montrambert.	Concession houillère de Montrambert. Puits Devillaine. (13 janvier 1888).	Se sont dévoués pour opérer le sauvetage d'un de leurs camarades surpris par un éboulement.		2e	Mention honorable. Id.
NORD.					
NAVEZ (Philippe), porion à la concession houillère de Meurchin, domicilié à Carvin.	Mines de Meurchin. (1884, 1885 et 1886).	S'est signalé plusieurs fois en portant secours à des mineurs surpris par des éboulements.		2e	

NOMS, prénoms et qualités.	LIEUX et dates.	ANALYSE des faits.	RÉCOMPENSES décernées. MÉDAILLES en or.	MÉDAILLES en argent.	MENTIONS honorables. — LETTRES de félicitations.
21 août 1888.					
DORDOGNE.			classes.		
DELBARRY (Pierre), dit LACOMBE, ouvrier mineur.	Mines de lignite de Lasserre, commune de Simeyrols (14 août 1887).	S'est dévoué pour retirer les cadavres de 3 personnes asphyxiées dans un puits de mine.		2e	
PAS-DE-CALAIS.					
DUCROCQ (Louis), porion à la mine de houille de Marles.	Concession houillère de Marles (20 janvier 1888).	S'est signalé d'une manière toute particulière en portant secours à l'un de ses camarades surpris par un éboulement.		2e	
DUPUIS (Moïse), ouvrier mineur à la même mine.		A coopéré au même sauvetage.			Mention honorable.
SAÔNE-ET-LOIRE.					
BONNOT (Étienne), ouvrier mineur aux mines de Blanzy.	Concession houillère de Blanzy. Puits Sainte-Marie. (23 janv. 1888)	Se sont exposés aux plus grands dangers en opérant la recherche de deux victimes d'un accident survenu au fond d'un puits d'extraction.		2e	
GONNOT (Jean), machiniste aux mêmes mines.				2e	
24 décembre 1888.					
LOIRET.					
KELLER, Ingénieur en chef des mines.					Lettre de félicitations.
CHESNEAU, Ingénieur des mines.					Id.
FRÈRE (Clément), chef porion aux mines d'Anzin.				1re	
DUPONT (Timothée), ouvrier aux mines d'Anzin.	Puits à eau à La Brosse. (Août 1888.)	Se sont particulièrement distingués par leur dévouement, lors des travaux entrepris pour sauver un ouvrier puisatier enseveli sous un éboulement.		2e	
LEFEBVRE (Descent), ouvrier aux mines d'Anzin.				2e	
AUBRY (Arthur), ouvrier aux mines d'Anzin.				2e	
DULIEU (Henri), ouvrier aux mines d'Anzin.				2e	

MINES D'OR DE LA RÉPUBLIQUE DU TRANSVAAL.

Les principaux districts aurifères de la République du Transvaal sont ceux de Lydenburg, de Kaap et de Komati du côté du nord-est, de Witwatersrand et de Malmani du côté du sud et du sud-ouest.

Les gisements de Lydenburg consistent partie en filons, partie en minerais d'alluvion ; ils sont exploités actuellement par seize compagnies représentant un capital total de 56 millions de francs; mais toutes ces compagnies n'ont pas eu la même fortune : quelques-unes d'entre elles ont vu leurs actions tomber à vil prix, par suite des difficultés inattendues rencontrées dans l'exploitation et tenant soit à la moindre richesse des gisements, soit à la nature du minerai moins propre à l'amalgamation, soit aux dépenses qu'il a fallu faire pour amener aux bocards l'eau nécessaire à leur fonctionnement.

L'exploitation porte sur un nombre considérable de filons de quartz aurifère, dont la puissance varie, en général, de 0m,60 à 1m,20; quelques-uns d'entre eux sont reconnus sur plus d'un kilomètre de longueur. Ils sont encaissés, du moins dans certaines concessions, dans des schistes talqueux, que traversent en outre des filons de roches dioritiques. Les alluvions aurifères se trouvent au voisinage immédiat des filons, dont la désagrégation leur a donné naissance; mais elles sont parfois recouvertes par des dépôts stériles assez épais; elles sont, presque partout, exploitées par la méthode hydraulique; les gros fragments de quartz qu'elles renferment, et qui sont arrêtés par des grilles, sont repassés au bocard avec les minerais extraits des filons.

La teneur moyenne de ces minerais paraît varier entre 10 et 50 grammes d'or à la tonne; mais on n'a pas toujours, comme rendement pratique, obtenu ce minimum de 10 grammes, une partie assez notable de l'or étant parfois restée dans les résidus de lavage; c'est ce qui arrive notamment dans le cas de minerais pyriteux, et l'on est contraint alors de reprendre, pour les griller et les traiter à nouveau, les résidus de l'amalgation.

Dans son ensemble, la production annuelle du district de Lydenburg, non compris la vallée du Kaap, est évaluée de 6.000 à 8.000 onces (186 à 248 kilogrammes) représentant une valeur de 540.000 à 720.000 francs.

Dans le district de Witwatersrand, les résultats ont été plus

importants, ainsi qu'on en peut juger par le tableau suivant, qui donne, d'après le rapport de la Chambre des Mines, la production mensuelle de ce district du 1er décembre 1887 au 30 novembre 1888 :

MOIS	PRODUCTION en onces troy de 31gr,0912	PRODUCTION en kilogrammes	VALEUR à raison de 90 francs par once
		kilog.	fr.
Décembre 1887	8.306	258,233	747.540
Janvier 1888	11 269	350,353	1.014.210
Février.	12.161	378.085	1.094.490
Mars.	14.706	457,209	1.323 540
Avril	15 854	492,901	1 426.860
Mai	19 002	590,772	1.710.180
Juin	16.328	507,637	1.469.520
Juillet.	19.963	620,649	1.796.670
Août	19.877	617,975	1.788.930
Septembre.	20.219	628,608	1.819.710
Octobre	27 773	863,462	2.499.570
Novembre	26.228	815,428	2.360.520
Totaux	241.686	6.581,312	19.051.790

(Extrait d'un *Rapport adressé à M. le Ministre des affaires étrangères*, par M. AUBERT, vice-consul de France à Prétoria).

MINES DE CHARBON DE LA NOUVELLE-ZÉLANDE.

Les grèves qui se sont produites, à la fin de l'année 1888, dans le district houiller de Newcastle d'Australie (Nouvelle-Galles du Sud), ont jeté une grande perturbation dans nombre d'industries et dans la navigation en Australasie. Elles ont eu pour effet d'appeler l'attention sur les mines de houille de la Nouvelle-Zélande, et plusieurs compagnies se sont constituées pour l'exploitation de nouveaux gisements carbonifères, principalement sur la côte ouest de l'île du Sud.

Le tableau suivant indique les quantités de charbon extraites des mines de la Nouvelle-Zélande pendant les dix dernières années, ainsi que les chiffres des importations correspondantes :

ANNÉES	PRODUCTION	IMPORTATIONS
	tonnes	tonnes
1878	162.218	174.148
1879	231.218	158.076
1880	299.923	123.298
1881	337.262	129.962
1882	378.272	129.582
1883	421.764	123.540
1884	480.831	148.444
1885	511.063	130.202
1886	534.353	119.873
1887	558.620	107.230

Ces chiffres montrent clairement que l'extraction locale du charbon tend à supprimer les importations de ce combustible; l'industrie minière est arrivée à un point de production telle qu'elle ne pourra se développer davantage que si elle est assurée de débouchés d'exportation.

Les grèves de Newcastle lui auront sans doute ouvert temporairement d'importants débouchés dans la région du Pacifique. Mais un développement permanent et rémunérateur ne pourrait lui être assuré que par de grands travaux dans les ports de Westport et de Greymouth, qui ne sont pas actuellement en état de recevoir des navires de plus de douze cents tonneaux.

Jusqu'à présent, les exportations de charbons néozélandais n'ont présenté aucune importance. Elles ont été, pour 1887, d'après les statistiques de la douane, de 44.129 tonnes; mais sur ce chiffre, 31.178 tonnes ont été employées à fournir le combustible des paquebots directs de Nouvelle-Zélande à Londres, ce qui réduit à 12.951 tonnes l'exportation proprement dite. Cette dernière se décompose ainsi qu'il suit :

Nouvelle-Galles du Sud	4.279 tonnes.
Victoria	2.485 —
Hong-Kong	3.436 —
Fiji	2.605 —

Les 558.620 tonnes de l'extraction de 1887 comprenaient 317.273 tonnes de qualité bitumineuse, le restant étant de qualités inférieures. Si l'on considère que la consommation hebdomadaire de houille pour les trois villes réunies de Sydney, de Melbourne et d'Adélaïde est évaluée à 30.000 tonnes, on se rendra compte de la gravité de la crise provoquée par les grèves de Newcastle, dont les mines fournissent 90 pour 100 des approvisionnements australiens. Les mines de houille de la Nouvelle-Zélande en ont bénéficié. C'est ainsi que la grande compagnie *Union Steamship*

of Newlhealand, dont les approvisonnements annuels à Newcastle représentaient 150.000 tonnes, a pris ses dispositions pour s'assurer de la totalité de son combustible en Nouvelle-Zélande.

Le tableau suivant reproduit, sur la composition de ces houilles, quelques renseignements extraits du *Handbook* des mines de la Nouvelle-Zélande, publié en 1887 par M. le ministre des mines Larnach :

CHARBONNAGES	CARBONE fixe	HYDROCARBURES	EAU	CENDRES	POUVOIR d'évaporation
Auckland.					
Kawakawa	57,20	36,00	4,60	2,20	7,40
Kanco	50.58	36,52	9,25	3,65	5,50
Whauwhau	47,50	41,44	7,56	3,27	6,10
Canterbury.					
Springfield	59,90	26,60	9,40	4,10	7,70
Hornebush	41,80	29,60	26,20	2,40	5,40
Canterbury	46,02	26,99	21,66	5,33	5,90
Otago.					
Kaitangata	44,18	38,22	15,41	2,19	5,70
Bruce	41,57	40,93	11,60	5,90	5,40
Real-Mackay					
Walton-Parck	41,23	36,97	18,07	3,49	5,30
Côte Ouest. — Ile du Sud.					
Brunner	53,50	41,28	1,41	3,81	6,90
Coul-Pit-Heath	59,38	34,48	1,05	4,09	7,70
Wullsend	53,08	41,95	0,99	3,98	7,00

En ce qui concerne la qualité des houilles de Nouvelle-Zélande, M. le Consul des États-Unis s'exprimait ainsi qu'il suit dans un rapport à son gouvernement :

« Plusieurs des spécimens de charbons de Nouvelle-Zélande exposés à l'Exposition internationale de Sydney, ainsi que des briquettes et du coke de même provenance, ont été reconnus comme étant de qualité très supérieure. Tel a été le cas spécialement pour le charbon de Brunner, près Greymouth, et pour celui de la Baie-des-Iles. Ce dernier serait égal aux meilleures espèces de Newcastle, et même il brûle en laissant moins de cendres. »

M. le Secrétaire des Mines de la Nouvelle-Galles du Sud écrit d'autre part :

« Les charbons de la Nouvelle-Zélande sont de qualité telle

qu'ils feront un jour concurrence aux nôtres sur tous les marchés hors de la colonie. »

D'après les évaluations fondées sur l'étendue connue des formations carbonifères (*), les quantités disponibles s'élèveraient au chiffre de 4 milliards de tonnes dans les districts suivants :

Grey-River, Buller-River, Wanganni-Ouest, Pakawau, Aorere. Batou-River, et Whangapeka, dans l'île du Sud;

Whangarei et Kawakawa, dans l'île du Nord.

En ce qui concerne les prix des houilles de Nouvelle-Zélande, ils ont éprouvé une hausse considérable par suite des grèves de Newcastle. Mais, en temps normal, ils varient, suivant les provenances, les facilités d'embarquement et la qualité, de 5 à 30 shillings la tonne.

(*Extrait d'un rapport adressé à M. le Ministre des affaires étrangères par* M. DE JOUFFROY D'ABBANS, *vice-consul de France à Wellington, Nouvelle-Zélande.*)

(*) Il est à noter que parmi ces formations, le terrain houiller proprement dit n'est pas représenté; les gisements de Grey-River, Pakawau, Wangapeka, notamment, appartiennent au crétacé supérieur; d'autres, comme ceux de Waikawa, appartiennent au trias. Il y a aussi des couches à combustibles dans le tertiaire

TABLE DES MATIÈRES

DU TOME QUATORZIÈME.

MINÉRALOGIE. — GÉOLOGIE.

Pages

Note sur les gîtes de mercure du Monte Amiata (Toscane); par M. *Primat*. 95

Note sur l'ozokérite de Boryslaw et les pétroles de Sloboda (Galicie); par M. *L. Babu*. 162

MÉTALLURGIE. — MINÉRALURGIE.

Études métallurgiques; par M. *Osmond* 5

Note sur le traitement industriel des sels de Stassfurt; par M. *L. Janet* 479

MÉCANIQUE. — EXPLOITATION.

Commission des substances explosives. — Sous-Commission spéciale. — Rapport sur l'étude des questions relatives à l'emploi des explosifs en présence du grisou; par M. *Mallard* 197

— — Rapport supplémentaire; par M. *Mallard*. 319

Étude sur les appareils Piccard pour la vaporisation des dissolutions salées et sur l'emploi du travail pour obtenir de la chaleur; par M. *A. Rateau*. 377

Note sur les mouvements vibratoires du sol déterminés par un effondrement intérieur aux houillères de Montrambert (Loire); par M. *Primat* 526

Sur la résistance des fonds plats circulaires des appareils à vapeur; par M. *H. Résal* 528

OBJETS DIVERS.

Pages

Les prix de revient sur les chemins de fer; par M. *Ricour* . 131

Note sur l'explosion d'une chaudière à vapeur dans une sucrerie à Aulnois (Aisne); par M. *Hirsch* 464

Bulletin des accidents arrivés dans l'emploi des appareils à vapeur pendant l'année 1887 468

Note sur l'explosion de deux chaudières à vapeur à Comines (Nord); par M. *Olry* 516

BULLETIN.

Actes de courage et de dévouement : accidents arrivés dans les mines et les carrières. 535

Mines d'or de la République du Transvaal 538

Mines de charbon de la Nouvelle-Zélande. 539

EXPLICATION DES PLANCHES

DU TOME QUATORZIÈME.

Pl. I, II et III. — Études métallurgiques.

Pl. IV. — Gîtes de mercure du Monte Amiata.

Pl. V. — Gisement d'ozokérite de Boryslaw et pétroles de Sloboda.

Pl. VI à X. — Appareils Piccard pour la vaporisation des dissolutions salées.

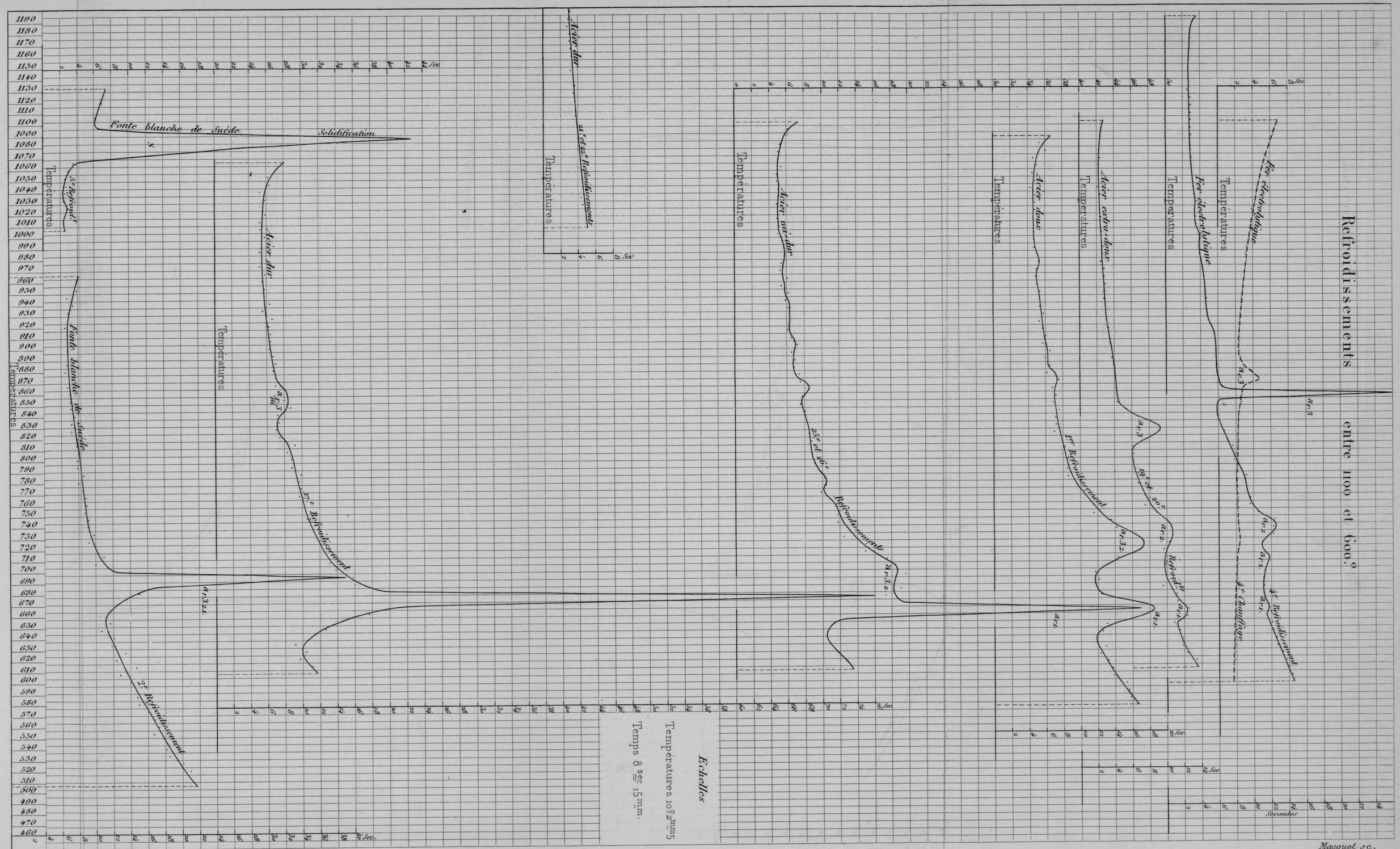
Pl. XI, *fig.* 1 à 4. — Explosion d'une chaudière à vapeur dans une sucrerie à Aulnois.

Pl. XI, *fig.* 5 à 12. — Traitement industriel des sels de Stassfurt.

Pl. XII et Pl. XIII, *fig.* 1 à 4. — Explosion de deux chaudières à vapeur dans une blanchisserie, à Comines.

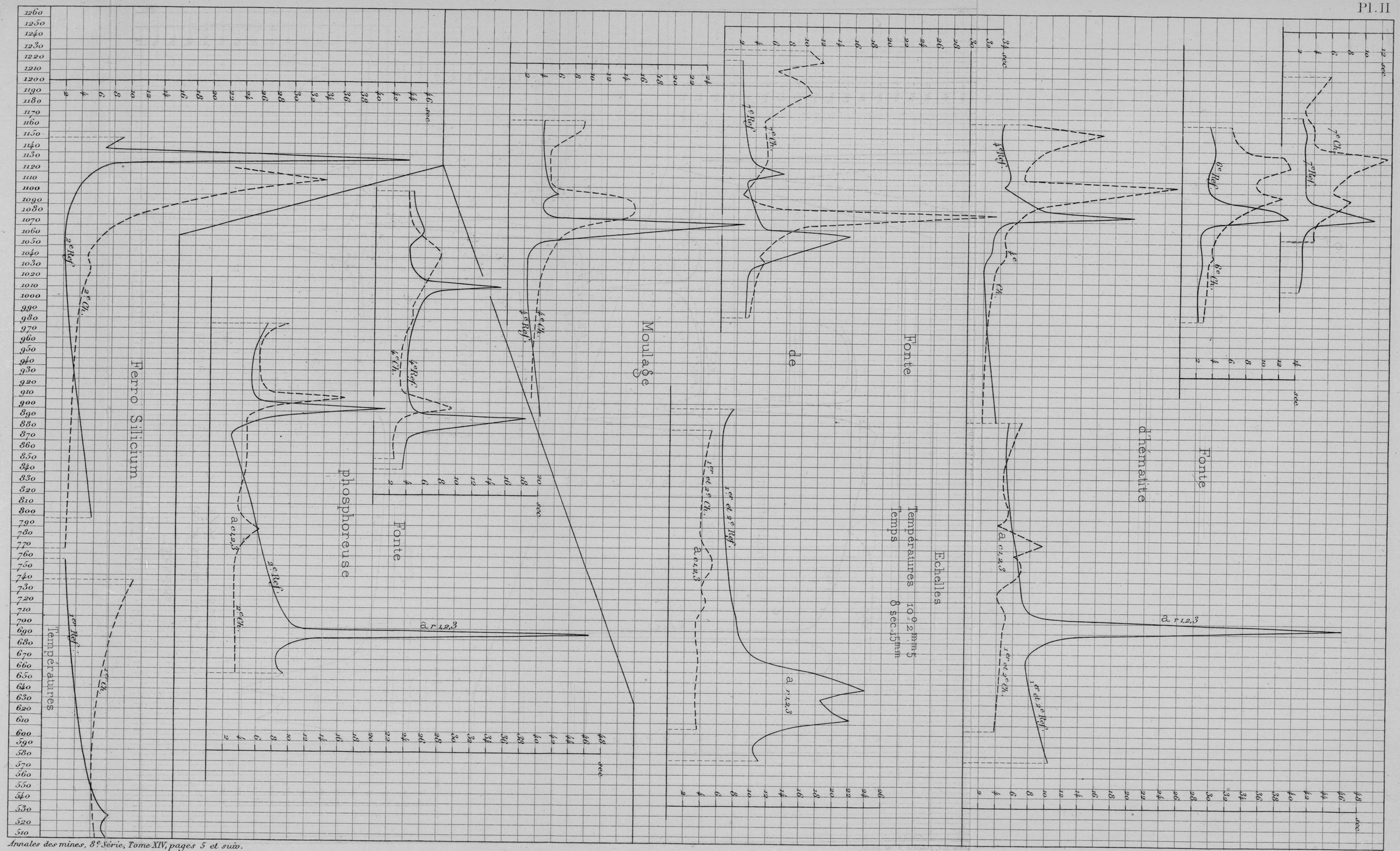
Pl. XIII, *fig.* 5 à 8. — Mouvements vibratoires du sol déterminés par un effondrement intérieur aux houillères de Montrambert.

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



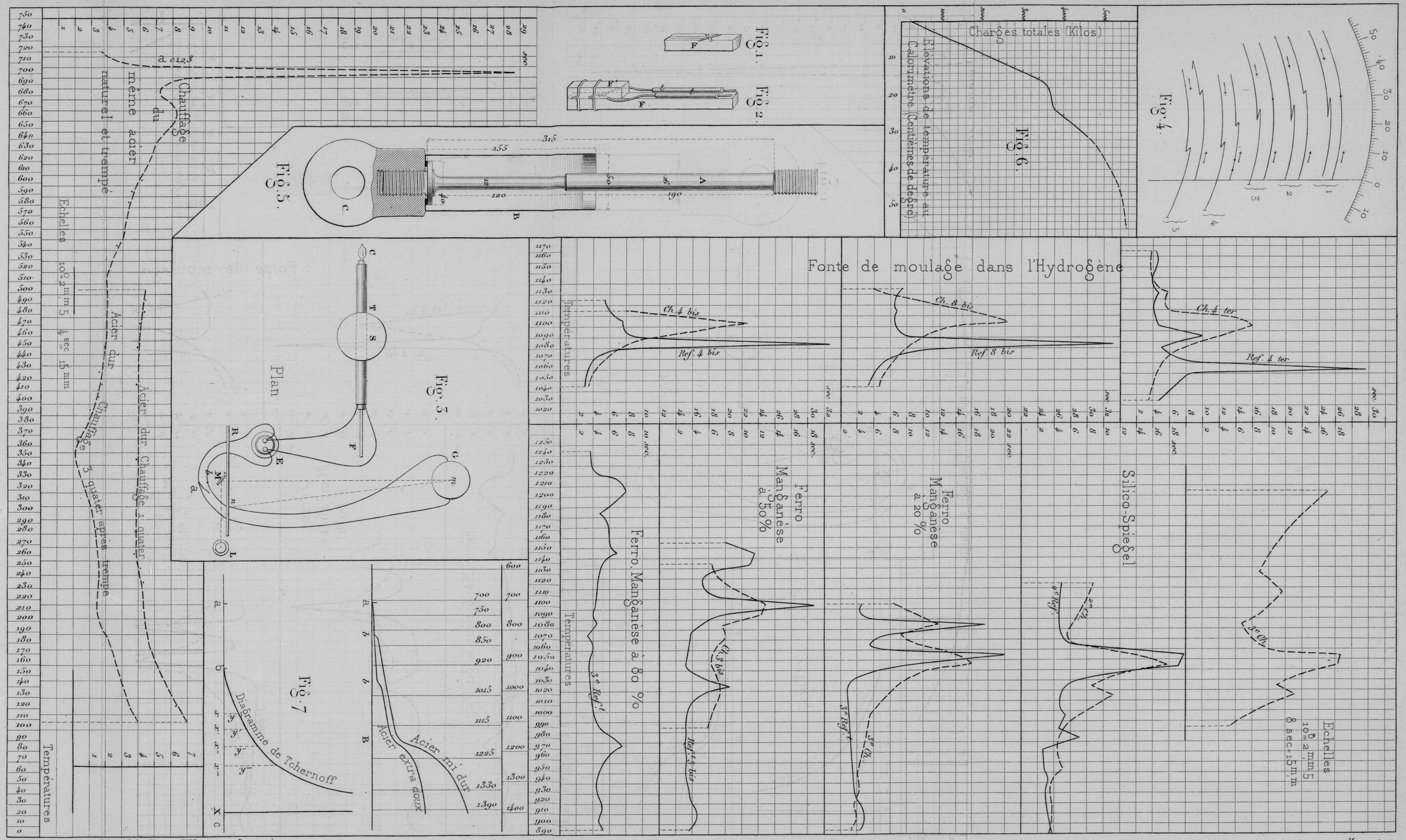
Macquet sc.

Annales des mines, 8e Série, Tome XIV, pages 5 et suiv.



Annales des mines, 8e Série, Tome XIV, pages 5 et suiv.

Macquet sc.



Annales des mines, 8e Série, Tome XIV, pages 5 et suiv.

Macquet sc.

Fig. 1.

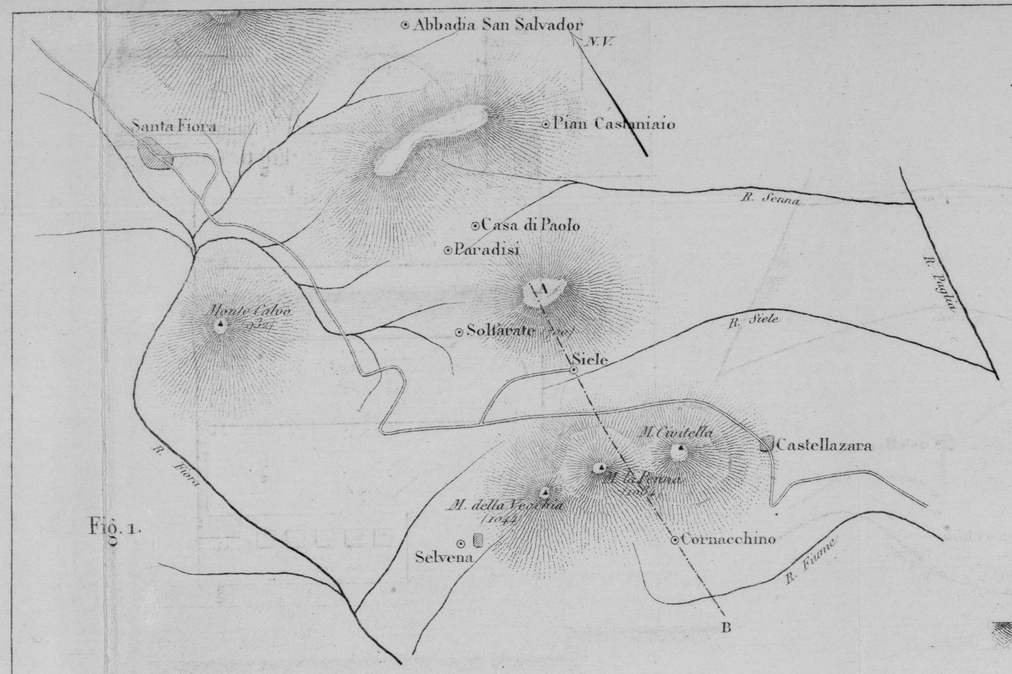
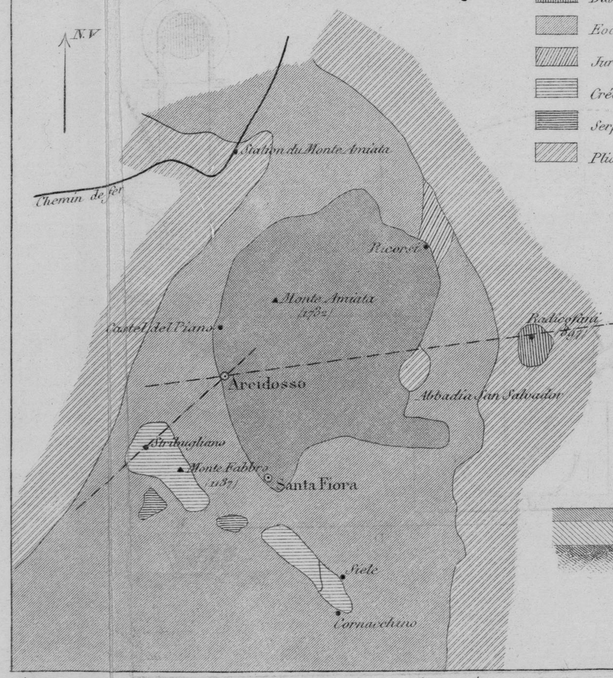


Fig. 2.



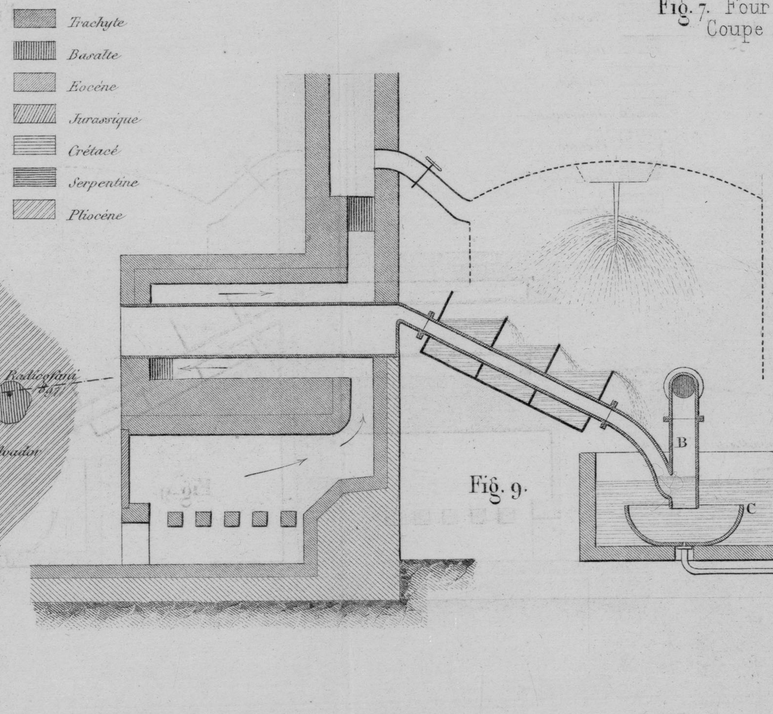


Fig. 6. Cornue en fonte

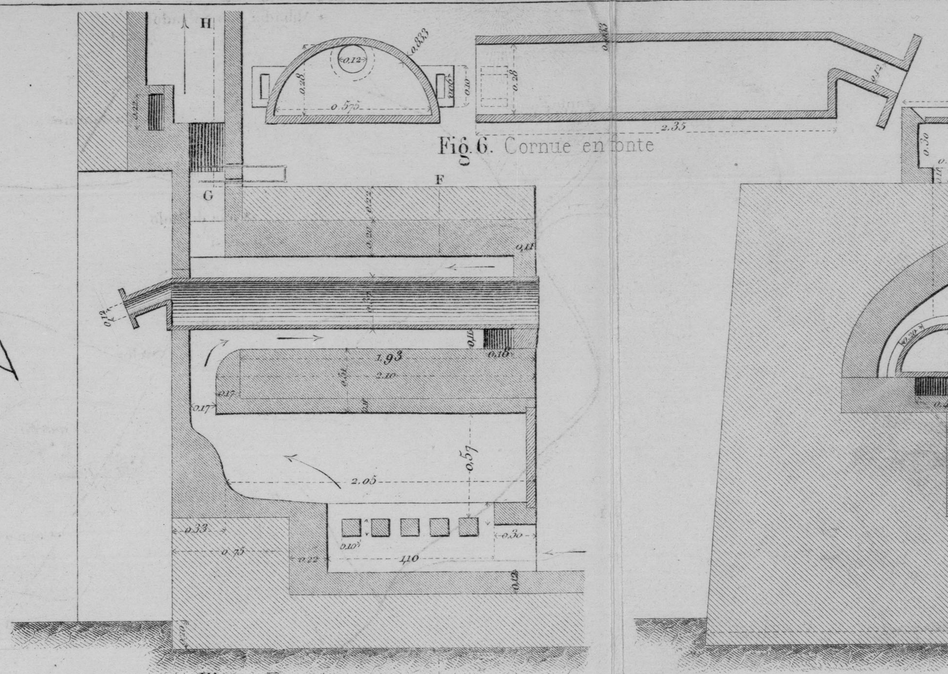


Fig. 7. Four à cornues
Coupe ABCD.

Fig. 8. Four à cornues
Coupe EFGH.

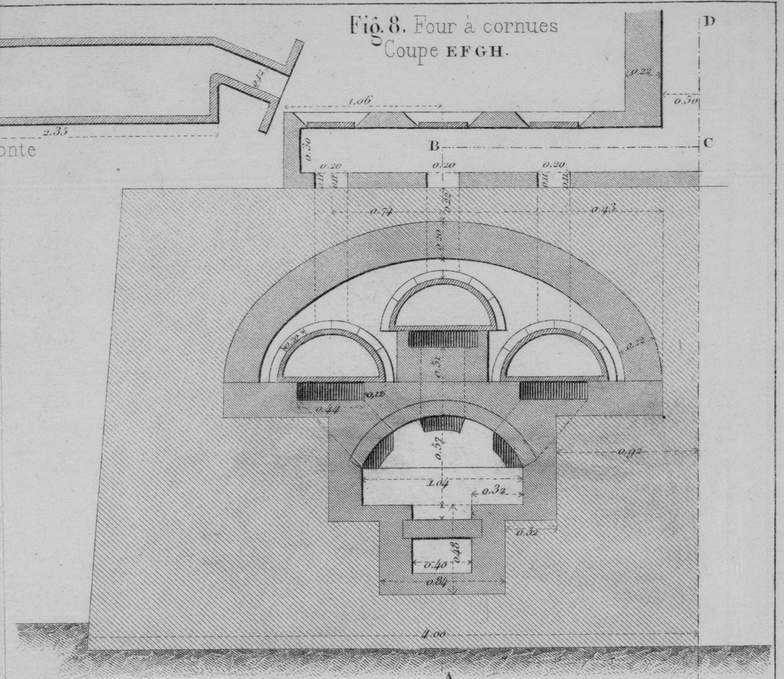


Fig. 9.

Fig. 10.

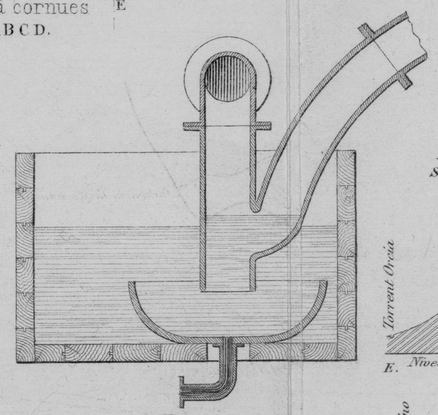


Fig. 3.

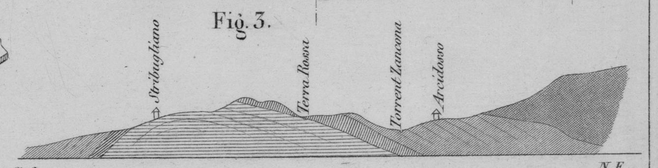


Fig. 4

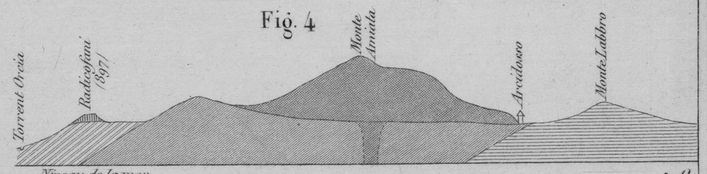
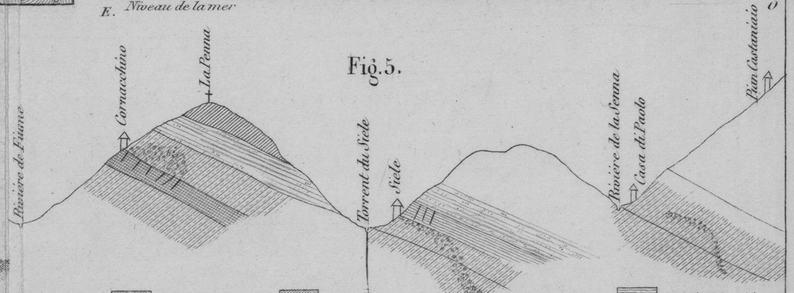
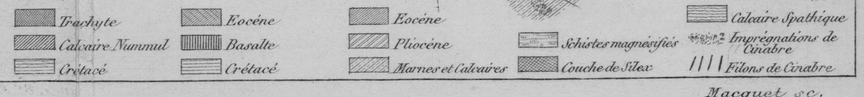


Fig. 5.





Annales des mines, 8e Série, Tome XIV. pages 95 et suiv.

Macquet sc.

EXPLOITATION

Fig. 1.
Coupe Verticale
en un point du Gite de Boryslaw

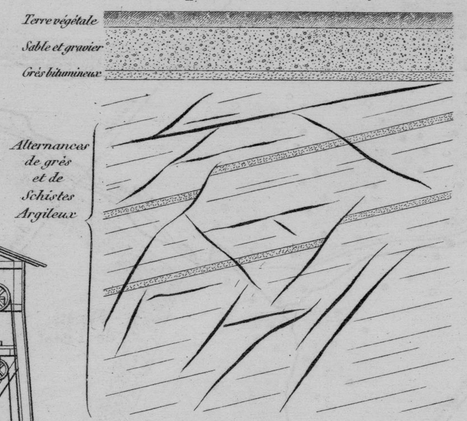


Fig. 2.
Plan du district petrolifère de Sloboda

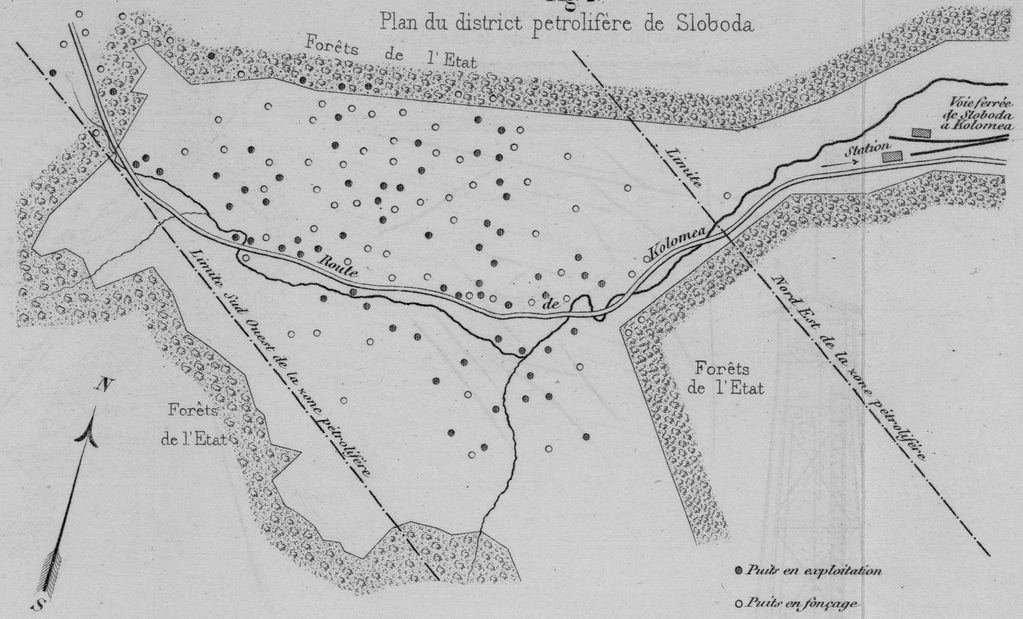


Fig. 4.
Glissière

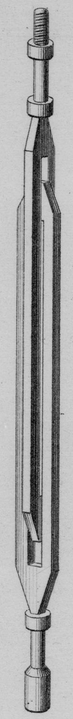


Fig. 5.
Tiges de
Sonde

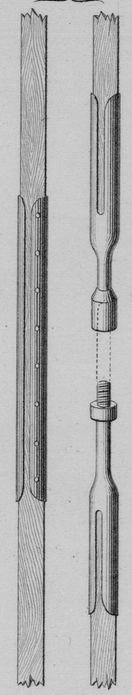


Fig. 6.
Assemblage
des Tubes

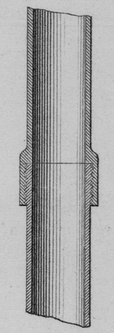


Fig. 7.
Vis d'allongement
de la tige

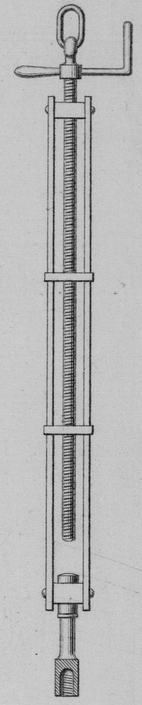


Fig. 3.
Appareil extérieur
d'un sondage rapide *(Système Canadien)*
à Sloboda.

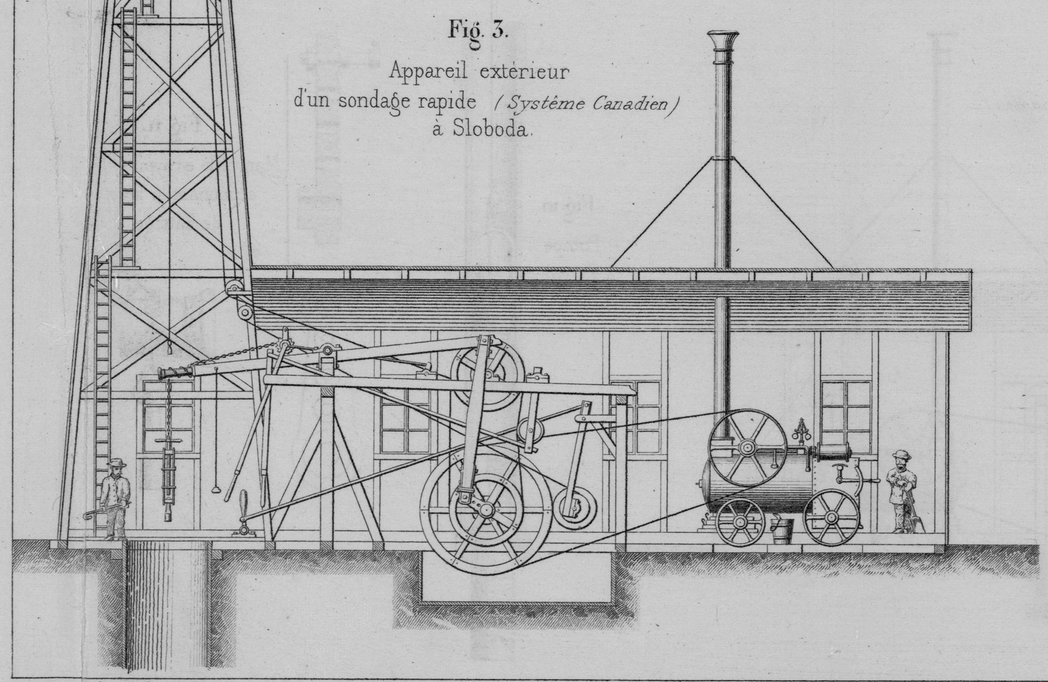
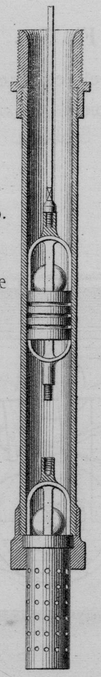


Fig. 10.
Pompe
à Pétrole



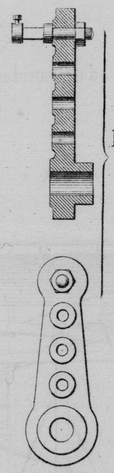


Fig. 11.
Manivelle à rayon variable
actionnant le levier
de battage

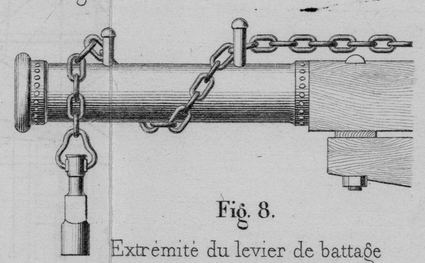


Fig. 8.
Extrémité du levier de battage
avec la chaîne d'allongement
de la tige.

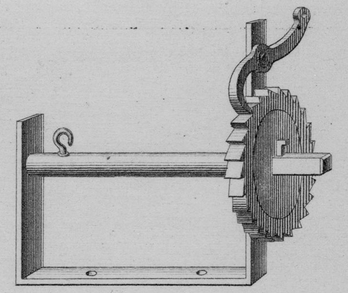


Fig. 9.
Treuil à cliquet
pour la manœuvre
de la chaîne d'allongement

Annales des mines, 8e Série. Tome XIV. pages 162 et suiv.

Macquet sc.

Fig.1

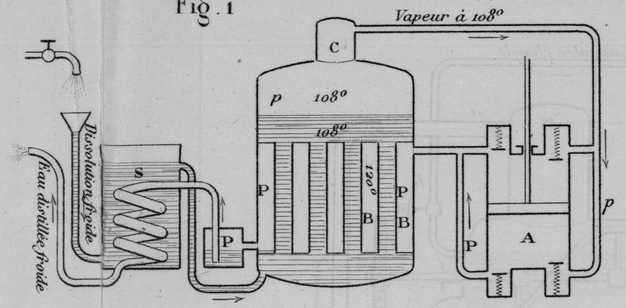


Fig.2

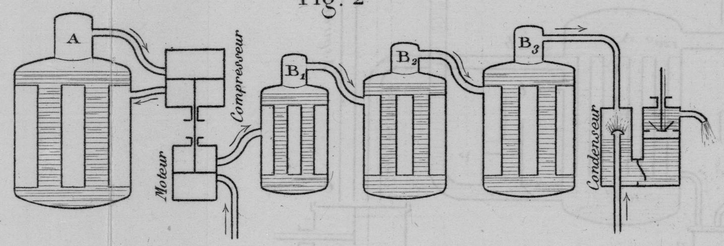


Fig.3

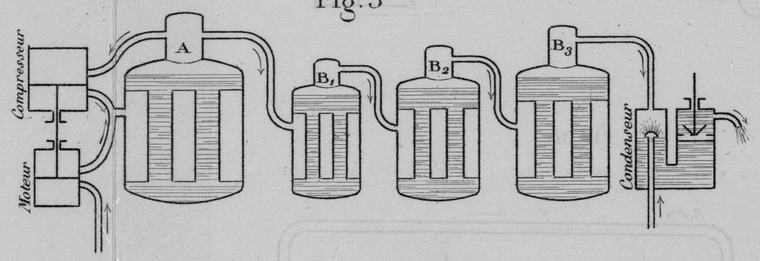


Fig.4

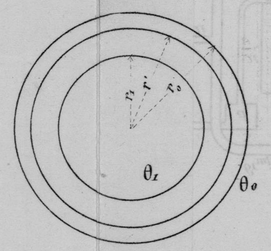


Fig.8

Coupe de la Croûte de schlot
grandeur naturelle

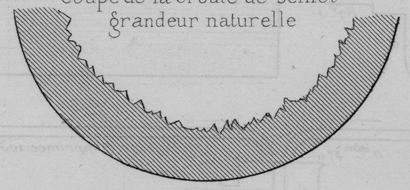


Fig.6

Croquis schematique de l'appareil Piccard à sel fin

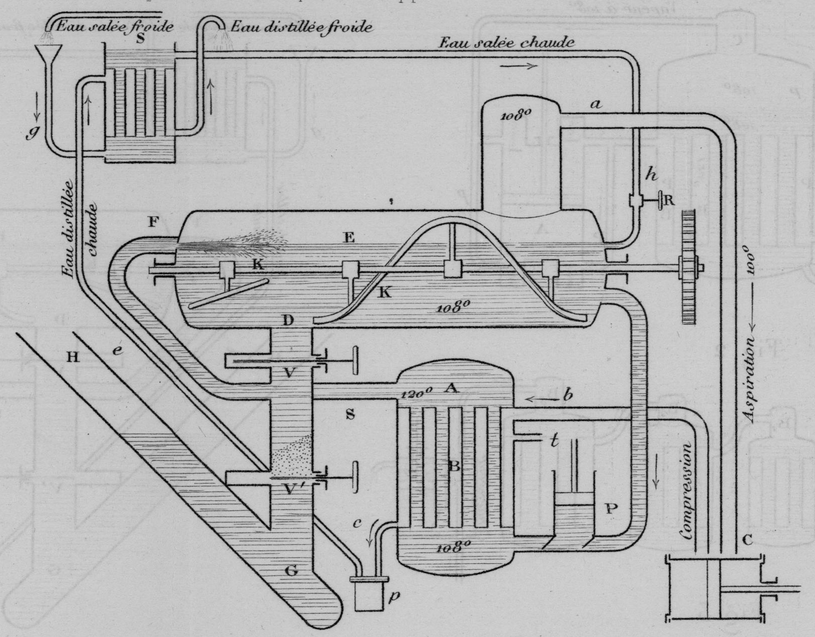


Fig.10

Croquis schématique de l'appareil Piccard à sel gros

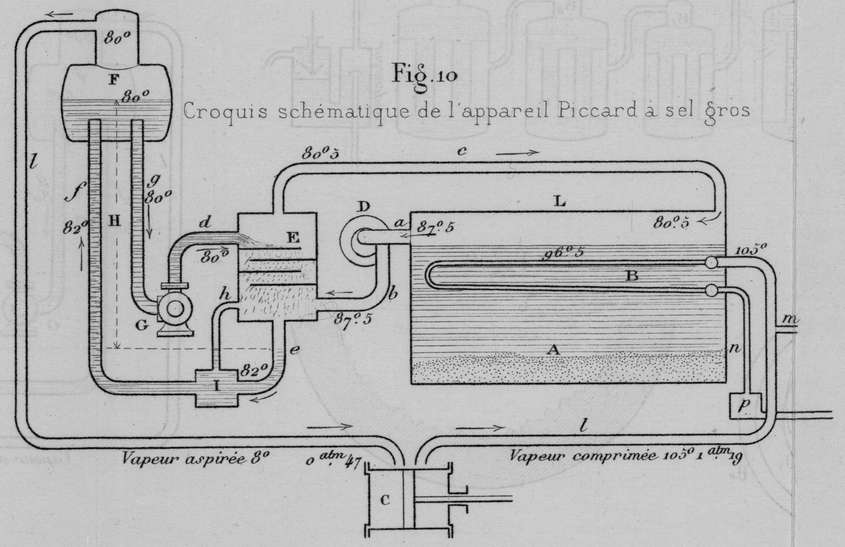


Fig.7

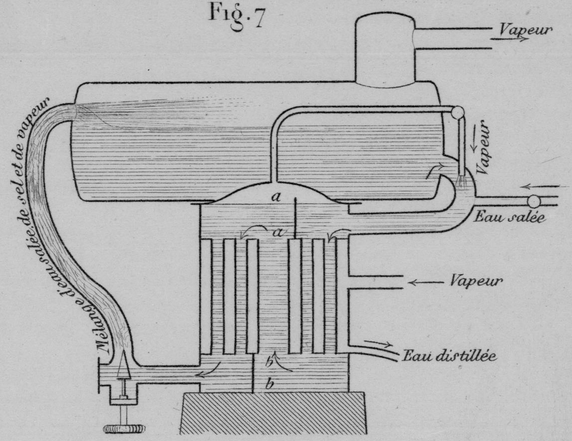


Fig.5

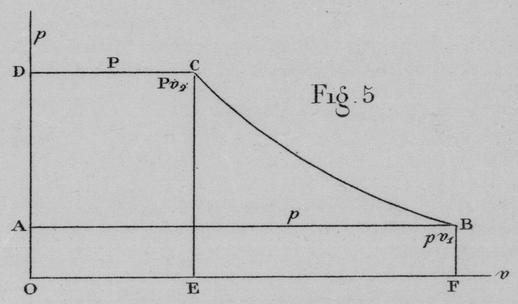
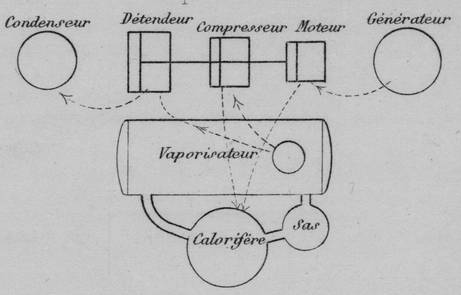


Fig.9

Disposition d'Ebensée



APPAREILS d'ÉVAPORATION Système PICCARD

de la SALINE de SALIES du SALAT

Appareil à sel fin

Fig.1. Elévation – Coupe.

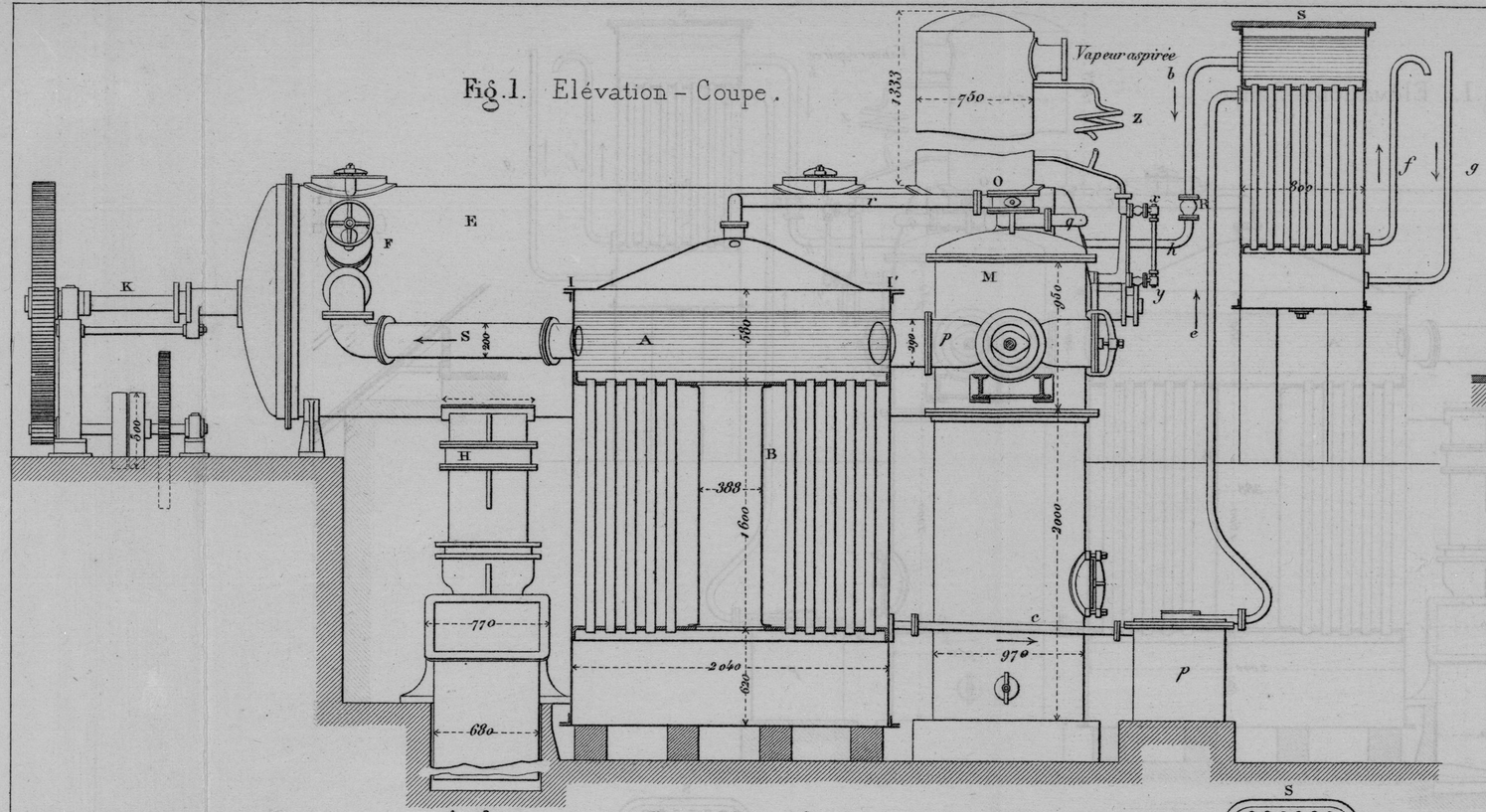


Fig 2
Coupe transversale

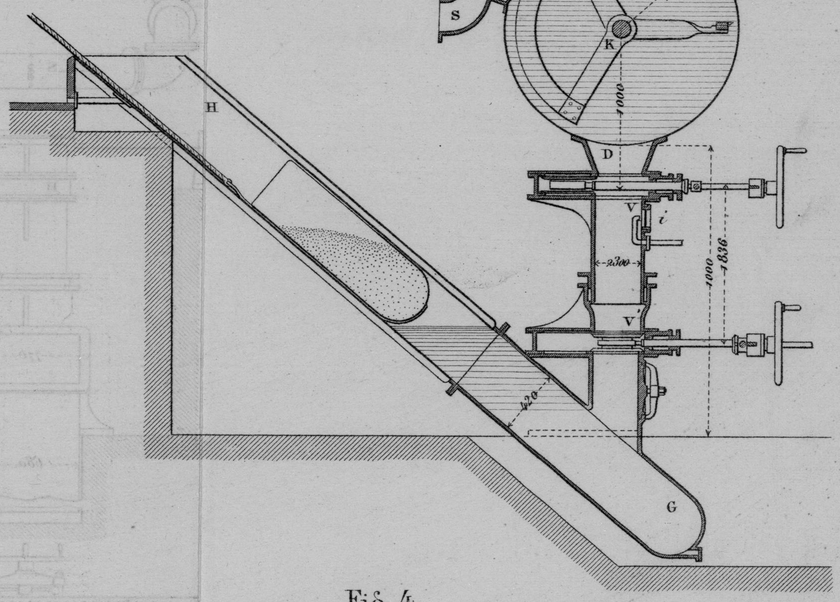


Fig 3. Plan – Coupe

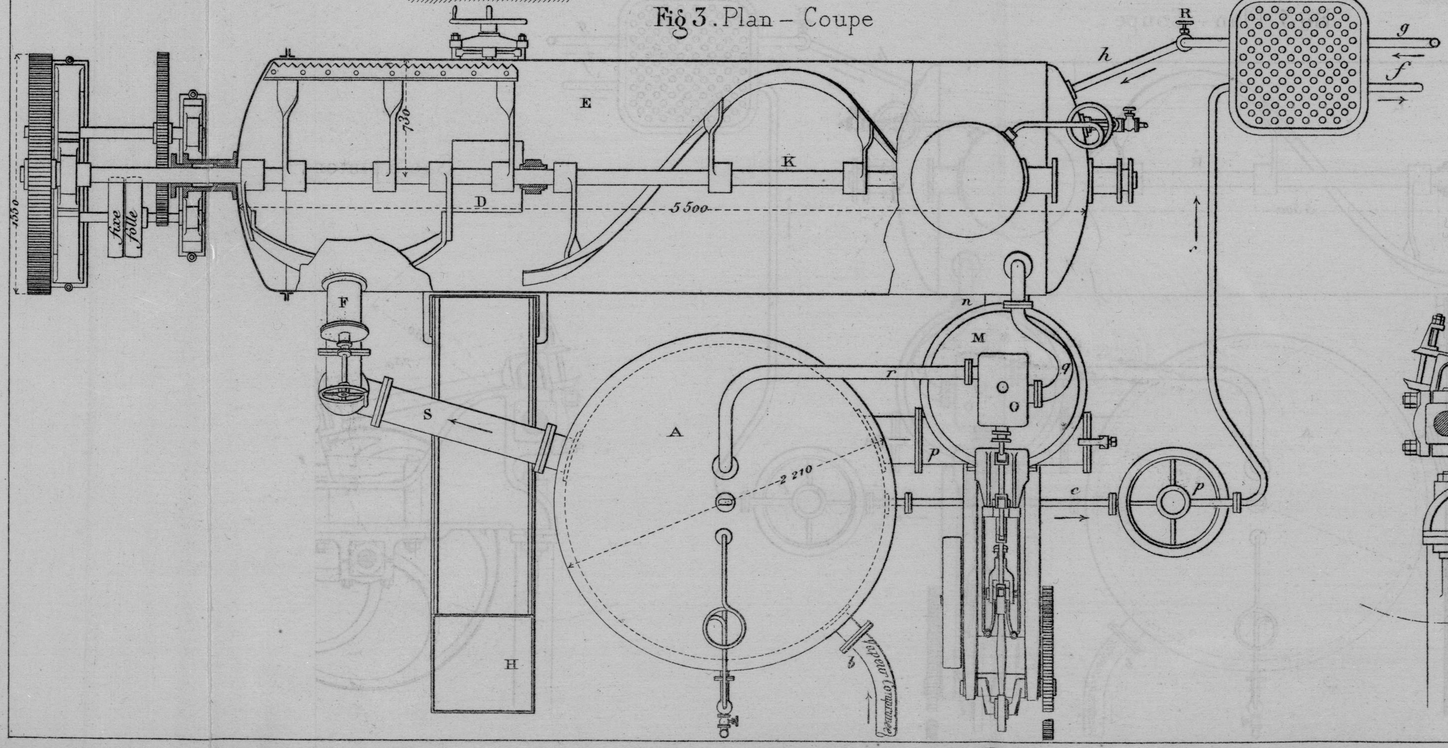
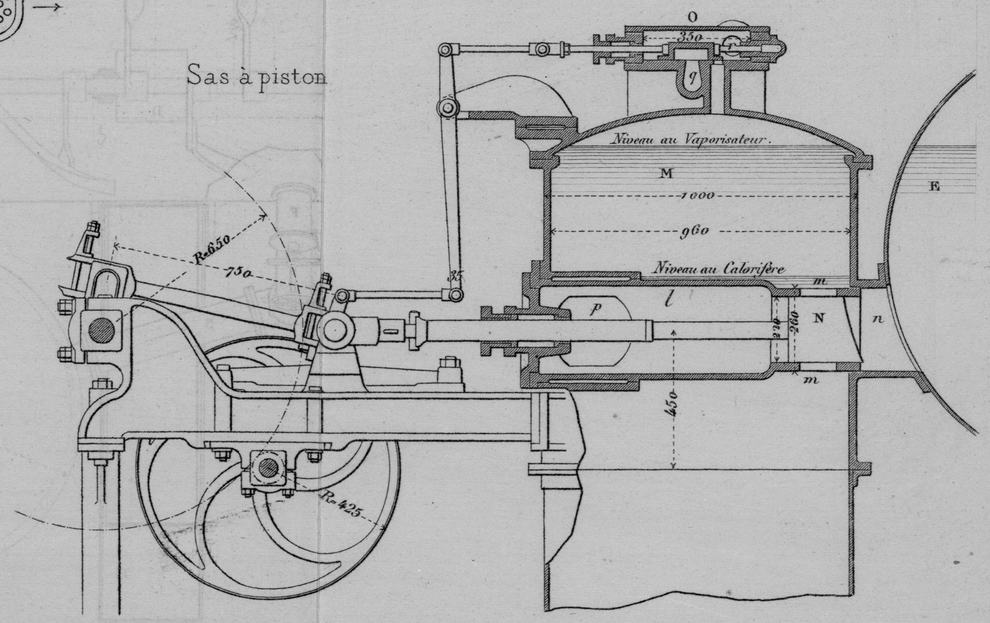


Fig 4

Sas à piston



Plan de la noix a

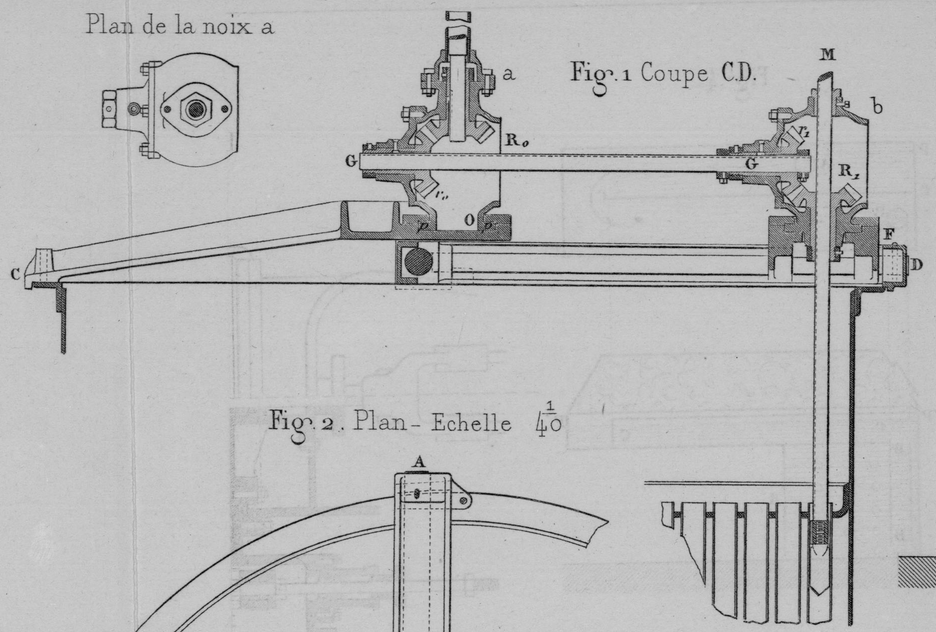


Fig. 1 Coupe C.D.

Fig. 2. Plan - Echelle $\frac{1}{40}$

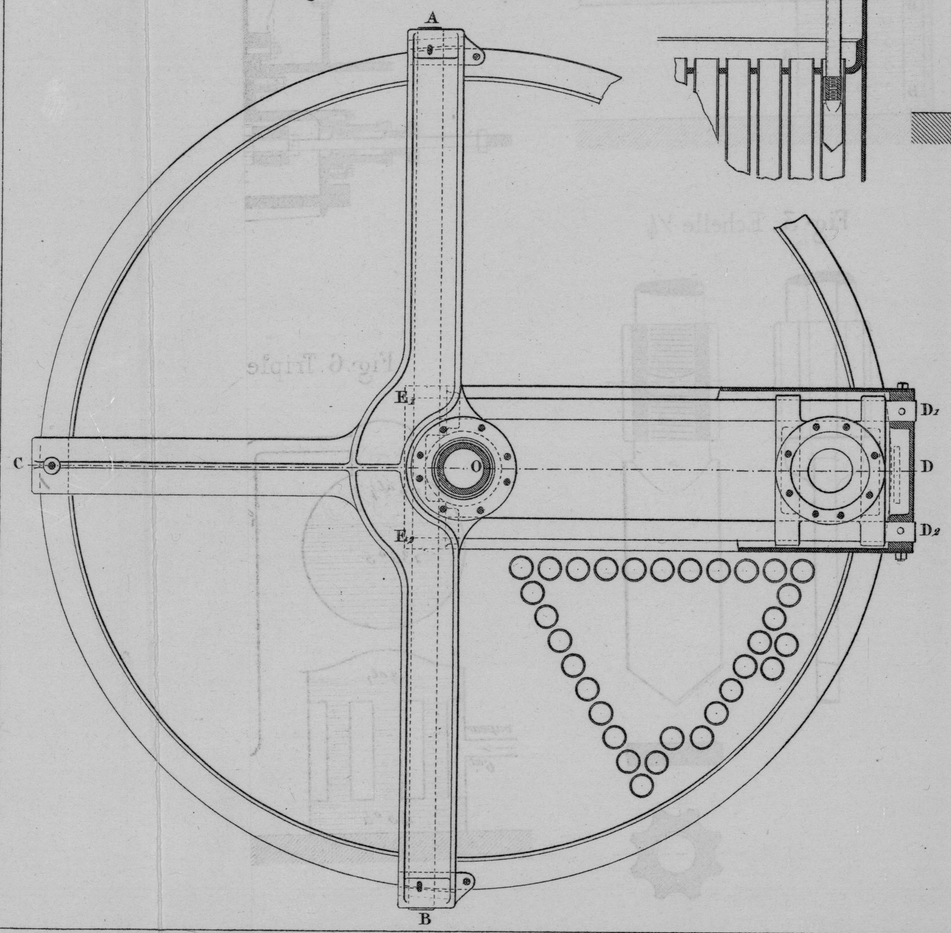


Fig. 4.

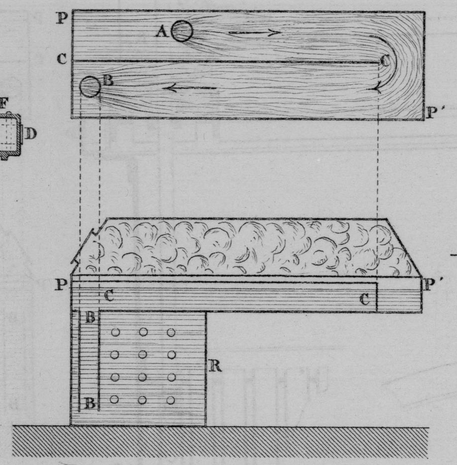


Fig. 3. Echelle 1/4

Fig. 5. Compresseur (Echelle 1/20)

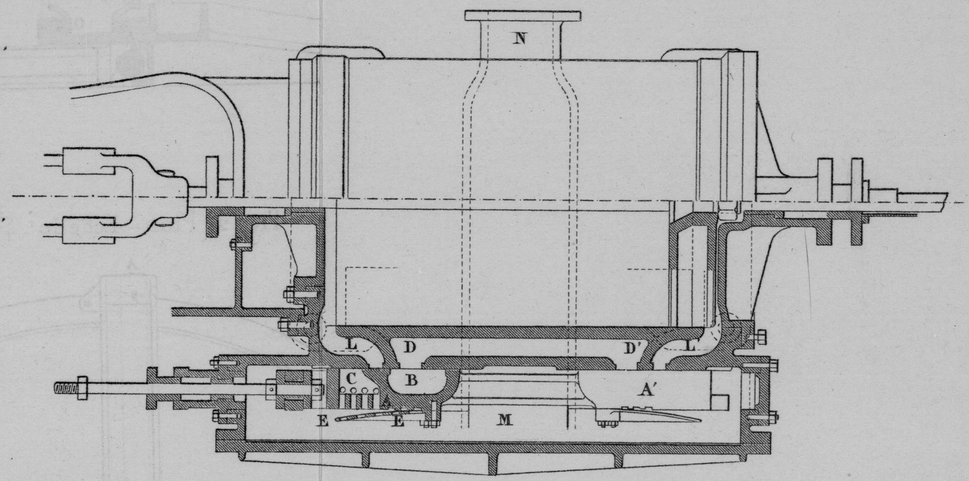
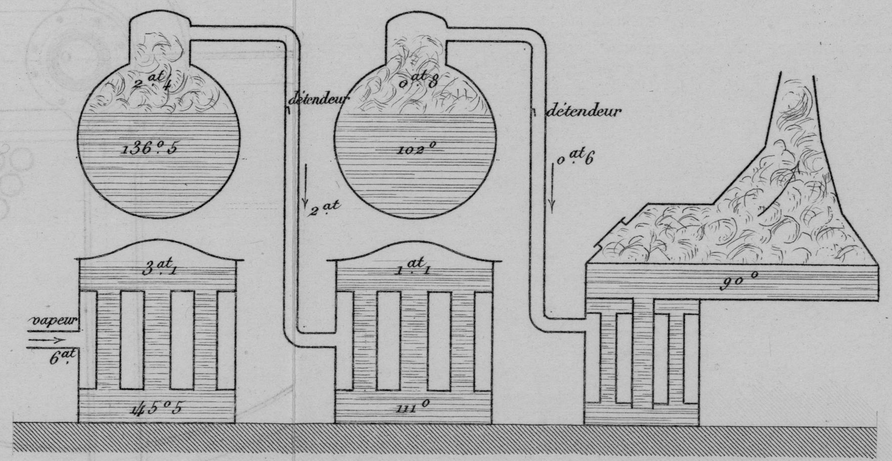


Fig. 6. Triple effet entre appareils Piccard et poële



APPAREILS D'ÉVAPORATION SYSTÈME PICCARD DE LA SALINE DE SALIES-DU-SALAT

Halle à sel gros.

Fig. 1. Coupe longitudinale

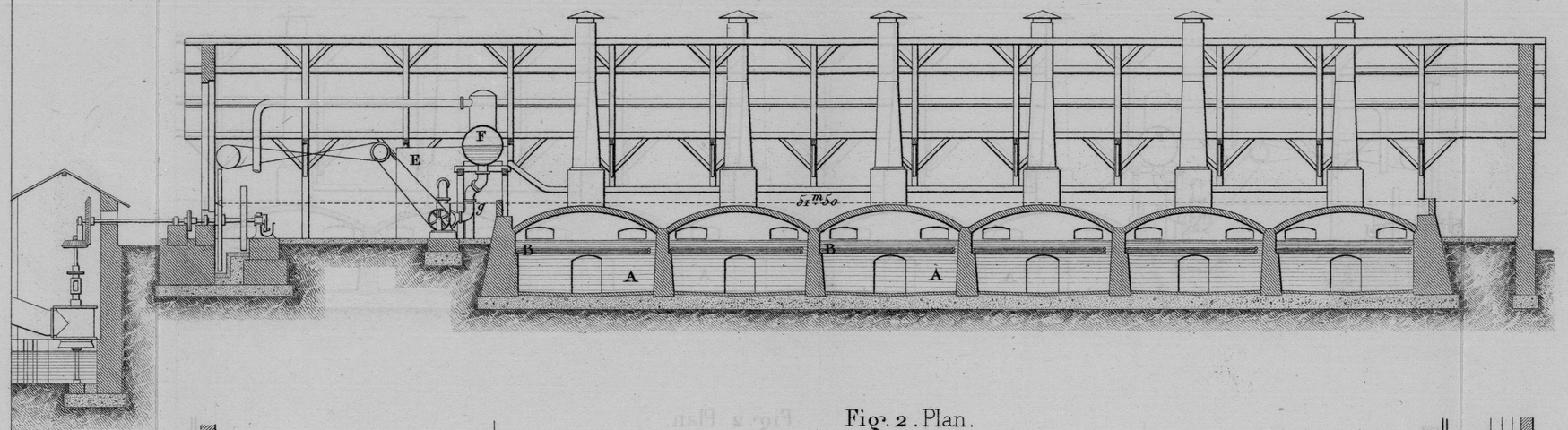


Fig. 2. Plan.

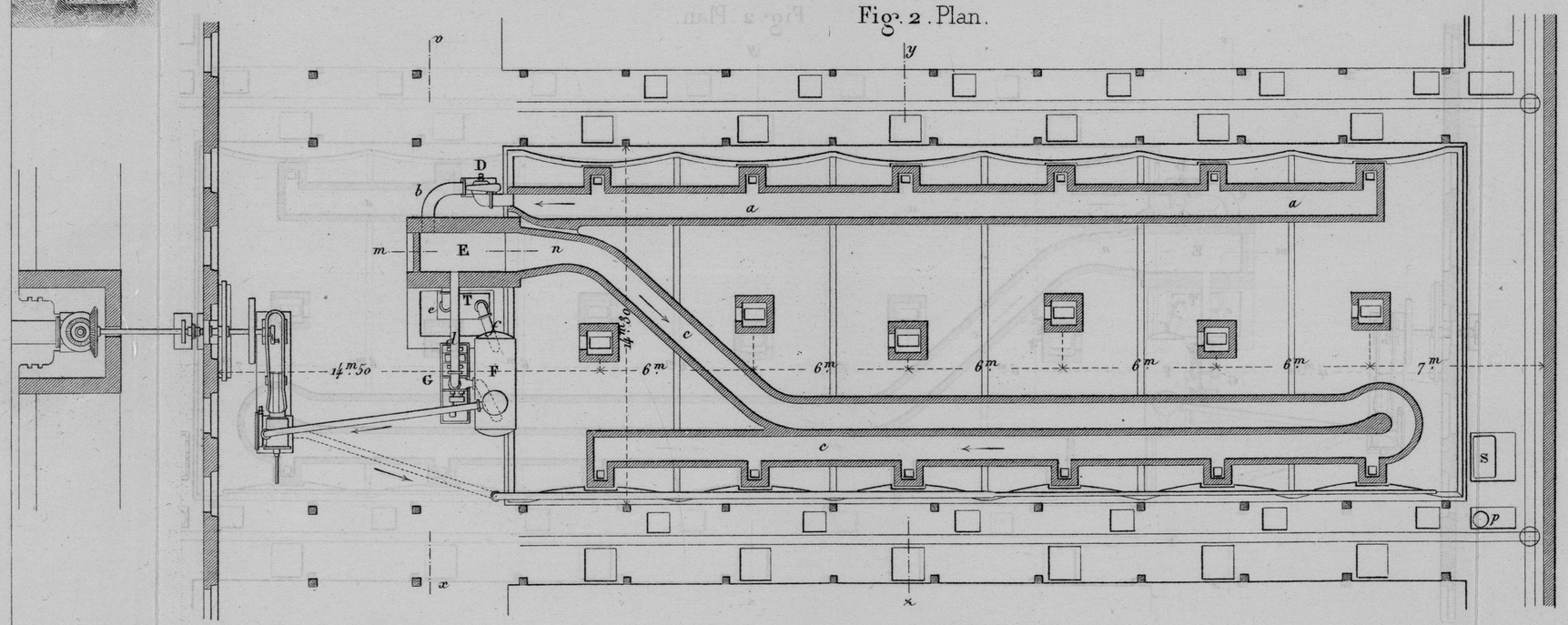


Fig. 4. Coupe transversale *y x*

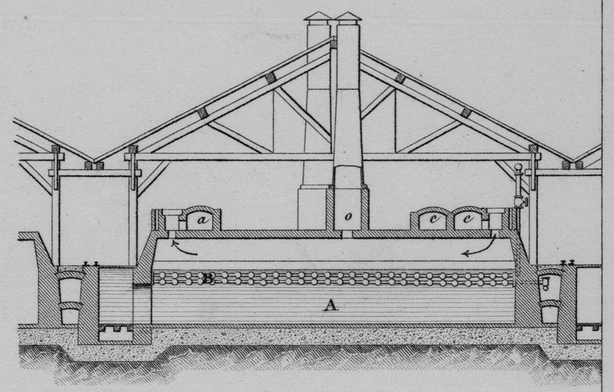


Fig. 3. Coupe transversale *v x*

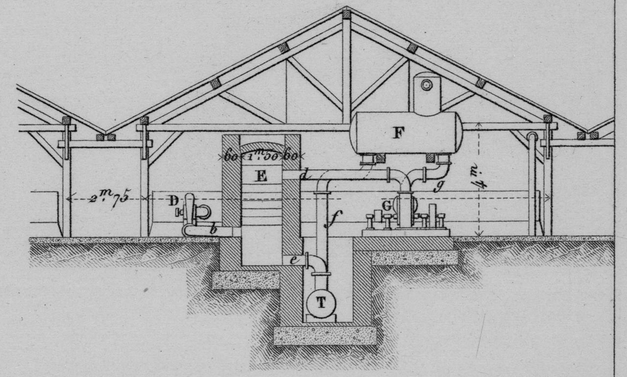
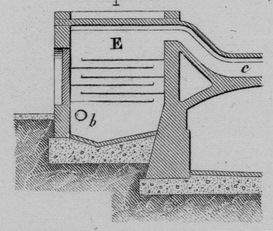


Fig. 5. Chambre à pluie
Coupe *mn*



Annales des Mines, 8e Série Tome XIV pages 377 et suiv.

Macquet sc.

APPAREIL D'EVAPORATION SYSTEME PICCARD DE LA SALINE DE SALIES DU SALAT

Halle à sel fin.

Echelle 1/200

Fig.1. Coupe longitudinale

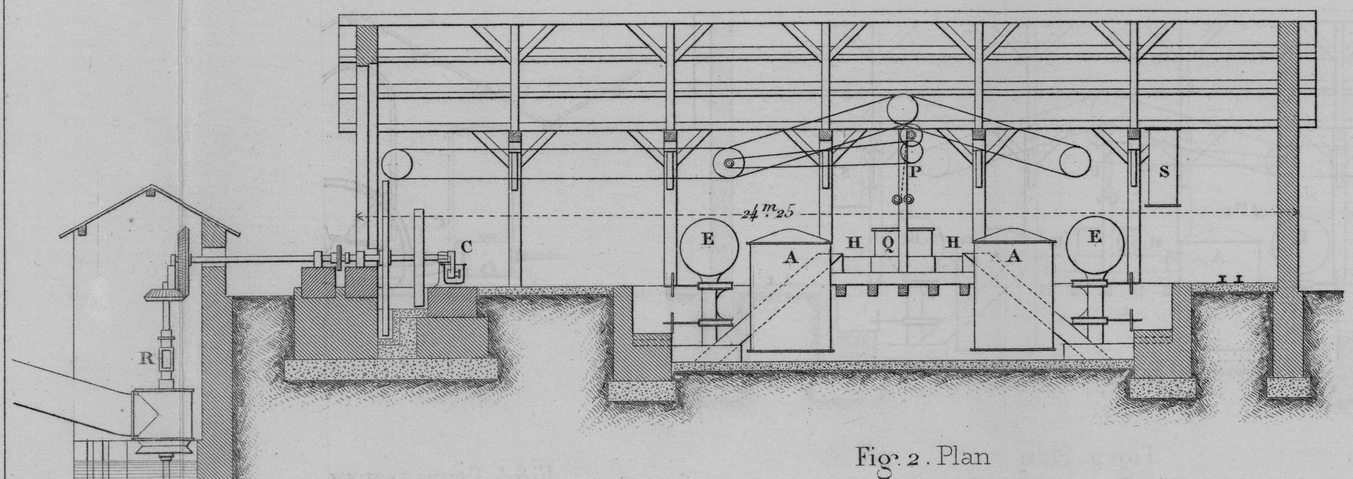


Fig.2. Plan

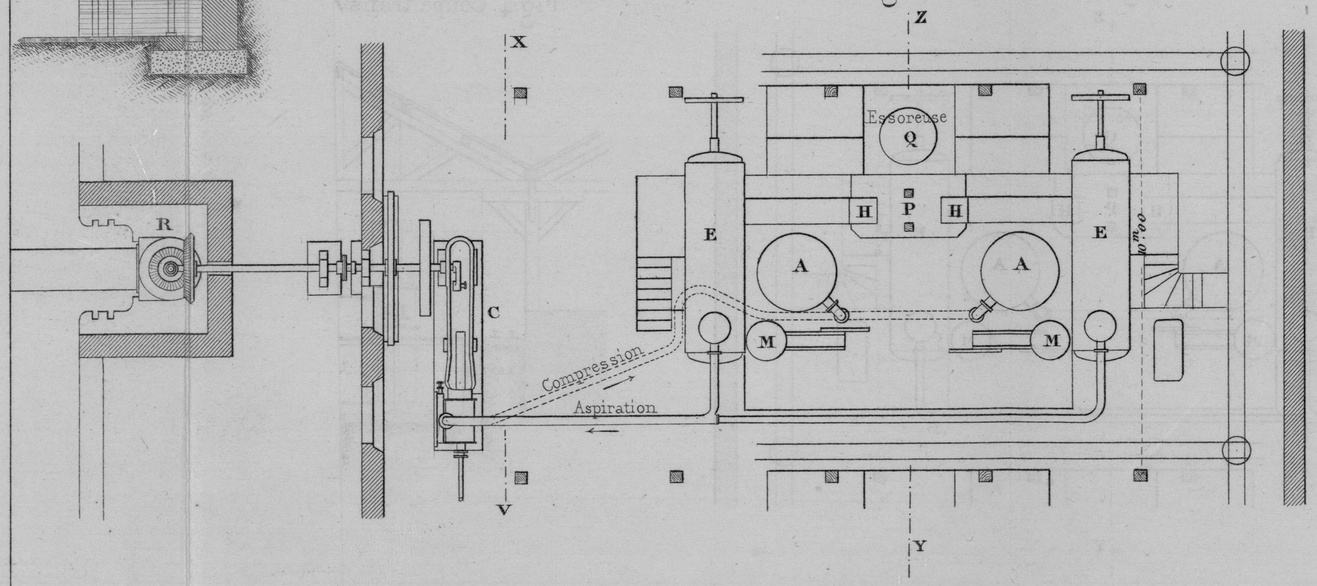


Fig.3. Coupe transversale suiv.t v.x.

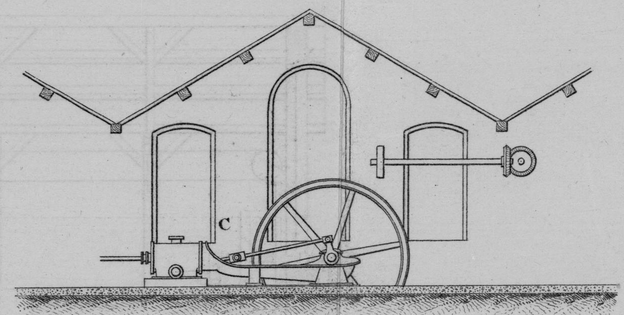


Fig.4. Coupe transversale suiv.t y.z.

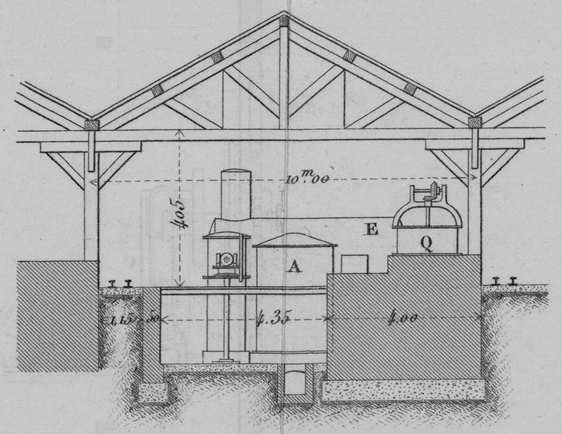


Fig.5.

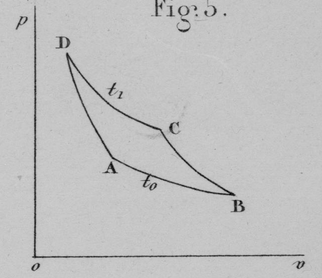


Fig.6.

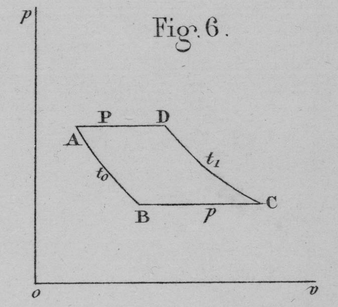
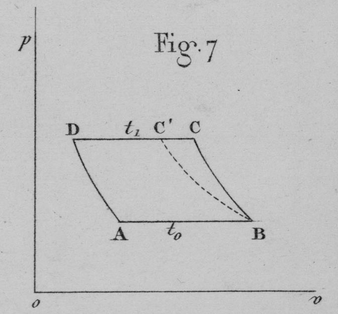


Fig.7



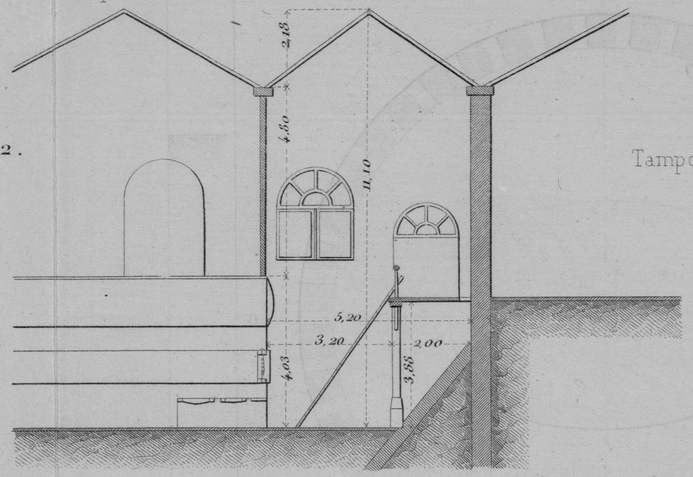
Annales des Mines, 8e Série T. XIV, pages 377 et suiv.

Macquet sc.

EXPLOSION DE CHAUDIÈRE.-MINÉRALURGIE.

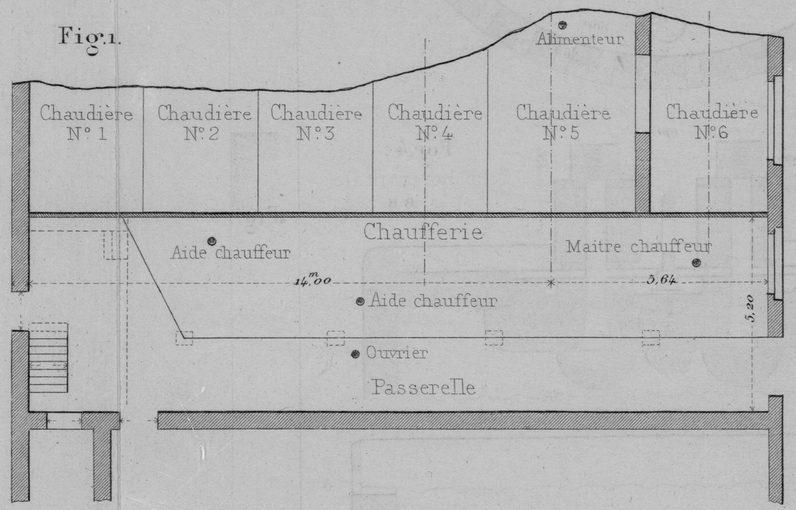
Coup transversale de la chaufferie

Fig. 2.



Plan de la Chaufferie

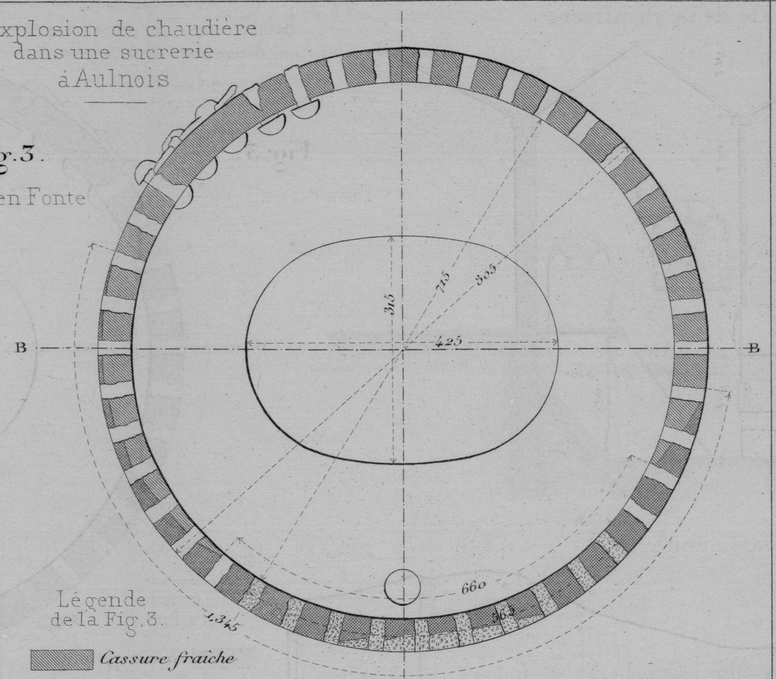
Fig. 1.



Explosion de chaudière dans une sucrerie à Aulnois

Fig. 3.

Tampon en Fonte



Légende de la Fig. 3.

- *Cassure fraiche*
- *id. preéxistante*
- *id. ancienne et entartrée*

Fig. 4.

Coupe horizontale par B B

Traitement des sels à Stassfurt

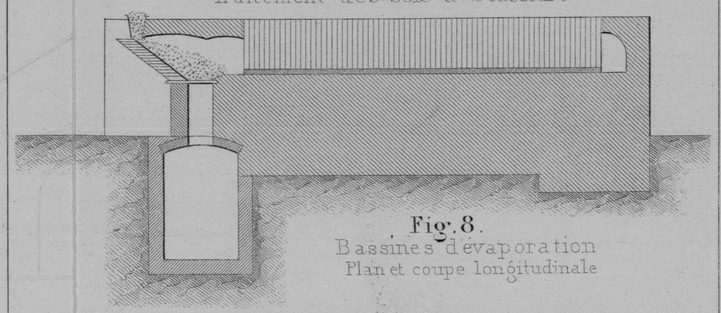


Fig. 8.

Bassines d'évaporation

Plan et coupe longitudinale

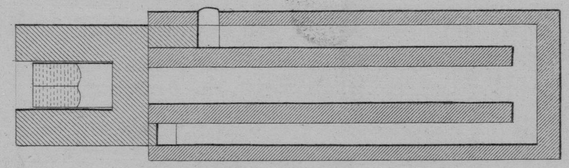


Fig. 9.

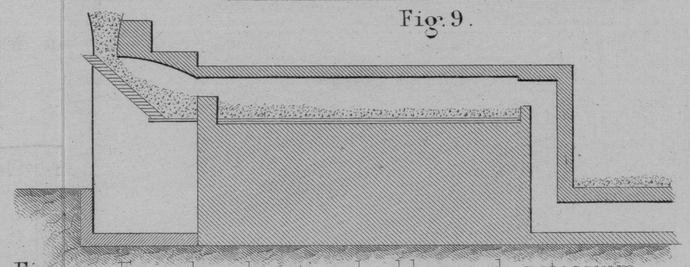


Fig. 10. Four de calcination du chlorure de potassium

Plan et coupe longitudinale

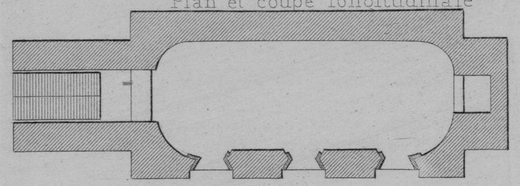


Fig. 11.

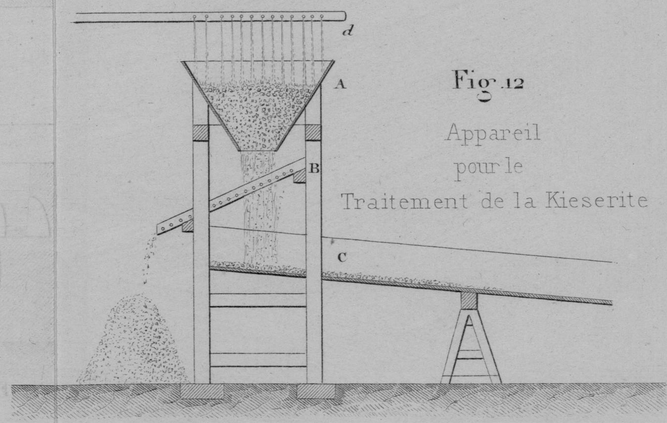


Fig. 12

Appareil pour le Traitement de la Kieserite

Bassines d'évaporation (Coupes transversales)

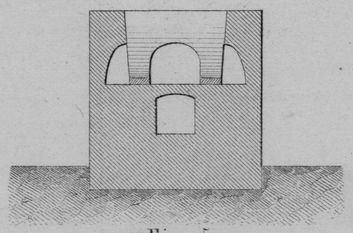


Fig. 5.

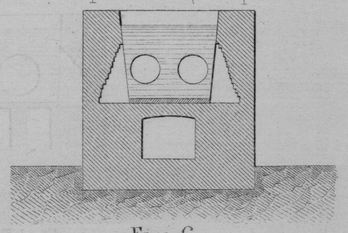


Fig. 6.

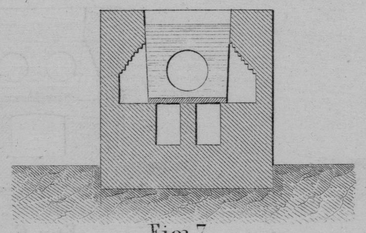


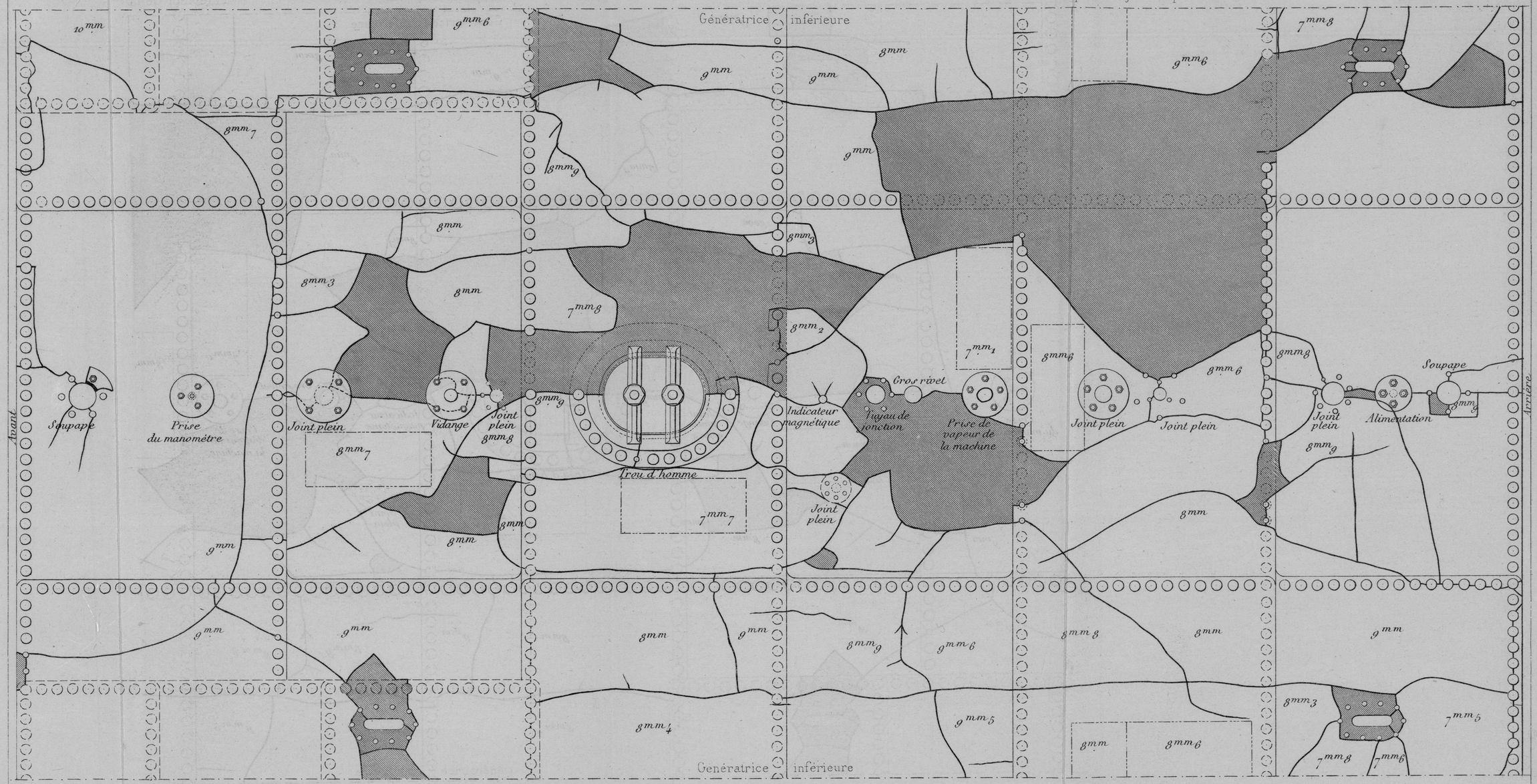
Fig. 7.

Annales des mines, 8 Serie Tome XIV, Pages 464 et suiv., pages 479 et suiv.

Macquet sc

Explosion de deux chaudières á Comines

Corps principal du Générateur N°1 Développement extérieur de la partie cylindrique. Échelle $\frac{1}{20}$



Fragments non retrouvés — Fragments restés adhérents aux bouilleurs — ○ Rivets de construction — ○ Rivets de réparations — ----- Contours des pièces rapportées — ------ Parties découpées pour servir aux essais de traction

Annales des Mines, 8e Série T. XIV, pages 516 et suiv.

Macquet sc.

EXPLOSION DE DEUX CHAUDIÈRES A COMINES

Fig. 1 Plan de l'Usine Éch. $\frac{1}{1000}$

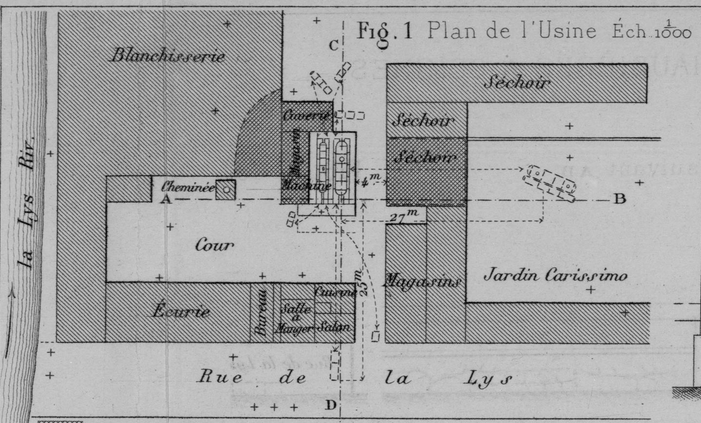


Fig. 2 Coupe verticale suivant AB
Échelle: $\frac{1}{500}$

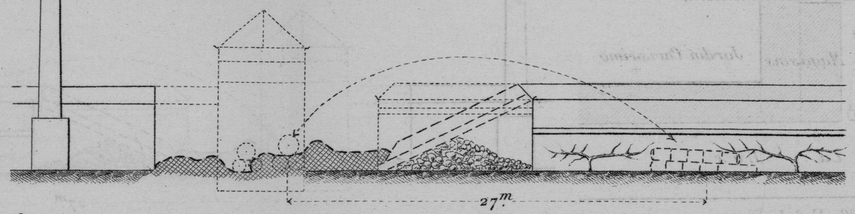
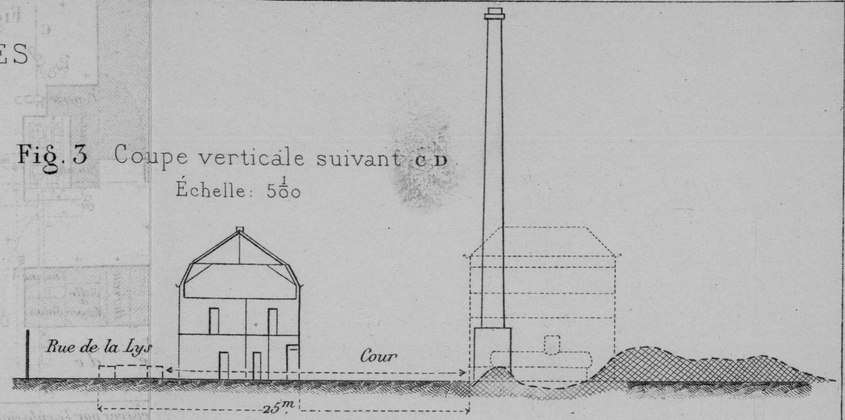
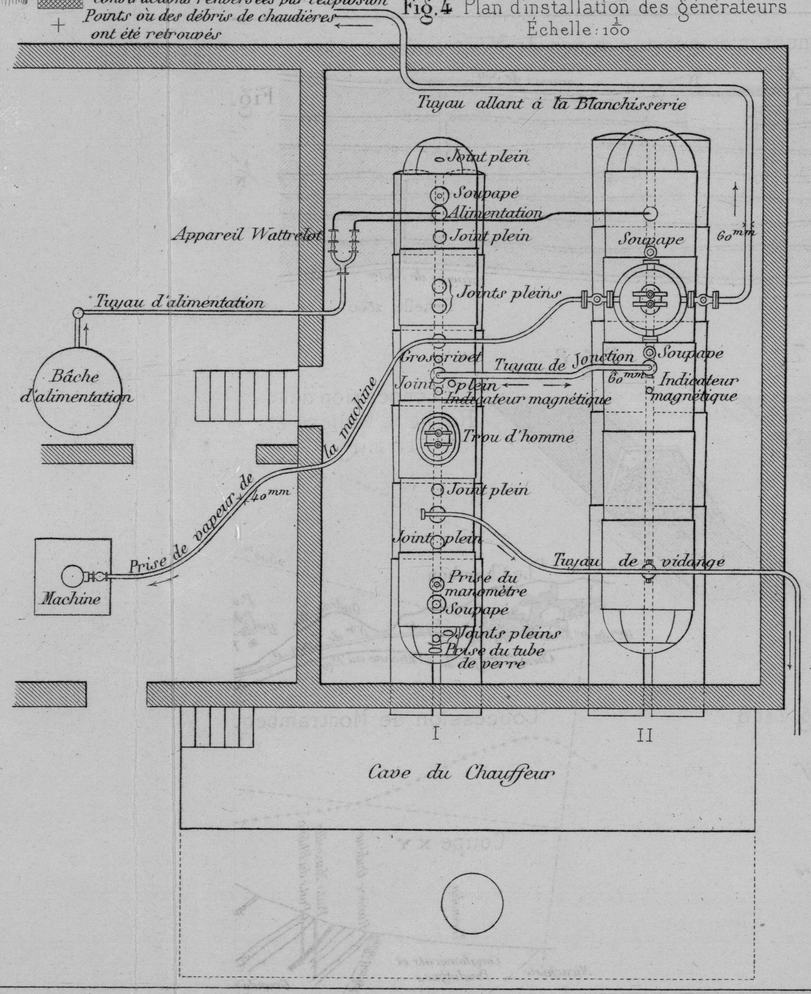


Fig. 3 Coupe verticale suivant CD
Échelle: $\frac{1}{500}$

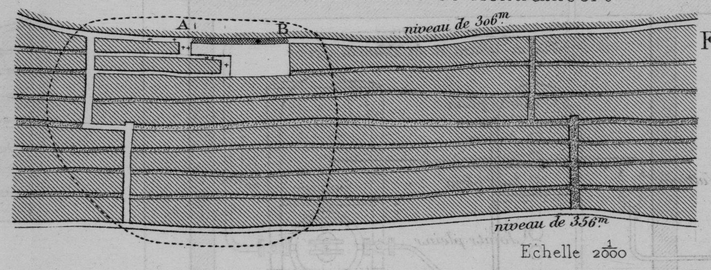


Constructions renversées par l'explosion
Points où des débris de chaudières ont été retrouvés

Fig. 4 Plan d'installation des générateurs
Échelle: $\frac{1}{100}$

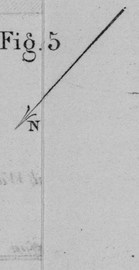


Effondrement intérieur aux mines de Montrambert



Echelle $\frac{1}{2000}$

Fig. 5



Légende de la Fig. 5

Charbon
Remblais
+ Positions occupées par les ouvriers
* Position de l'ouvrier blessé

Fig. 6

Fig. 7

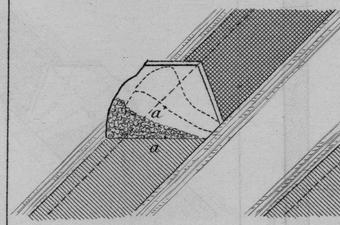
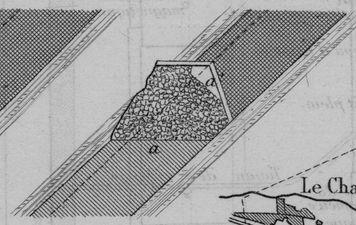


Fig. 8



Légende des Fig. 7 et 8

Charbon massif
Charbon écrasé
Remblais