



ANNALES

DES MINES.

ANNALES

DES MINES.

## COMMISSION DES ANNALES DES MINES.

Les ANNALES DES MINES sont publiées sous les auspices de l'administration générale des Ponts et Chaussées et des Mines, et sous la direction d'une commission spéciale formée par le Ministre des Travaux Publics. Cette commission est composée, ainsi qu'il suit, de membres du conseil général des mines, du directeur et des professeurs de l'École des mines, et d'un ingénieur remplissant les fonctions de secrétaire :

### MEMBRES DE LA COMMISSION.

Le Secrétaire général du Ministère fait partie de la Commission.

MM.	MM.
GRÜNER, inspecteur général des mines, président.	GUILLEBOT DE NERVILLE, inspecteur général.
ÉLIE DE BEAUMONT, inspecteur général en retraite, professeur à l'École des mines.	JACQUOT, inspecteur général.
FRANÇOIS, inspecteur général des mines.	DUPONT, ingénieur en chef, inspecteur de l'École des mines.
DU SOUCH, inspecteur général des mines.	BAYLE, ingénieur en chef, professeur à l'École des mines.
DAUBRÉE, inspecteur général, directeur de l'École des mines.	DELESSÉ, ingénieur en chef, professeur à l'École des mines.
COUCHE, inspecteur général, professeur à l'École des mines.	LAMÉ-FLEURY, ingénieur en chef, secrétaire du conseil général des mines.
HARLE, inspecteur général des mines.	LAN, ingénieur en chef, professeur à l'École des mines.
LEFÈVRE DE POURCEY, inspecteur général.	MALLARD, ingénieur, professeur à l'École des mines.
CALLON, inspecteur général, professeur à l'École des mines.	MOISSENET, ingénieur, professeur à l'École des mines, 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, secrétaire de la Commission des ANNALES DES MINES, 60, boulevard Saint-Michel, à Paris.

### Avis de l'Éditeur.

Les auteurs reçoivent *gratis* 15 exemplaires de leurs articles formant au moins une feuille d'impression. Ils peuvent faire faire des tirages à part à raison de 9 fr. par feuille jusqu'à 50, 10 fr. de 50 à 100, et 5 fr. 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 cahiers ou livraisons qui paraissent tous les deux mois. — Les six livraisons annuelles forment trois volumes, dont un consacré aux actes administratifs et à la jurisprudence. — Les deux volumes consacrés aux matières scientifiques et techniques contiennent de 70 à 80 feuilles d'impression, et de 18 à 24 planches gravées. — Le prix de la souscription est de 20 fr. par an pour Paris, de 24 fr. pour les départements, et de 28 fr. pour l'étranger.

PARIS. — IMPRIMERIE ARNOUS DE RIVIÈRE ET C<sup>o</sup>, RUE RACINE, 26.

# ANNALES DES MINES

OU

## RECUEIL

DE MÉMOIRES SUR L'EXPLOITATION DES MINES

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

RÉDIGÉES

PAR LES INGÉNIEURS DES MINES,

ET PUBLIÉES

SOUS L'AUTORISATION DU MINISTRE DES TRAVAUX PUBLICS.

SEPTIÈME SÉRIE.

MÉMOIRES. — TOME V.



PARIS.

DUNOD, ÉDITEUR,

LIBRAIRE DES CORPS DES PONTS ET CHAUSSÉES ET DES MINES,

Quai des Augustins, n° 49

1874

---

---

**BIBLIOGRAPHIE.**

---

**PREMIER SEMESTRE DE 1874.**

---

**OUVRAGES FRANÇAIS.**

---

*1° Mathématiques pures.*

ANDRÉ et RAYET. L'Astronomie pratique et les observatoires en Europe et en Amérique, depuis le milieu du xvii<sup>e</sup> siècle jusqu'à nos jours, par C. André et G. Rayet, astronomes adjoints de l'observatoire de Paris. 1<sup>re</sup> partie, Angleterre, in-12, x-180 pages. (3644)

DUBOIS. Les Passages de Vénus sur le disque solaire, considérés au point de vue de la détermination de la distance du soleil à la terre. Passage de 1874. Notions historiques sur les passages de 1761 et 1769; par Edmond Dubois, examinateur-hydrographe de la marine. In-12, xi-255 p. 5',50. (11053)

JACQUIER. De l'esprit des mathématiques supérieures. Premiers principes de la géométrie analytique, du calcul différentiel et du calcul intégral, appliqués aux lois de la pesanteur et de l'attraction universelle; par Edme Jacquier, professeur de l'Université. In-8°, 154 p. (4511)

LAURENT. Théorie des équations différentielles, ordinaires, simultanées; par H. Laurent, répétiteur à l'École polytechnique. In-8°, 51 p. (8686)

*2° Physique et chimie.*

ABBADIE (d'). Observations relatives à la physique du globe faites au Brésil et en Éthiopie; par Antoine d'Abbadie, membre de l'Institut. Rédigées par R. Radau. Avec une planche. In-4°, IV-202 p. (8983)

- Bulletin de la Société chimique de Paris, comprenant le compte rendu des travaux de la Société et l'analyse des mémoires de chimie pure et appliquée publiés en France et à l'étranger. Année 1872, 1<sup>er</sup> et 2<sup>e</sup> semestre; nouvelle série, t. XVII et XVIII. In-8°, VIII-1186 p. 15 fr. (1776)
- DUBRUNFAUT. L'Osmose et ses applications industrielles, ou méthode d'analyse nouvelle appliquée à l'épuration des sucres et des sirops; par Dubrunfaut. In-8°, XXVII-250 p. et 1 pl. (8646)
- LECHARTIER. Cours de chimie agricole professé en 1872; par M. G. Lechartier. In-12, 180 p. (7038)
- LECOQ DE BOISBAUDRAN. Spectres lumineux. Spectres prismatiques et en longueurs d'ondes destinés aux recherches de chimie minérale; par M. Lecoq de Boisbaudran. Gr. in-8°, VI-207 p. et atlas de 29 pl. 20 fr. (4555)
- MIRIEL. Télégraphe Hughes. Album de 22 planches, contenant 79 figures dont quatre vues d'ensemble de l'appareil en demi-grandeur, en plan, élévation, profil et vue perspective, et toutes ses pièces de détail en grandeur naturelle; suivi d'un texte explicatif; par G. Miriel, professeur de dessin à Brest. In-4°, 55 p. et 22 pl. 12<sup>f</sup>,50. (904)
- PLAZANET (de). Hydroplastie, électro-chimie, galvanoplastie, dorure et argenture; par M. A. de Plazanet. Avec 47 figures dans le texte. In-8°, 63 p. 4 fr. (7941)
- Traité pratique de la déviation du compas à bord des navires en fer. Manuel à l'usage des capitaines et des candidats au long cours et au cabotage. Traduit de l'anglais et publié avec l'autorisation du ministre de la marine, par A. Frickmann, lieutenant de vaisseau, In-8°, VIII-68 p. et pl. 2<sup>f</sup>,50. (8756)
- TYNDALL. Les Glaciers et les transformations de l'eau; par J. Tyndall, professeur à l'Institution royale de la Grande-Bretagne; suivis d'une conférence sur le même sujet par M. Helmholtz, avec la réponse de M. Tyndall. Ouvrage illustré de nombreuses figures dans le texte et de 8 planches tirées à part sur papier teinté. In-8°, 268 p. 6 fr. (1537)
- VINCENT. Carbonisation des bois en vases clos et utilisation des produits dérivés; par Camille Vincent, ingénieur. In-8°, IV-156 p. (7988)
- 3° Géologie, minéralogie, métallurgie.
- BRETON Étude géologique du terrain houiller de Bourges; par Ludovic Breton, ingénieur de la compagnie d'Auchy-au-Bois. In-8°, 74 p. et 12 pl. (10980)

- COLLENOT. Description géologique de l'Auxois; arrondissement de Semur (Côte-d'Or), d'Avallon (Yonne), d'une partie du Morvan, etc. Stratigraphie, paléontologie, géogénie; par J. J. Collenot, membre de la Société géologique de France. In-8°, XX-660 p. et 1 tableau. (6418)
- CONTEJEAN. Éléments de géologie et de paléontologie; par Ch. Contejean, professeur à la Faculté des sciences de Poitiers. Avec 467 fig. intercalées dans le texte. In-8°, XX-747 p. 16 fr. (3487)
- GAUDRY. Animaux fossiles du Mont-Léberon (Vaucluse). Étude sur les vertébrés; par Albert Gaudry. Étude sur les invertébrés; par P. Fischer et R. Tournouër; livraisons 2 à 4 (fin). In-4°, 55-180 p. et 16 pl. Chaque livraison, 7 fr. (666)
- GRAD. Considérations sur la géologie et le régime des eaux du Sahara algérien; par Charles Grad, de la Société de géographie. In-8°, 32 p. (6248)
- LAMAIRESSÉ. Études hydrologiques sur les monts Jura. Mémoire; par M. Lamairesse, ingénieur en chef des ponts et chaussées. In-4°, 176 p. et pl. 20 fr. (2661)
- MOISSENET. Études sur les filons du Cornwall. Parties riches des filons. Structure de ces parties et leur relation avec les directions des systèmes stratigraphiques; par M. L. Moissenet, ingénieur des mines, professeur à l'École des mines. In-4°, 158 p. et atlas de 11 pl. 15 fr. (510)
- ROLLAND-BANÈS. Notice sur la recherche de la houille dans le département de la Seine-Inférieure, publiée en vertu du vote émis par le conseil général, dans sa séance du 25 avril 1875; par Louis Rolland-Banès, ingénieur civil des mines. In-1<sup>o</sup>, 63 p. et 4 pl. fotogr. (10190)
- SAPORTA (de). Notice sur les plantes fossiles du niveau des lits à poissons de Cerin; par le comte G. de Laporta. In-8°, 62 p. et 2 pl. (5191)
- 4° Mécanique appliquée. — Exploitation et droit des mines.
- BURAT. Supplément au Cours d'exploitation des mines; par Amédée Burat, professeur à l'École centrale des arts et manufactures. In-8°, 116 p. et 20 pl. (2567)
- CALLON. Cours professés à l'École des mines de Paris; par M. J. Callon, inspecteur général des mines, 1<sup>re</sup> partie: Cours de machines. T. I, in-8°, VIII-582 p. et atlas de 34 pl. (7776)
- CALLON. Cours professés à l'École des mines de Paris; par M. J. Cal-

- lon, inspecteur général des mines. 2<sup>e</sup> partie : Cours d'exploitation des mines. T. I, in-8°, XII-499 p. et atlas de 40 pl. (618)
- COLLIGNON. Les Machines; par Édouard Collignon. Ouvrage illustré de 82 vignettes par Bonnafox, Jahandier et Marie. In-18 Jésus, 332 p. 2',25. (11005)
- ÉVRARD. Les moyens de transport appliqués dans les mines, les usines et les travaux publics, organisation et matériel; par Alfred Évrard, ingénieur de la compagnie des forges de Châtillon et de Commentry. 5<sup>e</sup> livraison. T. II. 1<sup>re</sup> partie. In-8°, 292 p. et 32 pl. (2324)
- GIRAULT. Cinématique. De la transmission de l'accélération par contact immédiat entre corps solides mobiles autour d'axes concourants ou parallèles; par Ch. Girault, professeur à la Faculté des sciences. In-8, 26 p. et pl. (5824)
- MALLET. Étude sur les nouvelles machines à vapeur marines. 1<sup>re</sup> partie : Économie de combustible réalisée dans les machines à vapeur marines, par l'emploi de la détente dans les cylindres séparés, et de la haute pression; par Frederick J. Bramwell. Traduite par A. Mallet, ingénieur. 2<sup>e</sup> partie : Étude sur les machines Compound; par A. Mallet. Accompagnée de quatre grandes planches. In-8°, 103 p. et 4 pl. 5 fr. (9645)
- MAREY. La Machine animale. Locomotion terrestre et aérienne; par E. J. Marey, professeur au Collège de France, membre de l'Académie de médecine. Avec 117 fig. dans le texte. In-8°, x-299 p. 6 fr. (1445)
- MASTAING (de). Cours de mécanique appliquée à la résistance des matériaux; leçons professées à l'École centrale des arts et manufactures de 1862 à 1872; par M. L. de Mastaing, ingénieur des arts et manufactures, professeur. Rédigées par M. G. Courtès-Lapeyrat, ingénieur, répétiteur du cours. In-8°, VII-351 p. et 2 pl. 15 fr. (5349)
- Note sur le condenseur à surface de M. Barreau-Pinchon, constructeur à Amiens (Somme). Principe et construction du condenseur à surface. Économie de 40 p. 100 sur le combustible, de 80 p. 100 sur l'eau de circulation. La condensation par surface est indispensable pour toutes machines à vapeur. In-8°, 24 p. et pl. (11156)
- POCHET. Nouvelle mécanique industrielle. Les Machines à vapeur, à air chaud, à gaz, à air comprimé, les injecteurs à vapeur, la nouvelle contre-vapeur, les chaudières à vapeur, nouvelles tables pratiques; par M. Léon Pochet, ingénieur des ponts et chaussées. In-8°, VIII-109 p. et 1 pl. (7942)

- PONCELET. Cours de mécanique appliquée aux machines; par J. V. Poncelet. Publié par M. Kretz, ingénieur en chef des manufactures de l'État. In-8°, XXI-520 p. et 2 pl. (11186)

5<sup>o</sup> *Constructions. — Chemins de fer.*

- Annuaire du bâtiment, des travaux publics et des arts industriels; par E. Sageret. 5',50. (1741)
- COUCHE. Voie. Matériel et exploitation technique des chemins de fer. Ouvrage suivi d'un appendice sur les travaux d'art; par M. Ch. Couche, inspecteur général des mines. T. II. 2<sup>e</sup> fascicule. Traction. In-8°, 249-884 p. et pl. 18 à 109. (31)
- NADAULT DE BUFFON. Hydraulique agricole. Des alluvions modernes, comprenant de nouveaux documents sur les travaux de colmatage et de limonage ainsi que des notions générales sur les alluvions marines et leurs principales utilisations; par Nadauld de Buffon, ingénieur en chef. In-8°, 255 p. (8138)
- PIARRON DE MONDÉSIR. Calculs des ponts métalliques à poutres droites et continues; par Piarron de Mondésir, ingénieur en chef des ponts et chaussées. 2<sup>e</sup> édition, revue et augmentée. In-4° VI-78 p. et 7 pl. (8155)
- TROMENEC (de). Étude sur le réseau de chemins de fer français considéré comme moyen stratégique; par Louis de Tromenec, capitaine commandant la 9<sup>e</sup> batterie du 20<sup>e</sup> régiment d'artillerie. Avec carte. In-8°, 76 p. 2',50. (7135)
- WIBROTTE. Construction et destruction des chemins de fer en campagne; par M. Wibrotte, lieutenant au 47<sup>e</sup> de ligne. 2<sup>e</sup> édition. In-8°, 40 p. 1',50. (2215)

6<sup>o</sup> *Sujets divers.*

- Agenda Oppermann. à l'usage des ingénieurs, architectes, agents voyers, conducteurs de travaux, mécaniciens, industriels, entrepreneurs. 1874. In-18, 197 p. et pl. (11252)
- Agenda d'état-major à l'usage des officiers-élèves de l'École d'application. 7<sup>e</sup> édition. In-18, XII-398 p. (2738)
- ALCAN. Fabrication des étoffes. Traité du travail des laines peignées, de l'alpaga, du poil de chèvre, du cachemire, etc. Notions historiques, épuration, préparations, peignage, filature, retordage et moulinage des fils, tissage et apprêts des étoffes rases et façonnées, établissement d'une usine et des prix de revient; par M. Alcan, ingénieur, professeur de filature et de tissage. In-8°, XI-679 p. et atlas de 41 pl. 40 fr. (6144)

- BERT. Recherches expérimentales sur l'influence que les modifications dans la pression barométrique exercent sur les phénomènes de la vie; par M. Paul Bert, professeur à la Faculté des sciences de Paris, directeur du laboratoire de physiologie expérimentale à la Sorbonne. In-8°, 174 p. et 8 pl. (2022)
- Dictionnaire industriel à l'usage de tout le monde, ou les 100,000 secrets et recettes de l'industrie moderne, comprenant les arts et métiers, les mines, l'agriculture, etc.; par MM. les rédacteurs des Annales du génie civil. E. Lacroix, ingénieur civil, directeur de la publication. In-18, Jésus. 20 fr. (5808)
- Exposition universelle de 1873, à Vienne (Autriche). Algérie. Catalogue spécial accompagné de notices sur les produits agricoles et industriels de l'Algérie. In-8°, VIII-186 p. 1 florin. (5814)
- GERVAIS. Journal de zoologie, comprenant les différentes branches de cette science: histoire des animaux vivants et fossiles, mœurs, distribution géographique et paléontologique, anatomie et physiologie comparées, embryogénie, histologie, etc.; par M. Paul Gervais, professeur d'anatomie comparée au Muséum de Paris. T. II. Année 1873. In-8°, 573 p. et 21 pl. 20 fr. (2855)
- LASSERRE. La fortification à fossés secs; par E. Lasserre, capitaine du génie belge. In-8°, 39 p. et 2 pl. 1 fr. (8685)
- MAIRE. Éléments de fortification passagère à l'usage des officiers de toutes armes; par J. Maire, capitaine du génie. In-8°, 174 p. 4 fr. (9157)
- MEUGY et NIVOIT. Statistique agronomique de l'arrondissement de Vouziers, département des Ardennes; publiée sous les auspices du conseil général, par MM. Meugy et Nivoit, ingénieurs des mines. In-8°, 432 p. 6 fr. (9166)
- SALVADOR. La Marine marchande à voiles et à vapeur et la marine militaire; par Édouard Salvador. In-8°, 120 p. (4592)
- Service (le) de sûreté dans l'armée prussienne. Première étude. Surveillance pendant les marches. In-12, 18 p. (1869)
- Des vents et des coups de vent observés dans l'Atlantique nord sur les routes des bâtiments à vapeur allant de la Manche à New-York et vice versa. Traduit de l'anglais par M. de La Tour du Pin, capitaine de frégate. In-8°, VIII-60 p. 2<sup>f</sup>, 50. (6205)
- VIAL. Cours d'art et d'histoire militaires; par J. Vial, lieutenant-colonel d'état-major, professeur à l'École d'état-major. 2 vol. In-8°, XVI-862 p. et 11 pl. 12 fr. (6574)
- WAGNER. Essai sur la fortification future; par E. Wagner, chef de bataillon du génie. In-12, 55 p. 1 fr. (776)
- WALDERSÉE (de). Méthode d'enseignement du combat de tirailleurs

- pour l'infanterie prussienne; par le général comte de Waldersée. Traduit de l'allemand par M. Dargnier, ingénieur. In-18 Jésus, 260 p. 3 fr. (6578)

## OUVRAGES ANGLAIS.

- G. C. BOASE et W. R. COURTNEY. *Bibliotheca Cornubiensis...* Catalogue des écrits, etc. des auteurs nés dans le Cornouailles. Vol. 1.
- J. GEIKIE. *The great Ice Age...* Le grand Age de glace et ses rapports avec l'ancienneté de l'homme.
- Wm. JOHN M. RANKINE. *A Manual of Machinery...* Manuel des mécanismes et des moulins. 2<sup>e</sup> édition, revue par Ed. Fisher Bamber.
- W. J. M. RANKINE. *Manual of the steam Engine...* Manuel de la machine à vapeur et des autres moteurs. 7<sup>e</sup> édition.
- J. J. REYV. *Hydraulics of great Rivers...* L'hydraulique des grands fleuves: le Parana, l'Uruguay et l'Estuaire de la Plata, *Nautical Almanach*, pour 1877.
- Mémoires du *Geological Survey* pour l'Angleterre et le pays de Galles: explication des feuilles 91, N.-O. et 93 N.-O.
- Mémoires du *Geological Survey* d'Irlande: Explication des feuilles 78, 79 et 80 par W. B. Leonard et J. R. Cruise, avec notes paléontologiques par W. H. Baily; explication de la feuille 47, par F. W. Ogan, avec notes paléontologiques, par W. H. Baily.
- W. PENGELLY. *The time that has elapsed...* Le temps écoulé depuis l'ère des hommes des cavernes du Devonshire.
- N. W. BURGH. *The Slide Valve...* Étude pratique du tiroir des machines à vapeur.
- W. W. PINK et G. E. WEBSTER. *A Course...* Cours de chimie analytique.
- JOSIAH P. COOKE. *Principles of chemical philosophy...* Éléments de philosophie chimique. 3<sup>e</sup> édition, revue et corrigée. *The New chemistry...* La chimie nouvelle, avec 31 gravures.
- T. M. GONDEVE. *Principles of Mechanics...* Éléments de mécanique.
- Sir Charles LYELL. *The Student's Elements of Geology...* Éléments de géologie à l'usage de l'étudiant. 2<sup>e</sup> édition, revue et corrigée, avec nouvelle liste des fossiles anglais et plus de 600 dessins.
- Alpine Journal*. Par les membres de l'Alpine Club. Vol. 6, in-8°.
- Sir R. M. STEPHENSON. *Elementary and practical Instructions...*

- Données élémentaires et pratiques sur la science de la construction des chemins de fer. 5<sup>e</sup> édition, revue et considérablement augmentée, par *Edward Nugent* (série de Weale).
- R. WILSON. *A Treatise on Steam Boilers...* Traité des chaudières à vapeur ; leur force, leur construction et leur rendement. 2<sup>e</sup> édition.
- JOHN TYNDALL. *The Forms of Water...* Les formes de l'eau dans les nuages et les fleuves, dans la glace et les glaciers. 4<sup>e</sup> édition.

## OUVRAGES AMÉRICAINS.

- J. D. DANA. *A System of Mineralogy...* Traité de minéralogie. 5<sup>e</sup> édition.
- L. AGASSIZ. *On the Structure...* Six leçons sur la structure des animaux, avec 46 illustrations.
- A. E. BEACH. *The Science Record for 1874.* Archives du progrès des sciences et inventions faites en 1873.
- JOSEPH LEIDY. *Contributions to the extinct vertebrate fauna...* Mémoires sur la forme des vertébrés fossiles dans les territoires de l'Ouest ; publiés par le *Geological Survey* des États-Unis. In-4°, vol. 1, avec 27 planches.
- G. B. N. TOWER. *Instructions on modern American...* Indications sur le mode actuel de construction des ponts par le système américain. In-8°, 4 planches et 50 figures.
- W. P. TROWBRIDGE. *Heat as a source of power...* La chaleur considérée comme source de force mécanique.
- J. M. TOWER. *Dictionary of elevations...* Dictionnaire des altitudes et registre météorologique des États-Unis.
- Geological Survey of Missouri*; Raphaël Pumpelly, directeur. *Preliminary Report...* Rapport préliminaire sur les minerais de fer et les bassins houillers, d'après les relevés exécutés sur le terrain en 1872 ; avec 190 figures et un atlas.
- Transactions of the American Institute of Mining Engineers.* Transactions de l'Institut américain des ingénieurs des mines. Vol. 1, mai 1871 à février 1875.
- Clevenger's Government Surveying.* Sur la pratique des opérations cadastrales.
- The American Cyclopædia.* L'Encyclopédie américaine ; G. Ripley et Ch. A. Dana, éditeurs. Vol. 1 à 5.

- S. ROPER. *Handbook of the Locomotive...* Manuel de la locomotive, comprenant la construction, le service et la conduite des machines locomotives et des chaudières.

## OUVRAGES ITALIENS.

- M. CAPITO et C. PINTACUDA. *Corso di meccanica...* Cours de mécanique appliquée aux machines. Vol. 1, part. 1, Palerme.
- ANT. CANTALUPI. *Trattato...* Traité élémentaire de construction des chemins de fer. Milan.
- FR. CORAZZINI. *I tempi preistorici...* Les temps préhistoriques, ou les traditions les plus anciennes comparées aux résultats de la science moderne. Vérone.
- Dizionario universale.* Dictionnaire universel des sciences, lettres et arts, par une Société, sous la direction des professeurs M. Lessona et C. A. Valle. Milan.
- Enciclopedia di chimica.* Encyclopédie de chimie pure et appliquée ; Fr. Selmi. Turin, Rome et Naples.
- A. STOPPANI. *Corso di geologia...* Cours de géologie. Milan.
- G. SPANO. *Scoperte...* Découvertes archéologiques faites en Sardaigne pendant l'année 1873. Cagliari.
- AL. BARBENSI. *Sulle principali macchine...* Sur les machines les plus importantes à l'Exposition universelle de Vienne. Rome, Florence.
- Congresso (primo) degli ingegneri...* Premier congrès des ingénieurs et architectes italiens à Milan.
- Statistica...* Statistique du commerce spécial d'importation et d'exportation pour l'année 1873 ; publiée par le ministère des finances. Florence.
- A. BOTTO. *Studi sulle polveri fulminanti...* Études sur les poudres fulminantes et leurs applications dans les travaux des mines militaires ; extrait du journal du génie militaire. Florence.
- G. ROSSET. *Esperienze...* Essais mécaniques sur la résistance des principaux métaux pour bouches à feu. Turin.
- G. D. PROTASI. *Sulla Strada ferrata del Sempione...* Sur la voie ferrée du Simplon et le point le plus convenable pour sa jonction avec le réseau italien. Novare.
- A. GRIMALDI. *Trattato...* Traité élémentaire de chimie organique. Vol. 1. Sienne.

- ANT. FAVARO. *Il traforo del Gottardo...* Le percement du Saint-Gothard; note d'une visite aux travaux. Padoue.
- AR. ISSEL. *Oggetto...* Objet et tendance de la minéralogie moderne, Milan.
- L. PARODI. *Sull'estrazione dello Solfo...* Sur l'extraction du soufre en Sicile et sur ses usages industriels. Florence.
- A. NACCARI et M. BELLALI. *Manuale di fisica...* Manuel de physique pratique et Guide des recherches de physique expérimentale. Rome.
- Annali del Ministero di Agricoltura, Industria e Commercio* 1873. Premier trimestre : Agriculture; deuxième trimestre : Commerce et Industrie. Rome.
- Géographie du pays d'Aoste*, par la petite société Alpine de Cogne; en français. Aoste.
- A. SERPIERI. *Il terremoto...* Le tremblement de terre du 12 mars 1873, en Italie. Urbin.
- L. CESA BIANCHI. *Le miniere di ferro...* Les mines de fer du Val Brembana. Milan.
- Cap. A. VERRI. *Meccanica...* Mécanique des mines; études sur l'art du mineur. Bologne.

## OUVRAGES ALLEMANDS.

- PFAFF. *Allgemeine Geologie...* Géologie générale comme science exacte, avec un appendice : recherches géologiques. Leipzig, 1873.
- QUENSTEDT. *Petrefactenkunde Deutschlands...* Fossiles de l'Allemagne. Tome III, Échinodermes, 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> parties. Leipzig, 1873.
- RÜHLMANN. *Handbuch der mechanischen Wärmetheorie*, Traité écrit d'après la *Théorie mécanique de la chaleur*, de Verdet. Braunschweig, 1873.
- VON DECHEN. *Die nutzbaren Mineralien und Gebirgsarten...* Les minéraux et les roches utiles de l'Allemagne, avec une revue physique et géologique de la contrée. Berlin, 1873.
- EMMICH. *Geologische Geschichte der Alpen...* Histoire géologique des Alpes. Glaciers anciens. Trias. Iena, 1873.
- H. KOPP. *Die Entwicklung der Chemie in der neueren Zeit*. Le développement de la chimie dans les temps modernes, 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> parties. München, 1873-1874.
- JUST. ROTH. *Beiträge zur Petrographie der plutonischen Gesteine...*

- Matériaux pour la pétrographie des roches plutoniennes, avec citation des analyses publiées de 1869 à 1873. Berlin, 1873.
- SADEBECK. *Repertorium der Mineralogie und Geologie...* Répertoire de minéralogie et de géologie, à l'usage des architectes, forestiers, agriculteurs, industriels, etc. Berlin, 1873.
- LAUBE. *Geologische Beobachtungen...* Observations géologiques rassemblées pendant le voyage sur le « Hansa » et le séjour dans le sud du Groënland. Wien, 1874.
- SCHMICK. *Das Fluthphänomen...* Le phénomène de la marée et sa connexion avec les oscillations séculaires du niveau des mers. Recherches fondées sur les documents les plus nouveaux. Leipzig, 1874.
- SIMLER. *Die Löthrohr-Chemie...* La chimie du chalumeau employée avec quelques réactions de voie humide pour les recherches de chimie agricole, domestique et industrielle. Zürich, 1874.
- WINKLER. *Die Gesteins-Lehre...* La pétrologie. München, 1874.
- FRENZEL. *Mineralogisches Lexicon für das Königreich Sachsen...* Dictionnaire minéralogique pour le royaume de Saxe. Leipzig, 1874.
- RÖNTGEN. *Die Grundlehren der mechanischen Wärmetheorie...* Les principes de la théorie mécanique de la chaleur, avec une description des principales machines à air chaud, à gaz et à vapeur, et l'application de ces principes au calcul du rendement de ces machines. 2<sup>e</sup> partie. Iena.
- BRAUNS. *Der obere Jura im nordwestlichen Deutschland...* Le terrain jurassique supérieur dans le nord-ouest de l'Allemagne, avec étude spéciale de ses mollusques. Braunschweig, 1874.
- GROTH. *Tabellarische Uebersicht der einfachen Mineralien...* Tableaux des minéraux simples rangés d'après leurs relations cristallographiques et chimiques. Braunschweig, 1874.
- KREMERS. *Physikalisch-chemische Untersuchungen...* Recherches physico-chimiques, 5<sup>e</sup> partie. Capacité pour la chaleur et affinité des combinaisons de premier ordre. Wiesbaden, 1873.
- NEUMAYR. *Die Fauna der Schichten...* La faune des couches à *Aspidoceras Acanthicum*. Wien, 1873.
- *Revue der Fortschritte der Naturwissenschaften...* Revue des progrès des sciences naturelles au point de vue théorique et pratique, publiée par Klein, avec la collaboration d'hommes spéciaux. Leipzig, 1873.

# ANNALES DES MINES



---

## NOTICE

SUR

LES MINERAIS DE PLOMB ARGENTIFÈRE DE L'UTAH

ET

LEUR TRAITEMENT MÉTALLURGIQUE EN 1873.

Par M. P. L. BURTHE, ingénieur civil des mines.

---

*Introduction.* — Parmi les États et territoires formés à l'ouest des montagnes Rocheuses, le territoire de l'Utah a toujours été un sujet d'études intéressant pour les agriculteurs et les historiens. L'industrie minière et métallurgique n'y date que de 1869 ; elle ne fait donc que de naître, et, à ce titre le travail suivant, fragment résumé de notes prises pendant un voyage de plusieurs mois aux États-Unis, ne sera peut-être pas dénué d'intérêt.

Il est divisé en quatre paragraphes :

- 1° Indications sur la géographie, et les ressources du territoire ;
- 2° Gisements ;
- 3° Traitement métallurgique ;
- 4° Production pour l'année 1872.

Je ferai ici quelques remarques préliminaires : depuis la guerre de sécession, le papier-monnaie (currency)

est d'un usage général dans les États, sauf en Californie et Nevada. Sa valeur dépend de celle de l'or, qui suit les fluctuations fréquentes du marché de New-York. La conversion des valeurs américaines en valeurs françaises présente donc une difficulté. J'ai supposé dans les calculs que la valeur de l'or était 112, c'est-à-dire que 100 dollars en or valaient 112 dollars en currency. Cette valeur 112 a été la moyenne des cours de 1872 et des six premiers mois de 1875. Le dollar en or vaut 5<sup>l</sup>,15.

L'once d'or (31<sup>gr</sup>,091) est évaluée à \$18 = 92<sup>l</sup>,70.

L'once d'argent à \$1,50, soit 0<sup>l</sup>,22 le gramme (\*); la tonne de plomb à \$80, soit 0<sup>l</sup>,45 le kilogramme. On emploie comme en Angleterre deux sortes de tonnes, la tonne faible de 2.000 livres, soit 906<sup>l</sup>,8 pour les minerais et les métaux, la tonne forte de 2.240 livres, soit 1.016<sup>l</sup>,96 pour la houille, le coke, etc.

§ 1<sup>er</sup>. — Indications sur la géographie et les ressources du territoire.

Le territoire de l'Utah fut colonisé par la secte religieuse des Mormons, qui vint s'y réfugier en 1848, sous la conduite de Brigham Young, pour échapper aux persécutions dont elle était l'objet dans les autres États de l'Union. Pendant vingt ans, toute l'énergie de ces pionniers fut employée par leur habile chef à transformer un désert en terre cultivable. Leur existence même dépendait du succès de leur tentative, et leur gouvernement théocratique, craignant toute diversion à la grande œuvre agricole, découragea les entreprises industrielles. Plus tard, les grands profits que ces travailleurs courageux tiraient des produits de leurs champs, la crainte d'un contact trop

(\*) C'est là la moyenne des valeurs en 1872 et 1875. Au moment de la dernière crise monétaire (octobre 1873), l'once valait \$0,70, soit 0<sup>l</sup>,105 le gramme à Salt Lake City.

fréquent avec les gentils (nom sous lequel ils désignent toute personne étrangère à leur église), les engagèrent à persévérer dans la même politique. Quelques gisements d'or étaient pourtant exploités avec un succès relatif à l'entrée de Bingham Cañon, quand, en 1869, la découverte d'un riche dépôt argentifère dans les monts Wahsatch changea la face des choses. Les chercheurs de mines arrivèrent en foule; leur fièvre se communiqua aux chefs mormons; la création des chemins de fer rendit les rapports plus faciles avec les États de l'ouest et de l'est; l'industrie minière et métallurgique prit un tel essor qu'en 1872, c'est-à-dire après trois années seulement de travail, la valeur de la production du territoire en métaux atteignait un chiffre de plus de 16 millions de francs.

Le territoire s'étend du 37° au 42° parallèle N. et du 109° au 142° degré de longitude (ouest de Greenwich), couvrant une superficie de près de 100.000 kilomètres carrés, sur laquelle 54.540 hectares seulement sont en culture. La population est d'environ 90.000 habitants. Au point de vue géographique, les monts Wahsatch forment le trait principal du territoire. Cette grande chaîne, dont les sommets atteignent presque la région des neiges éternelles, court du S.-O. au N.-E., sillonnée par de nombreuses gorges de direction E.-O., appelées *cañons*. Elle borde sur l'est la vallée du grand lac Salé, au pied duquel s'étend Salt Lake City, ville de 20.000 habitants.

Au point de vue économique, elle est non moins importante, puisqu'elle contient les gîtes métallifères les plus riches et que la vie agricole est pour ainsi dire concentrée à ses pieds.

Enfin, au point de vue géologique, elle joue un rôle capital, non-seulement pour l'étude de l'Utah, mais pour celle de l'Amérique du Nord tout entière. Sur son versant ouest se superposent des assises puissantes de terrains sédimentaires depuis la période azoïque jusqu'à l'époque

jurassique. C'est de cette dernière époque, suivant M. Clarence King, que daterait le soulèvement de ces montagnes. Puis se serait produite une période de calme pendant laquelle l'océan Pacifique et l'océan Atlantique auraient déposé simultanément les couches crétacées et tertiaires, le premier sur le versant ouest de la Sierra Nevada, le second sur le versant est des monts Wahsatch. On voit l'importance du rôle qu'aurait joué pendant la formation des terrains américains cette dernière chaîne; c'était une barrière empêchant les eaux des mers crétacées et tertiaires de pénétrer à l'intérieur de la vaste région connue depuis Fremont sous le nom de Grand Bassin.

Les monts Oquih, quoique d'une importance moindre que les Wahsatch, n'en sont pas moins intéressants comme bordure occidentale de la vallée du grand lac Salé. C'est entre ces deux remparts, les Wahsatch à l'est, les Oquih à l'ouest, que sont concentrées la population et les ressources de toute espèce du territoire; c'est dans leur sein que reposent les gîtes métallifères exploités. L'or, l'argent, le cuivre, le plomb s'y présentent sous des formes variées. Les minerais de fer, à peine touchés aujourd'hui, y seraient abondants: on a découvert du bismuth, du cinabre, du manganèse. Des couches d'argile réfractaire sont exploitées au nord de Salt Lake City et dans Bingham Cañon. En 1871, on répandit le bruit que du minerai d'étain avait été découvert dans les syénites près d'Ogden. C'était une tentative de spéculation. Le docteur Genth (de Philadelphie) déjoua la fraude à temps pour prévenir bien des ruines.

Les travaux industriels sont aujourd'hui confinés aux lavages des roches aurifères, à l'exploitation et au traitement des minerais d'argent. Je ne m'occuperai ici que de la fonte des minerais plombo-argentifères; car le travail suivi pour obtenir l'or est identique à celui de la Californie, et les minerais d'argent proprement dits sont traités absolu-

ment de la même façon que dans le Nevada et le Colorado par amalgamation. Les fontes plumbeuses, au contraire, sont un caractère distinctif de la métallurgie dans l'Utah. Elles présentaient un intérêt nouveau en 1873, par suite de la substitution du coke au charbon de bois comme combustible.

Les minerais destinés à ces fontes sont particulièrement exploités dans les districts de Big et Little Cottonwood Cañons, d'American Fork Cañon (ces trois premiers dans les Wahsatch) et de Bingham Cañon (ce dernier dans les Oquih). Les premières découvertes remontent aussi haut que 1863; elles furent faites par des soldats, près de l'endroit où fut fondée en 1864 la ville de Stockton. La même année les deux districts de Rush Valley et West Mountain furent constitués peu à peu, les autres districts se formèrent tels qu'ils sont indiqués sur la carte ci-jointe (fig. 1, Pl. I). Le district actuel de Bingham Cañon est à 40 kilomètres au S.-O. de Salt Lake City. On y parvient de cette dernière ville, soit par diligence directement, soit par chemin de fer de Salt Lake à Sandy et par diligence depuis Sandy.

Le district de Little Cottonwood fut formé en 1865; mais il ne se développa qu'à partir de 1869, époque à laquelle on découvrit la mine Emma, fameuse aux États-Unis autant par les procès et les querelles sanglantes qu'elle souleva que par la richesse de ses minerais. Ce district est à 40 kilomètres au S.-E. de Salt Lake City. Le chemin de fer mène jusqu'à Graniteville; de Graniteville on se rend à cheval jusqu'à Alta City, située au milieu même des mines.

Les districts de Big Cottonwood et American Fork sont tous deux adjacents à celui de Little Cottonwood, le premier au nord, le deuxième au sud. Ce dernier, quoique à 65 kilomètres de Salt Lake City, est d'un accès facile. Le chemin de fer mène à peu de distance des mines.

Tous ces Cañons sont des gorges étroites, à une altitude

considérable, encombrées de neige d'octobre à juin, mais possédant de l'eau et des arbres, privilège inestimable qu'on ne peut apprécier qu'après avoir traversé les grandes prairies du Far West. Les travaux industriels tendent à faire disparaître les bois trop rapidement.

## § II. — Gisements.

*Aperçu géologique.* — Le district de Little Cottonwood est de beaucoup le plus important. Il mérite donc une description plus détaillée que les autres. Lorsqu'on arrive de Salt Lake City, on se trouve, à l'entrée même du Cañon, dans un granit à grains relativement fins, de couleur grise et disposé en strates remarquablement réguliers de direction N.-E.-S.-O., plongeant vers le S.-E. de 60° environ. Ce granite est la base sur laquelle reposent les roches sédimentaires dans l'ordre suivant, en partant d'en bas :

- 1° Des grès d'une grande épaisseur ;
- 2° Des calcaires dolomitiques ;
- 3° De nouvelles couches de grès ;
- 4° Une deuxième couche de calcaire dolomitique.

Toutes ces roches sont plus ou moins métamorphiques, particulièrement les grès, qui ont pris l'apparence de quartzites. En certains points le calcaire présente un aspect cristallin grossier ; l'âge de ces roches n'a pas encore été déterminé exactement. Le professeur W. P. Blake les rapporte à l'époque carbonifère, d'autres à l'époque dévonienne. La question sera prochainement résolue par M. Cl. King qui a réuni des fossiles caractéristiques de ces couches. Plusieurs veines de diorite ont été observées traversant les roches sédimentaires ; on a reconnu d'autres traces d'action éruptive ; aussi les contorsions et les dislocations des roches doivent-elles être fréquentes. Cependant les travaux de mines n'ont pas encore rencontré de failles ; ils ne sont point assez développés pour qu'on puisse juger de

l'influence que ces remaniements du sol ont eu sur les gisements métallifères.

Les calcaires ont une apparence caractéristique. Ils ressemblent généralement à un grès saccharoïde, blanc, à grain très-fin, comme du sucre en pain. Leur dureté est si faible qu'ils s'émiettent quand on les frappe, même doucement, au marteau. Quelquefois cependant ils prennent une structure caverneuse et une teinte jaune ; ils ressemblent beaucoup alors aux dolomies du Dauphiné ; par exemple, sur le versant nord du Cañon au-dessus de la mine Flagstaff. Quelle que soit leur apparence physique, ils renferment constamment une quantité très-notable de matière dolomitique ne faisant bien nettement effervescence que sous l'action des acides aidée par celle de la chaleur. C'est ce qui explique comment on a pu prendre cette matière pour du sable fin. Dans un intervalle de quelques mètres, les strates changent d'apparence, perdent leur structure saccharoïde, et deviennent plus siliceux, puis passent aux quartzites.

C'est au contact de ces quartzites avec la deuxième série de calcaires que sont situés les gisements les plus importants, tels que ceux des mines Emma, Flagstaff, Vallejo, etc. Il y en a aussi quelques-uns dans le calcaire n° 1. On a d'ailleurs découvert du minerai dans toutes les roches, et, dans Bingham Cañon par exemple, les gîtes sont fréquemment encaissés par le granite.

Les mines les plus développées ont montré que ces gîtes ont une allure plus ou moins conforme à celle des strates, entre lesquels ils sont intercalés, comme direction et inclinaison. On pourrait les considérer comme des strates irréguliers dans leur développement, en certains points d'une puissance modérée, devenant tout à coup d'une grande puissance (un dépôt dans la mine Emma avait 18<sup>m</sup>,30 de longueur sur 12<sup>m</sup>,20 de largeur comptés horizontalement), et par intervalles se contractant au point que leur persistance peut paraître douteuse. Ils renferment des

masses de la roche encaissante, appelées *horses*, et lancent des ramifications dans les strates voisins. Leur richesse en plomb et argent est aussi variable que leur puissance.

De pareils gisements sont très-dignes d'attention et permettent d'extraire à bas prix de grandes quantités de minerais, quand on a rencontré une *bonanza*, c'est-à-dire une masse minérale riche. Mais aussi ce sont eux qui nécessitent les travaux d'exploration les plus étendus, lorsqu'on veut arriver à une production régulière, et ce sont précisément les travaux de ce genre qu'on entreprend avec le plus de répugnance aux États-Unis, parce qu'on n'en peut pas tirer un bénéfice financier immédiat.

Dans Bingham Cañon, les mêmes conditions de gisement se représentent pour les mines les plus importantes. Par exemple la mine de Winnamuck se trouve au contact du calcaire et du grès. Mais là le calcaire est bleuâtre, à grains fins, parsemé de filets minces de calcaire blanc, et de dureté très-variable. Tantôt il est aussi friable que le calcaire blanc de Cottonwood et se délite facilement à l'air; tantôt et le plus souvent il est assez résistant. Il n'est probablement pas du même âge que le calcaire de Cottonwood. Il forme le toit du gîte; le grès est au mur; c'est un grès à grains fins, très-dur, très-siliceux, et qui, au contact du gîte, porte les traces d'une forte action métamorphique. Le contact des deux roches a lieu suivant une ligne E.-O. assez irrégulière, plongeant au nord d'environ 50°. L'allure du gîte est analogue à celle des gisements de Cottonwood. C'est une série de grandes poches et de canaux étroits; sa largeur varie entre 1 et 3 mètres. En certains points, le remplissage est une matière jaunâtre, dolomitique et quartzreuse, ressemblant au minerai d'une façon si frappante que les ouvriers les plus habiles s'y trompent. C'est au point qu'on est obligé de payer les mineurs à la journée et non au pied d'avancement ou à la tonne de minerai extraite comme c'est l'habitude; il faut extraire toute la matière

abattue dans la crainte des pertes qu'occasionnerait un triage négligent. Ce fait se présente surtout dans les niveaux supérieurs.

Là, les deux métaux, plomb et fer, qui forment la masse principale du minerai, sont tous deux à l'état de composés oxydés, sauf quelques noyaux de galène atteignant tout au plus comme dimensions la grosseur du poing. En profondeur, ces composés oxydés tendent à disparaître. L'action oxydante s'est portée tantôt sur le fer, tantôt sur le plomb. La proportion des deux métaux est d'ailleurs irrégulière; ils dominent alternativement. Plus on descend, plus la proportion de pyrite augmente. Comme matière accidentelle, on trouve de la blende associée à la pyrite quand celle-ci domine. Enfin, dans le nouveau puits qu'on fonçait au moment de ma visite les matières minérales étaient exclusivement à l'état de sulfures. Il semblerait hors de doute que les minerais ont été déposés à l'état de sulfures et que les portions oxydées sont des produits secondaires.

American Fork Cañon présente les mêmes caractères que les deux Cottonwood; il est particulièrement remarquable par de grosses masses de dolomie situées un peu en avant de l'usine Sultana.

*Minerais.* — Il est assez difficile de se faire une idée exacte de la composition des minerais, vu la rareté des analyses qui en ont été faites. (Une analyse se paye \$300, près de 1.500 francs à Salt Lake City.) L'estimation de leur valeur en métaux précieux est également délicate, les mineurs et fondeurs la donnant tantôt en onces, tantôt en valeur monétaire, tantôt en papier-monnaie, dont la valeur elle-même est variable.

D'une façon générale on peut dire que les minerais de Bingham Cañon sont extrêmement siliceux, contenant de 30 à 40 p. 100 de silice, tandis que ceux de Cottonwood et American Fork sont décidément plus basiques et plus riches en plomb et en argent. Le plomb se trouve à l'état

de composés oxydés, carbonates et sulfates, mélangés en plus ou moins grande quantité à des noyaux de galène pris dans la masse des oxydes, le tout ayant une apparence terreuse, fréquemment une teinte d'ocre rouge, et une texture très-lâche.

Dans les Cottonwood, ce plomb est associé à : 1° de l'oxyde de fer, en morceaux solides d'un brun noir; la proportion est ordinairement de 5 à 6 p. 100, mais s'élève quelquefois jusqu'à 20 p. 100. En certains points des veines on peut observer du sulfate hydraté, mêlé soit à de l'argile, soit à des pyrites;

2° De l'antimoine, sous forme d'oxyde et d'antimoniate de plomb;

3° De l'arsenic toujours, souvent en grande quantité, sous forme de pyrite arsenicale.

La blende, le carbonate et la pyrite de cuivre sont rencontrés accidentellement. L'alumine, la chaux et la magnésie forment la gangue avec la silice. On trouve aussi dans ces mines un peu de molybdate de plomb, et, à ce propos, M. Silliman a fait remarquer dans les minéraux de la chaîne des Wahsatch un remplacement curieux de l'acide phosphorique par l'acide molybdique. A Tacoma, on trouve de la wulfénite en magnifiques cristaux jaunes.

Bien qu'on ait rencontré des portions d'une richesse extraordinaire en argent, surtout aux affleurements, on peut dire que la teneur en argent varie de 952<sup>gr</sup>,70 à 2.798<sup>gr</sup>,10 à la tonne. L'or n'existe qu'en petite quantité.

Comme exemple, je citerai les essais suivants faits sur des minerais de la mine Flagstaff.

1° L'essai a été pris sur un poids de 4.201 kilogrammes. On a trouvé 1.973 grammes d'argent et 23<sup>gr</sup>,99 d'or à la tonne, 55 p. 100 de plomb et 3 p. 100 d'eau.

2° Sur quatre lots séparés, pesant ensemble 544<sup>gr</sup>,660,

on a trouvé, à la tonne, de 3 à 5 p. 100 d'eau, de 51 à 58,50 p. 100 de plomb et pour les métaux précieux :

	ARGENT. grammes.	OR. grammes.
1 <sup>er</sup> lot. . . . .	1.969. . . . .	19,80
2 <sup>e</sup> — . . . . .	2.058. . . . .	29,06
3 <sup>e</sup> — . . . . .	2.438. . . . .	25,00
4 <sup>e</sup> — . . . . .	1.900. . . . .	24,60

Au sujet du minerai de la mine Emma, le professeur Silliman a donné l'analyse suivante, que je reproduis à titre de simple renseignement :

Silice. . . . .	40,90	<i>Report.</i> 87,60	
Plomb. . . . .	54,14	Al <sup>2</sup> O <sup>3</sup> . . . . .	0,35
Soufre. . . . .	2,57	Magnésie. . . . .	0,25
Antimoine. . . . .	2,27	Chaux. . . . .	0,72
Cuivre. . . . .	0,83	Acide carbon. . . . .	1,50
Zinc. . . . .	2,92		90,42
Manganèse. . . . .	0,15	Oxygène et eau. . . . .	9,58
Fer. . . . .	5,54		} par diffé- rence.
Argent. . . . .	0,48		
<i>A reporter</i>	87,60		100,00

Il est à croire que la quantité de silice est un peu forte, et exagérée au détriment de la magnésie. Dans la majorité des minerais, il est probable que la proportion de silice ne monte pas plus de 5 à 8 p. 100.

Les minerais d'American Fork sont semblables à ceux de Cottonwood, mais contiennent plus de fer. Ils renferment de l'antimoine et de l'arsenic, comme il est facile d'en juger par l'odeur des fumées des fours et les résidus des chaudrons de coulée. Le minerai de la mine Miller, traité à l'usine Sultana, est composé de :

Silice. . . . .	jusqu'à 10 p. 100	} à la tonne.
Oxyde de fer. . . . .	jusqu'à 18 p. 100	
Plomb. . . . .	de 55 à 60 p. 100	
Argent. . . . .	de 1.715 à 2.326 grammes	
Or. . . . .	de 15 <sup>gr</sup> ,700 à 20 <sup>gr</sup> ,567	

Les minerais de Bingham Cañon sont plus pauvres en plomb et argent que ceux des districts précédents. Dans ce Cañon, un grand nombre de gisements ne sont pas exploités à cause de leur pauvreté.

Le minerai de Winnamuck contenait en 1872, pour la moyenne de l'année, 1.759 grammes d'argent à la tonne et 54,98 p. 100 de plomb, presque entièrement sous forme de carbonate. M. Ellsworth Daggett en donne l'analyse suivante :

Plomb. . . . .	57
Silice. . . . .	55
Oxyde de fer. . . . .	6,9
CO <sup>2</sup> et eau. . . . .	10,7
Autres bases non déterminées. . . . .	10
	99,6

Dans le minerai de la mine Spanish, les proportions de plomb et silice sont respectivement 42 à 50 et 55 p. 100. A Last Chance, la première tombe à 4 ou 5 p. 100, et la deuxième s'élève jusqu'à 45 p. 100. Dans ces minerais, l'or est assez rare ; il n'y en a jamais plus de 55 grammes à la tonne. La teneur en argent varie de 400 à 1.750 grammes à la tonne. D'après l'analyse précédente, on peut voir que les fondeurs se préoccupent peu des pyrites de fer et de cuivre qui existent dans tous ces minerais. Cependant leurs proportions deviennent inquiétantes. Ainsi, à Winnamuck la pyrite de fer est assez abondante pour qu'on la mette à part. Elle contient 1.500 grammes d'argent à la tonne, c'est-à-dire qu'elle est presque aussi riche que le minerai traité. A Last Chance, ce n'est pas la pyrite qui gêne, mais la blende. Elle est réservée, comme la pyrite à Winnamuck, pour être soit vendue, soit traitée dans un avenir prochain. L'arsenic et l'antimoine existent en quantité notable, sans que je puisse donner une idée approximative de leurs proportions.

§ III. — **Traitement métallurgique.**

*Méthode.* — Eu égard à la prédominance des minerais oxydés et à la nature siliceuse de leur gangue, la méthode de traitement universellement adoptée est la réduction au four à cuve. Sur vingt-trois fonderies, deux seulement emploient le four à réverbère pour certaines classes de minerais, et le four à cuve comme complément. Dans les usines, les minerais ne sont soumis qu'à cette seule opération. On obtient :

- Du plomb d'œuvre, vendu aux usines de raffinage ;
- Des scories, partiellement retraitées ;

Et une faible proportion de mattes et speiss, abandonnés dans certaines usines, retraités dans d'autres.

Avant d'entrer dans le détail des opérations, je donnerai quelques indications sur les matières premières autres que les minerais.

*Matières premières. Combustible.* — On emploie comme combustibles : le coke et le charbon de bois pour la fonte, la houille pour les machines.

Le coke vient de Connelsville, près de Pittsburgh, Pensylvanie. Voici la moyenne de quarante-neuf analyses faites à Philadelphie sur différents échantillons de ce combustible :

Carbone. . . . .	87,456		
Cendres. . . . .	11,582		
Soufre. . . . .	0,695		
Acide phosphorique. . . . .	0,029		
Eau (?) . . . . .	0,490		
	100,000		
Analyse des cendres.	{	Silice. . . . .	47,90
		Alumine. . . . .	47,76
		Oxyde de fer. . . . .	1,45
		Chaux et magnésie. . . . .	2,01
		Alcalis. . . . .	0,49
		Soufre. . . . .	traces
		Acide PhO <sup>5</sup> . . . . .	0,21
			99,80

Ce coke coûte à Connelsville 13<sup>f</sup>,58 la tonne. Rendu dans l'Utah, il revient entre \$34 et 40, soit entre 153<sup>f</sup>,84 et 181<sup>f</sup>,01 la tonne, suivant que les usines sont près du chemin de fer ou dans les montagnes. C'est un prix très-élevé; on a fait des tentatives pour transformer en coke les lignites du Wyoming; mais, d'après différents rapports, les tentatives n'ont pas été couronnées de succès.

Le charbon de bois n'est plus employé aujourd'hui que comme accessoire. On le fait avec des bois de cèdre, tremble, et principalement de « nut-pine », petit arbuste qui couvre le Nevada. Généralement il est de mauvaise qualité et donne beaucoup de déchet. Pour l'achat on le compte par « bushel », mesure de volume. Un bushel de charbon de bois pèse de 13 à 17 lbs de 0<sup>k</sup>,454, suivant le bois dont on l'a tiré. On le paye de \$0,15 à \$0,54 le bushel, soit de 18<sup>f</sup>,70 à 22<sup>f</sup>,60 les 100 kilogrammes, suivant la position de l'usine et l'endroit d'où on le fait venir. On admet dans l'Utah qu'une tonne de coke de 2.000 livres produit le même effet utile dans un four que 2.400 livres de charbon de bois.

La houille employée vient du territoire de Wyoming; c'est plutôt un lignite qu'une houille, mais un lignite très-compact et de qualité exceptionnelle, puisqu'on l'emploie pour chauffer les locomotives du chemin de fer Union-Pacific. M. A. Eilers lui donne la composition suivante :

Carbone fixe. . . . .	de 49,72 à 54,46	} p. 100
Matières volatiles. . .	de 35,22 à 36,81	
Eau. . . . .	de 6,80 à 8,58	
Cendres. . . . .	de 1,75 à 8,00	

Il coûte de 50 à 60 francs la tonne rendue dans l'Utah.

**Fondants.** — Les seuls fondants employés sont l'hématite rouge et le calcaire.

L'hématite rouge vient de Rawlins, territoire de Wyoming. Elle coûte de 64<sup>f</sup>,62 à 103<sup>f</sup>,11 par tonne rendue aux usines.

Trois essais ont donné à M. E. Daggett les teneurs suivantes en fer : 66,5, 67,46, 68,50 p. 100. La seule gangue visible est du calcaire, environ 2 p. 100. On a constaté en outre environ 1 p. 100 de matière siliceuse.

Le calcaire vient de l'Utah même; il y en a de grandes carrières au nord de Salt Lake City. Il coûte de 15<sup>f</sup>,50 à 25<sup>f</sup>,40 par tonne; il est très-compact et très-dur.

**Four à cuve.** — Le même four, connu sous le nom de four Piltz, se retrouve d'une usine à l'autre avec des modifications peu importantes. Les croquis ci-joints (*fig. 2, 3, 4 et 5, Pl. I*) représentent le four de Winnamuck, qui peut servir de type. La hauteur du gueulard au-dessus des tuyères varie de 5<sup>m</sup>,80 à 4<sup>m</sup>,65; la plus grande dimension intérieure de 1 mètre à 1<sup>m</sup>,50. Les tuyères sont à 1 mètre au-dessus du sol. La section est tantôt circulaire, tantôt rectangulaire; le plus souvent les parois vont en s'élargissant jusqu'au gueulard et sont consolidées par des tirants en fer. Le four de Winnamuck a 1<sup>m</sup>,05 aux tuyères et 1<sup>m</sup>,575 au gueulard. Les fours de cette dimension sont ceux qui ont été primitivement construits quant on marchait au charbon de bois. Aujourd'hui que l'on marche au coke, les dimensions ont été réduites à 2<sup>m</sup>,45 ou 3 mètres au-dessus des tuyères et 0<sup>m</sup>,700 aux tuyères, pour un four passant de 12 à 14 tonnes de minerai par vingt-quatre heures. Un four ayant les dimensions du four primitif passerait, en marchant au coke, de 22 à 25 tonnes par vingt-quatre heures.

Le nombre de tuyères varie de trois à six. Le diamètre des buses est ordinairement de 0<sup>m</sup>,05. Presque partout les tuyères sont à eau, à œil ouvert ou fermé, indifféremment. Quelquefois on les place un peu trop bas, à 12 ou 15 centimètres seulement au-dessus du bain de plomb. Dans une fonderie, elles étaient inclinées sur le creuset. On pressent

les pertes qui peuvent résulter de pareilles dispositions. Dans une autre usine on a adopté un système particulier. Le vent, avant d'entrer dans le fourneau, passe par une petite bêche en fonte qui doit jouer le rôle de régulateur. Comme cette bêche est appliquée contre les parois du four, l'échauffement de l'air est à craindre.

L'emploi des baches à eau destinées à refroidir le four est assez répandu ; cependant quelques fondeurs s'opposent encore à leur adoption. Le plus souvent, l'arrière et les côtés du four sont seuls protégés ; là poitrine ne l'est pas.

Un trait caractéristique de ces fours est la façon dont on coule le plomb d'œuvre (*fig. 5, Pl. I*). L'intérieur du four est mis en communication avec un bassin extérieur par une conduite en fer, de telle sorte que l'écoulement du plomb est continu et que le niveau dans le bassin extérieur est constamment le même que le niveau dans le creuset. On ménage au-dessous du bassin extérieur un trou horizontal dans le prolongement du conduit, de façon à pouvoir le nettoyer dans le cas d'un engorgement. Le système est ingénieux et certainement commode ; cependant on y attache une importance peut-être exagérée. Suivant les fondeurs de l'ouest, il en résulterait : une marche plus régulière du four ; du plomb plus pur ; prévention des lous ferreux ; allègement du travail pour les ouvriers ; économie de combustible. Que le travail de l'ouvrier soit moindre, c'est évident ; que le plomb obtenu soit plus pur parce que c'est celui qui est au fond du creuset qui s'écoule le premier, et que les métaux plus légers restent plus longtemps soumis à l'oxydation, c'est encore fort possible, quoique les résultats des fontes ne le prouvent pas. Mais qu'il y ait économie de combustible, prévention de lous ferreux, marche plus régulière, c'est plus que douteux. En tout cas, le système en question est loin de produire ces trois résultats dans l'Utah, comme on pourra en juger plus loin.

Partout les fours sont à creuset ouvert ; les scories sont

coulées et reçues dans des cônes en fonte montés sur une paire de roues.

La durée des campagnes est variable. Quand le four n'est pas protégé par des baches à eau, elle varie de quinze à vingt-cinq jours ; avec des baches à eau, on peut la faire durer de quarante à cinquante. Mais cette dernière limite est rarement atteinte.

Dans aucune usine on n'emploie de chambres de condensation, sous prétexte que la valeur des métaux qu'on en retirerait ne payerait pas les frais de construction. Cependant l'idée commence à poindre que quelque chose pourrait être fait en ce sens, et des fondeurs, qui ont à diriger deux fours placés côte à côte, ont résolu de faire échapper les fumées de l'un par la cheminée de l'autre, et réciproquement. Les fours étant ordinairement à une distance de 3 mètres à 3<sup>m</sup>,50, l'amélioration ne sera pas bien considérable.

*Opération.* — L'opération ne présente rien de particulier. Le chargement se fait à la pelle ; souvent l'ouvrier charge uniformément sur toute la surface intérieure, jetant le combustible aussi bien sur les bords qu'au milieu. Les ouvriers au pied du four ont, eux, la manie de conserver le nez des tuyères éclatant « pour produire plus vite ». Il y a peu d'usine où l'on sache garder le nez au point voulu. Il est encore regrettable de voir des fours marcher avec une flamme brillante et une fumée blanche éclatante au gueulard, et de trouver des fondeurs non encore convaincus de ce fait qu'ils éviteraient des pertes en conservant le sommet de la charge bien noir. Les pertes mécaniques résultant d'une semblable négligence sont aggravées par l'état de désintégration du minerai qui donne beaucoup de poussières. Certaines usines en sont entourées comme d'une pluie ; quelquefois, pour les éviter, on est obligé d'arroser le minerai avant de le charger.

*Machine soufflante.* — Les deux appareils les plus ré-

pandus sont le ventilateur de Sturtevant (Sturtevant fan), et le souffleur de Root (Root's blower). Le premier est un simple appareil à force centrifuge. Le second est représenté par le croquis ci-joint (*fig. 6, Pl. I*). Les seuls avantages du Sturtevant sur le Root sont le bon marché et la faible force motrice nécessaire pour mettre l'appareil en marche. Seulement il est impossible d'atteindre des pressions supérieures à 0<sup>m</sup>,025 de mercure sans donner à l'appareil des vitesses de rotation exagérées, et encore la pression n'augmente pas en proportion de la vitesse. Le volume de vent donné est considérable. Le Root's blower donne des pressions un peu plus élevées. Dans les conditions actuelles, son emploi paraîtrait donc préférable; le Sturtevant, suffisant pour la marche au charbon de bois, ne l'est plus pour la marche au coke. On a changé de combustible et conservé les mêmes souffleurs. C'est cette faiblesse des pressions obtenues qui explique pourquoi l'on mélange du charbon de bois au coke dans les lits de fusion. Qu'on emploie un Sturtevant ou un Root, il faut un de ces appareils pour chaque four. Le Root généralement en usage est le n° 4 du catalogue des constructeurs. Il fait deux cents révolutions par minute et donne un volume d'air de 0<sup>m</sup>³,567. Il coûte environ 1.000 francs.

Pour mettre ces souffleurs en marche on emploie des machines de toute sorte, jusqu'à des machines à cylindres oscillants. Quelques usines, situées dans les montagnes, emploient l'eau comme moteur.

*Lits de fusion.* — D'après la nature des minerais de Bingham et de Cottonwood Cañons, un mélange convenable pourrait donner un lit de fusion ne demandant que peu ou point de fondants. Ordinairement les mineurs fondent leur propre minerai et sont alors obligés d'ajouter de grandes quantités de calcaire et d'hématite. Les scories des opérations précédentes ne sont retraitées qu'en petite quantité. Certaines usines emploient à la fois l'hématite et le

calcaire; d'autres n'emploient que l'une ou l'autre. Les proportions de ces matières ajoutées aux lits de fusion sont tellement variables qu'il serait illusoire d'en donner une moyenne. Je citerai seulement les quatre usines suivantes. Les deux premières, Last Chance et Flagstaff, appartiennent à la même compagnie, fondent les mêmes minerais, et mélangent ceux de Bingham et de Cottonwood. Les deux autres, Wahsatch et Winnamuck, fondent des minerais de Bingham Cañon exclusivement et sans mélange aucun.

La charge se compose :

1° à Flagstaff.	}	Minerai . . . . .	562 <sup>t</sup> ,400	} Minerai de Flagstaff $\frac{2}{3}$
		— Last Chance $\frac{1}{3}$		
		Coke . . . . .	56 <sup>t</sup> ,200	
		Charbon de bois . . . . .	6 bushels	
		Scories . . . . .	65 <sup>t</sup> ,420	
Soit p. 100 de minerai : scorie . . . . .			17,50	
Combustible (charbon de bois et coke) . . . . .			15,00	
2° à Last Chance	}	Minerai . . . . .	275 <sup>t</sup> ,600	} Minerai de Flagstaff $\frac{2}{3}$
		— Last Chance $\frac{1}{3}$		
		Calcaire . . . . .	12,768	
		Coke . . . . .	56,240	
		Charbon de bois . . . . .	6 bushels.	
		Scories . . . . .	15 <sup>t</sup> ,808	

soit p. 100 de minerai :

Combustible (charbon de bois et coke) . . . . .	11,88
Scories . . . . .	5,77
Calcaire . . . . .	4,66

1° *Produits. Plomb d'œuvre.* — La première usine produit 11<sup>t</sup>,791 de plomb d'œuvre avec 27<sup>t</sup>,210 de minerai, soit 1 tonne de plomb avec 2<sup>t</sup>,30 de minerai; la deuxième produit 9<sup>t</sup>,977 avec 45<sup>t</sup>,350, soit 1 tonne de plomb d'œuvre avec 4<sup>t</sup>,54 de minerai.

Le plomb d'œuvre contient dans les deux cas 5.810 grammes d'argent et 62<sup>gr</sup>,18 d'or à la tonne.

2° *Scories.* — Les scories n'ont jamais été analysées et rarement essayées. D'après les fondeurs, elles ne contiennent

ment pas plus de 2 à 3 p. 100 de plomb. Quant à sa teneur en métaux précieux, ils prétendent que la proportion entre les métaux précieux et le plomb est la même dans la scorie que dans le plomb d'œuvre. Si le fait se vérifiait, il prouverait que le plomb dans la scorie doit être à l'état métallique, et ce ne serait pas un indice de bonne direction.

3° *Mattes et speiss.* — Ces matières produites en quantité relativement faible, n'ont jamais été essayées. On ne les retraits pas; on ne sait même pas ce qu'on en produit.

Si l'on cherche à se faire une idée des pertes qu'occasionne ce traitement, on trouve des chiffres fort élevés pour les métaux précieux. En prenant pour base des calculs les teneurs des minerais indiquées précédemment, on trouve que ces pertes sur les valeurs estimées par la voie sèche sont :

à Flagstaff.	{	Pour le plomb. . . . .	15,05 p. 100
		Pour l'argent. . . . .	15,64 p. 100
		Pour l'or. . . . .	12,00 p. 100
à Last Chance.	{	Pour le plomb. . . . .	21,09 p. 100
		Pour l'argent. . . . .	12,50 p. 100
		Pour l'or. . . . .	12,00 p. 100

On trouve des valeurs tout autres si l'on prend pour base les nombres que donne M. R. W. Raymond, commissaire du gouvernement des États-Unis pour les statistiques minières. Il estime le plomb d'œuvre de Flagstaff à \$250 par tonne.

Si de ce nombre on retranche \$80, valeur de la tonne de plomb et 36, valeur de 2 onces d'or,

il reste \$154 pour valeur de l'argent dans le plomb d'œuvre, ce qui correspondrait à 150 onces ou 4.444 gr. par tonne.

La perte en argent monterait alors à 35 p. 100 de la teneur du minerai d'après l'essai par voie sèche. Je cite ce

fait pour montrer en présence de quelles difficultés on se trouve lorsqu'on veut étudier les opérations métallurgiques dans l'Utah. Dans la plupart des cas, les fondeurs se contentent d'établir la dépense brute et le gain ou la perte brut de l'année; ils ne connaissent ni les matières qu'ils traitent ni les produits qu'ils obtiennent. Les exceptions sont malheureusement trop rares.

Les deux autres usines dont il me reste à parler traitent les minerais de leurs propres mines, sans les mélanger.

A l'usine Wahsatch, traitant le minerai de la mine Spanish, on a passé dans deux fours à manche en dix-huit jours de campagne :

Minerai. . . . .	216,775	Soit p. 100 de minerai
Coke. . . . .	46,257	} Combustible. . . . . 22,42
Cbarbons de bois, 60 bushels		
Hématite. . . . .	47 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> ,617	. . . . . 21,96
Calcaire. . . . .	11,257	. . . . . 5,23
Scories. . . . .	90,700	. . . . . 41,84

On a produit 75<sup>1</sup>/<sub>2</sub>,281 de plomb d'œuvre à 1.500 grammes d'argent à la tonne, soit 1 tonne de plomb d'œuvre produite avec 2<sup>1</sup>/<sub>2</sub>,87 de minerai.

La perte en plomb aurait été de. . . . . 16,93 p. 100  
La perte en argent de. . . . . 12,05 p. 100  
de la teneur du minerai d'après la voie sèche.

La scorie contiendrait environ 5 p. 100 de plomb et 1/2 once, soit 17 grammes d'argent à la tonne. Cette scorie est beaucoup moins basique que les scories produites habituellement dans les autres usines. D'après différents essais elle contiendrait en moyenne :

Silice. . . . .	51,00
Oxyde de fer. . . . .	35,00
Oxyde de plomb. . . . .	6,37
Alumine. . . . .	7,00
	<hr/>
	99,37

Les mattes produites contiennent de 1.370 à 2.400 grammes d'argent à la tonne, et jusqu'à 40 p. 100 de plomb ; on en produit de 8 à 10 p. 100 du poids de plomb d'œuvre obtenu. Quand on en a une quantité suffisante, on les re-traite au four à cuve avec addition de fer métallique à la fin d'une campagne.

*Usine de Winnamuck.* — L'usine traite le minerai de la mine du même nom, dont on a vu précédemment l'analyse. Le lit de fusion est ainsi composé :

Minerai. . . . .	226 <sup>k</sup> ,500	} soit 18 p. 100 de minerai
Coke. . . . .	26,240	
Charbon de bois. . .	1 bushel	

On y ajoute :

Hématite. . . . .	35	—
Calcaire. . . . .	59	—
Scories. . . . .	16,60	—

Le plomb d'œuvre obtenu contient 5.127 grammes d'argent à la tonne.

M. E. Daggett, directeur de la fonderie, a publié un intéressant travail sur les opérations de l'année 1872. Le charbon de bois était alors l'unique combustible. Quelques extraits de ce travail, permettant de comparer les résultats de la marche au coke avec la marche au charbon de bois, ne sont pas sans intérêt.

On a fondu en 1872 :

Minerai. . . . .	4.360 <sup>k</sup> ,43	Soit p. 100 de minerai
Hématite. . . . .	1.554,34	— 35,19
Calcaire. . . . .	1.700,13	— 58,99
Scories. . . . .	705,00	— 16,16

Ces matières ont produit 1.118<sup>k</sup>,096 de plomb d'œuvre, contenant 5941<sup>gr</sup>,503 d'argent. On aurait perdu 11,41 p. 100 du plomb, et 5,80 p. 100 de l'argent contenus dans le minerai d'après les essais par voie sèche.

On avait brûlé 311.996 bushels de charbon = 1.841<sup>k</sup>,4 ou 42 de combustible pour 100 de minerai. En comparant ce résultat à celui donné précédemment, on voit qu'une tonne de coke produit le même effet que deux tonnes de charbon de bois, et l'on concevra l'importance de la transformation, quand on saura que le prix de la tonne de charbon de bois rendue à Winnamuck était le même que le prix de la tonne de coke.

La scorie produite contenait de 35 à 48 p. 100 de silice. En général on peut dire qu'elle ne tenait pas plus de 40 p. 100. En voici deux analyses :

1° Silice. . . . .	37,93	2° Silice. . . . .	35,60
Galène. . . . .	3,75	Oxyde de fer. . . .	34,80
Pyrite de fer. . . .	0,44	Chaux. . . . .	19,60
Alumine. . . . .	2,00	Autres bases non	} 10,00
Oxyde de fer. . . . .	30,76	déterminées.	
Chaux. . . . .	23,62		100,00
Magnésie. . . . .	0,57		
	99,07		

On peut estimer à 4 ou 5 p. 100 sa teneur minimum en plomb, et à 137 grammes à la tonne sa teneur en argent.

On produit des mattes contenant 2.400 grammes à la tonne, en quantité variant entre 8 et 10 p. 100 du poids de plomb d'œuvre produit. On aurait donc obtenu en 1872 environ 87 tonnes de mattes, contenant 214<sup>k</sup>,656 d'argent. Comme elles tiennent de 20 à 30 p. 100 de plomb, on les re-traite au four à cuve après grillage en tas, à la fin d'une campagne.

On remarquera combien les pertes sont faibles relativement à celles que subissent les autres usines. Des personnes bien placées pour les connaître exactement estiment qu'on perd 12 onces d'argent pour 150 onces contenues dans le bullion. En admettant même que ces chiffres soient corrects, il n'en reste pas moins que le traitement est bien supérieur à celui des autres fonderies de l'Utah.

*Prix de revient.* — Les prix de revient sont fort élevés. M. Daggett donne à ce sujet des détails d'autant plus précieux qu'ils sont plus rares. « Le prix de revient à Winnamuck, en 1872 (marché au charbon de bois), était fort élevé à cause de la grande quantité de fondants employés, de la mauvaise qualité et de la cherté du combustible. Dans les prix de revient ci-dessous sont compris les déchets survenus après que le charbon de bois a été délivré, mais non les déchets survenus pendant le transport à l'usine.

Par tonne de minerai.	
Charbon de bois. . . . .	125 <sup>cs</sup> ,95
Minerai de fer. . . . .	44,62
Calcaire. . . . .	9,78
Main-d'œuvre. . . . .	51,85
Divers. . . . .	13,91
	Frais de fusion. . . . . 224 <sup>cs</sup> ,11
	Dépenses d'extraction (mine). . . . . 29,98
	Frais généraux (mine et fonderie).. 19,56
	Essais, fret, etc. . . . . 5,84
	55 <sup>cs</sup> ,18
	Frais totaux. . . . . 279 <sup>cs</sup> ,29

par tonne de minerai.

« A ce nombre il convient d'ajouter la valeur des pertes, quoique la coutume soit générale dans l'ouest (c'est-à-dire à l'ouest des montagnes Rocheuses), en parlant des dépenses nécessaires pour fondre le minerai, de ne mentionner que le déboursement immédiat.

Valeur de 3,82 unité de plomb. . . . .	27 <sup>cs</sup> ,14
Valeur de 5 onces d'argent. . . . .	22,14
	Valeur de la perte. . . . . 49 <sup>cs</sup> ,28

« Les frais totaux par tonne de minerai ont donc été ainsi répartis :

Frais de fusion. . . . .	224 <sup>cs</sup> ,11
Perte. . . . .	49,28
Frais d'extraction et divers. . . . .	55,82
Frais généraux (mine et fonderie). . . . .	19,56
	Total. . . . . 328 <sup>cs</sup> ,57

« Si l'on partage les frais généraux par moitié entre la mine et la fonderie, les frais de fusion par tonne de minerai s'élevaient donc à 283<sup>cs</sup>,07. »

Il serait à souhaiter que M. Daggett fournisse pour l'année 1873 un tableau aussi intéressant que celui qu'il a fourni pour l'année 1872. Près de la moitié des frais de fusion ayant été dépensée pour le combustible, on pourrait savoir au juste quelle économie a produite l'emploi du coke. Elle doit être considérable; car, si l'on calcule les frais de fusion pour 1872, en supposant qu'on a brûlé du coke et que toutes les autres conditions soient restées les mêmes, on trouve que les frais de fusion auraient été abaissés à 197<sup>cs</sup>,84.

Donner une moyenne de prix de revient serait sans utilité, tellement les conditions sont variables avec les positions des usines, eu égard à la question des transports. On peut dire seulement que les frais totaux par tonne de minerai, y compris les dépenses d'extraction, varient de 190 à 300 francs par tonne de minerai et de 340 à 500 fr. par tonne de plomb d'œuvre produite.

*Consistance et personnel des usines.* — Les usines sont à peu près toutes semblables, ayant de 1 à 3 fours à cuve. Elles sont fort simples et se composent d'un hangar abritant les fours, la machine et la halle où l'on prépare le lit de fusion. Le personnel comprend :

- Un superintendant.
- Deux contre-maitres, un de jour et un de nuit, payés de 5 à 6 dollars par jour.
- Deux machinistes payés 4,50 dollars.
- Et douze hommes par four; quatre par poste de huit heures payés, les manœuvres 2,50 dollars, les chefs fondeurs 5 dollars par poste.

Quelquefois les postes sont de douze heures au lieu de huit, sans que le salaire varie ; les ouvriers sont généralement bons, surtout les Mormons, qui remplissent leurs engagements avec fidélité. Je ne parle pas ici des mineurs, population hétérogène et flottante qui n'est pas toujours des plus respectables.

*Transformation de la méthode de traitement.* — Comme on l'a vu, les pertes sont élevées, surtout les pertes en métaux précieux. Les usines citées sont les meilleures du pays et l'on a laissé de côté certains établissements où l'on selivre à une métallurgie vraiment fantaisiste. Ces pertes sont attribuables en grande partie à la non-condensation des fumées, à la faiblesse de la pression du vent, à la courte durée des campagnes, suite de l'emploi de scories trop basiques, enfin et surtout à la formation de mattes et speiss riches en argent et le plus souvent abandonnés. On produit tous les jours une quantité plus considérable de ces matières accessoires et importantes ; cette quantité augmente en proportion de la quantité toujours croissante de galène et de pyrites mélangées aux minerais oxydés : De ce fait résultera probablement et dans un temps assez court une transformation de la méthode actuellement suivie ; au lieu de la réduction pure et simple au four à cuve, on emploiera le grillage et la réduction, et l'on aura alors avantage à ajouter aux minerais de Bingham et Cottonwood Cañons les minerais de districts plus méridionaux (minerais plombo-cuivreux argentifères), pour en tirer des mattes de cuivre et du plomb d'œuvre.

L'usine de Warm Springs, près de Salt Lake City, marche déjà sur ces principes. Elle était arrêtée au moment de ma visite par suite des réparations qu'on faisait aux fours. Voici quelques renseignements sur son travail.

Elle contient un four à manche dit four Piltz et un four à réverbère. Un deuxième four à manche est en construction ainsi que des chambres de condensation. On fond des

minerais de Bingham, de Cottonwood et de East Tintic, district au S.-O. de Bingham. Ces derniers sont des galènes mélangées à des pyrites de fer et de cuivre argentifères. On les passe au réverbère où ils sont grillés, puis fondus. Le four traite de 6 à 8 tonnes par vingt-quatre heures et de 900 à 1.000 kilogrammes par opération. Les produits de cette opération sont des mattes et des scories.

1° Les mattes sont travaillées pour cuivre. Elles renferment :

Cuivre, de 10 à 15 p. 100.

Plomb, environ 20 p. 100.

Fer et antimoine, en petite quantité.

Argent, 1.025 grammes à la tonne.

On les concentre au réverbère après une liquation qui a pour but d'en retirer le plomb et l'argent, et, par deux ou trois opérations successives, on les amène à une teneur en cuivre de 70 p. 100, avec 2 ou 3 p. 100 de plomb et une proportion d'argent qu'on dit être négligeable. Les opérations sont conduites comme à Swansea (Galles). Le four est le four anglais connu, avec une pente de 0<sup>m</sup>,082 par mètre pour la sole.

2° Les scories contiennent :

Plomb, de 10 à 12 p. 100.

Argent, de 270 à 545 grammes par tonne.

Elles sont employées au four à cuve, avec des minerais oxydés, comme fondants. On consomme au réverbère environ 2 tonnes de houille par vingt-quatre heures ; les postes sont de huit heures, et composés de deux hommes avec un aide accidentel.

Le four à manche est circulaire ; son diamètre est de 0<sup>m</sup>,70 ; sa hauteur du dessus des tuyères de 4<sup>m</sup>,25. Il est

à poitrine ouverte et passe de 10<sup>t</sup>,884 à 13<sup>t</sup>,605 par vingt-quatre heures. En sept jours on a passé :

Minérai . . . . .	94 <sup>t</sup> ,328
Scories du réverbère et calcaire } . . . . .	9,070 environ
Combustible . . . . .	15,417

La production a été remarquablement faible : 8<sup>t</sup>,271 de plomb d'œuvre donnant à l'essai 7,827 grammes par tonne, et une certaine quantité d'or. On aurait donc obtenu 907 kilogrammes de plomb d'œuvre avec 10<sup>t</sup>,321 de minérai. C'est fort peu.

On emploie comme combustible un mélange de coke, de charbon de bois et de bois. La raison donnée pour justifier ce mélange est que le coke est trop dense et la pression insuffisante. On ajoute alors du charbon de bois pour activer la fonte, puis du bois, parce que ce dernier combustible est moins cher et donne à égalité de poids le même effet que le charbon de bois. On charge d'abord le bois, puis le charbon de bois, puis le coke.

*Désargentation des plombs d'œuvre.* — Aucune des usines qui fondent le minérai dans l'Utah ne désargente son plomb d'œuvre. Le produit est expédié à Newark (près New-York), à Omaha, à Chicago, ou à San Francisco pour être raffiné. Depuis un an environ, une compagnie de New-York a construit à quelques milles au sud de Salt Lake City une usine de désargentation dont il me reste à parler. C'est un des établissements métallurgiques les plus remarquables aux États-Unis par les résultats qu'il obtient.

Partout en Amérique la désargentation des plombs d'œuvre se fait au moyen du zinc. Dans les quatre usines de Newark, Omaha, Chicago, San Francisco, on emploie le procédé Balbach. A l'usine Germania (Utah), on emploie le procédé Flach, modifié par M. H. Siéger, directeur de l'usine.

L'usine traite des plombs de l'Utah et du Nevada. Les plombs de l'Utah contiennent généralement :

Antimoine. . . . .	de 1 à 2½ p. 100, rarement 5 et 6.
Arsenic. . . . .	de ¾ à 1 p. 100.
Cuivre. . . . .	de 2 à 4 p. 100.
Argent. . . . .	de 3.418 à 17.089 grammes
Or. . . . .	jamais plus de 2 onces, soit 62 gr. } à la tonne.

Les plombs du Nevada proviennent du district de White Pine, près de la frontière ouest de l'Utah. Leur composition est la suivante :

Fer. . . . .	jusqu'à 1½ p. 100.
Cuivre. . . . .	jusqu'à 5 p. 100.
Antimoine. . . . .	de ¾ à 1½ p. 100.
Or. . . . .	de 102 à 275 grammes
Argent. . . . .	de 4.750 à 5.127 grammes } à la tonne.

Il y a de ces plombs qui contiennent jusqu'à 22 p. 100 de cuivre.

*Traitement.* — Les plombs assez purs, c'est-à-dire ne contenant pas plus de 0,3 à 0,4 d'arsenic et 1 p. 100 d'antimoine, sont passés directement dans les chaudières de zingage. Les plombs impurs sont affinés incomplètement dans un grand four à réverbère, où ils restent en moyenne douze heures. On écume le bain deux fois pendant cet intervalle ; puis on coule le plomb purifié dans un vaste chaudron en fonte, à chauffe distincte. On le dégrasse et on le coule en lingots.

On brûle en douze heures 526<sup>k</sup>,16 de houille.

Un ouvrier pour le four, deux gamins pour la chaudière, Charge du four : de 25 à 28 tonnes.

Produits : plomb passant au zingage.

Crasses passant au four à cuve n° 2.

*Zingage.* — Cette opération se fait dans une batterie de cinq chaudières dont deux ont une capacité de 28 tonnes, n° 1 ;

Les deux autres sont environ moitié moindres, n° 2 ;

La dernière est encore plus petite, n° 3.

Les chaudières n° 1 reçoivent la charge. On y fond le plomb, puis on ajoute le zinc en trois fois. Comme le plomb contient de l'or et du cuivre, on cherche à former avec le zinc un premier alliage cupro-aurifère, de façon à éviter la séparation ultérieure de l'or et de l'argent, dont les frais sont très-élevés aux États-Unis. Par les essais, on détermine quelle est la quantité de zinc à ajouter d'après les teneurs en cuivre et en or. La concentration de l'or dans l'argent est portée de 20 à 25 onces d'or pour 1.000 onces d'argent ; elle a été jusqu'à 52 onces d'or. Pour 31 onces d'or et 3.150 onces d'argent, on ajoutera 725 livres de zinc. Les premières écumes cupro-aurifères sont mises à part.

Lorsqu'elles ont été enlevées, on ajoute de nouveau du zinc et l'on écume tant qu'on voit les petits cristaux d'alliage nager à la surface du bain métallique. La proportion de zinc à ajouter est déterminée par un essai du plomb pour argent. On en rajoute une troisième fois, si c'est nécessaire. Les écumes sont passées dans les chaudières n° 2 et n° 3, où l'on porte la concentration de l'argent dans le zinc à 10 ou 20 et même 22 p. 100. Les écumes argentifères des chaudières n° 2 et 3 sont mises à part et le plomb, résidu, est rapporté à la chaudière n° 1.

Durée de l'opération : 19 à 24 heures.

Cinq ouvriers par poste de 12 heures.

On ajoute 3 p. 100 de zinc pour du plomb d'œuvre contenant 258 onces, soit 8.000 grammes d'argent à la tonne.

La proportion de zinc dans les alliages riches varie de 25 à 55 p. 100, tout l'antimoine reste avec le plomb dés-argenté dans la grande chaudière n° 1, son affinité pour le zinc étant très-faible.

*Traitement des écumes argentifères.* — Ces écumes sont

fondues dans un four à cuve rectangulaire n° 1, à trois tuyères :

Charge : 200 kilog. d'alliage.

180 kilog. de scories de puddlage que l'on remplace

maintenant par  $\left\{ \begin{array}{l} 90 \text{ kil. scories de puddlage} \\ 90 \text{ kil. scories de l'usine.} \end{array} \right.$

12 kilog. coke (Connesville, bonne qualité).

16 kilog. coke (Saint-Louis, qualité médiocre).

On passe en vingt-quatre heures 140 kilogrammes d'argent dans ce four. On produit en douze heures jusqu'à 70 lingots de plomb de coupelle, chacun d'eux pesant 22 livres américaines, soit 697<sup>k</sup>,620.

Les produits du four sont :

1° Le plomb de coupelle pouvant contenir jusqu'à 0,1 p. 100 de zinc sans que la coupellation en soit affectée.

2° Des scories tenant  $\left\{ \begin{array}{l} \text{de } 0,02 \text{ à } 0,55 \text{ p. } 100 \text{ de plomb} \\ \text{et de } 5 \text{ à } 15 \text{ gr. d'argent} \end{array} \right\}$  à la tonne.

Elles sont repassées, soit dans le même four, soit dans le four à cuve n° 2. Elles sont très-basiques :

Silice. . . . .	55
Oxyde de fer. . . . .	66
	99

Leur couleur est noire ; souvent elles sont cristallisées. Ces scories sont coulées toutes les dix minutes, et le plomb à intervalles d'une heure et demie. La quantité de scories produite n'est pas considérable. On ne la connaît pas encore exactement. Le four marche fermé au gueulard pour éviter aux ouvriers les vapeurs d'arsenic, très-abondantes avec certains plombs d'œuvre. On a soin que le sommet de la charge soit bien noir, de façon que l'argent entraîné puisse se déposer dans les chambres de condensation à l'état métallique. Pour cela, il faut une pression assez forte, environ

0<sup>m</sup>,24 d'eau. Dans les expériences faites au Harz sur ce procédé on employait une pression insuffisante, 0<sup>m</sup>,09 d'eau.

*Traitement des écumes aurifères.* — Les écumes aurifères sont traitées dans le même four à cuve, mais à part. Les charges passent beaucoup plus vite, la proportion de zinc dans l'alliage étant beaucoup moins considérable que dans l'alliage argentifère. On peut produire environ 18 lingots, soit 179<sup>k</sup>,58 de plomb de coupelle en deux heures.

Charge : 250 kilogrammes d'alliage avec une petite quantité d'hématite rouge. On obtient comme produits :

1° Du plomb de coupelle;

2° Des crasses cuivreuses, contenant de 18 à 20 p. 100 de cuivre et de 1.200 à 2.200 grammes d'argent à la tonne. Elles seront prochainement traitées pour cuivre noir dans un four à cuve ;

3° Des scories à 18 p. 100 de silice seulement, qui re-passent soit au four n° 1, soit au four n° 2.

*Coupeellation.* — L'usine comporte quatre coupelles anglaises, toutes en marche, produisant par mois 3.100 kilogrammes d'argent et de 18<sup>k</sup>,6 à 27<sup>k</sup>,9 d'or. L'argent est porté à 998 et 998 1/2 de fin dans la coupelle.

Les litharges sont révivifiées dans des fours ordinaires et produisent de 6 à 7 tonnes de plomb par vingt-quatre heures.

*Traitement des produits secondaires.* — Le plomb pauvre désargenté, restant dans les chaudières n° 1, contient de 1/2 à 0,6 p. 100 de zinc et la majeure partie de l'antimoine. Il est coulé directement des chaudières de zingage dans un grand réverbère où on l'adoucit. Le zinc est volatilisé et l'antimoine enlevé à l'état de crasses ou *dross*. La durée de l'opération varie de douze à vingt-quatre heures pour une charge de 25 tonnes, suivant la teneur en antimoine.

Les produits de l'opération sont du plomb et des crasses.

1° Le plomb est coulé dans un grand chaudron pouvant

contenir 25 tonnes. Il est soumis au perchage. Le produit est fort bon ; c'est du plomb pouvant servir à la fabrication de la céruse. En voici une analyse faite par Frésenius :

Zinc. . . . .	0,0025
Antimoine. . . . .	0,0056
Fer. . . . .	0,0226
Cuivre. . . . .	traces
Plomb. . . . .	999,7533
	<hr/>
	999,7820

Il contient de 3 à 4 grammes d'argent à la tonne ; l'analyse précédente a été faite sur un échantillon provenant d'un plomb d'œuvre du Nevada qui contenait 1 1/2 p. 100 de fer. Ordinairement le plomb doux, produit du perchage, ne contient pas plus de 0,0165 p. 100 de fer.

2° Les crasses sont traitées dans le four à manche n° 2 et donnent comme produits : des scories qu'on jette, et du plomb antimonieux, qu'on adoucit au réverbère. On obtient ainsi : 1° du plomb marchand bon pour tuyaux et feuilles ; 2° un alliage antimonieux, qui, après concentration, est vendu pour caractères d'imprimerie.

Production journalière de l'usine : 40 à 42 tonnes de plomb marchand.

Perte totale : 5 3/4 p. 100 en plomb. Mais on remarquera que ce résultat est celui de la première année de marche, et que déjà plus de 16 tonnes de plomb ont été retrouvées en démolissant un fourneau.

Pour l'or on a retrouvé un excédant de 196 onces, soit 6.076 grammes, en huit mois de travail. Pour l'argent l'excédant a été en moyenne de 1,6 de la valeur, d'après l'essai par voie sèche. C'est la seule usine aux États-Unis où l'on obtienne un pareil résultat. Dans aucune autre la valeur de l'argent produit n'est en excédant sur la valeur de l'essai par voie sèche.

*Frais de traitement.* — Pour un plomb d'œuvre contenant :

Cuivre. . . . .	2 $\frac{1}{2}$ p. 100.	} à la tonne.
Antimoine. . . . .	1 $\frac{1}{2}$ p. 100.	
Argent. . . . .	196 onces = 6.076 gr.	
Or. . . . .	2 onces = 52 gr.	

Les dépenses sont les suivantes, par tonne traitée :

Main d'œuvre. . . . .	\$ 4,02 = 18',457
Houille, 226 <sup>k</sup> ,2. . . . .	2,27 = 10,403
Zinc, 2 $\frac{3}{4}$ p. 100. . . . .	3,50 = 16,068
Coke, minerai de fer, scories de puddlage, etc. . . . .	3,80 = 17,458
Total . . . . .	\$ 13,59 = 62',366

A quoi il faut ajouter le dechet du plomb, 3  $\frac{3}{4}$  p. 100, soit \$3,05, plus \$2 de frais généraux. Il faut retrancher de cette somme 1,6 p. 100 excédant de l'argent, soit \$4,07, ce qui donne un total de \$14,57 = 66',846.

A Marseille, avec le même procédé, les frais sont de 25 francs.

A Newcastle, 15 sh. = 18',75.

Un des fours à réverbère où l'on adoucit le plomb désargenté étant hors de marche, on a cherché à purifier le plomb par le salpêtre et la chaux vive. A Eifel, en Prusse, on a purifié du plomb antimonieux au moyen de la chaux et d'un perchage. Mais le procédé est trop long et d'ailleurs dans l'Utah, le plomb d'œuvre contient de 1  $\frac{1}{3}$  à 2  $\frac{1}{2}$  p. 100 d'antimoine, tandis qu'en Prusse la quantité était minime.

On a cherché à l'usine Germania à remplacer le perchage par l'action beaucoup plus rapide du salpêtre unie à celle de la chaux. On a mis le plomb dans un chaudron en fonte contenant environ 6 tonnes. On a fondu et ajouté 10 livres de chaux. Brassage de plusieurs heures, puis repos d'une heure. On ajoute de nouveau 10 livres de chaux et 10 livres de salpêtre; on élève assez fortement la température au-

dessus du rouge sombre. Il y a toujours à la surface du bain une croûte prévenant l'oxydation du plomb. On brasse, puis laisse reposer six heures en abaissant la température progressivement et on écume. On ajoute 10 livres de chaux et 5 livres de salpêtre, et l'on recommence les mêmes opérations jusqu'à ce que l'apparence du plomb dénote une pureté suffisante.

Les crasses provenant de cette opération ressemblent à celles qu'on retire du même plomb dans le four à réverbère; elles sont plus brunes. L'opération a duré vingt-quatre heures. Le plomb produit était bon pour tuyaux et feuilles; mais le procédé est trop coûteux pour pouvoir être employé d'une façon continue en Amérique.

*Remarque.* — En résumé, tout en rendant justice à l'énergie des individus qui ont fait naître l'industrie, il est difficile de considérer les résultats comme très-satisfaisants même dans les usines les mieux conduites. Les minerais n'étant pas riches et les frais de traitement étant élevés, les bénéfices doivent être faibles. Quels peuvent être les résultats, sinon des pertes financières, dans certains autres établissements où l'on perd au moins la moitié des métaux contenus dans les minerais (R. W. Raymond), et faut-il s'étonner que sur trente-neuf fours existant en juillet 1873, vingt-quatre fussent hors de marche? C'est plus encore à l'ignorance de la véritable économie et à la spéculation qu'aux imperfections du traitement métallurgique qu'il faut attribuer cet insuccès. On construit des usines sans avoir les capitaux nécessaires pour entretenir leur marche. L'ensemble de ces établissements est capable de traiter annuellement 180.000 tonnes, et les mines en produisent 30.000 seulement. Il en résulte des hausses exagérées sur le marché: on achète le minerai à des prix si exorbitants quelquefois que les profits et pertes doivent être couverts par la somme modique de 2',75. La seule explication

qu'on puisse donner de ces hauts prix d'achat payés par des usines qui manquent de fonds est, ou bien que les propriétaires perdent de l'argent sans le savoir, ou bien qu'ils le perdent sciemment avec l'intention de vendre leurs mines à des prix élevés, basés sur des résultats métallurgiques soi-disant favorables. Cet ensemble de faits regrettables paralyse en partie les avantages qu'une population agricole sédentaire, et une grande facilité de communications présentent à l'industrie dans l'Utah; c'est lui qui rend peu profitable le placement des capitaux dans les affaires industrielles de ce territoire.

#### § IV. — Production de l'Utah en 1872.

J'ajoute ici le tableau de la production de l'Utah en métaux précieux et en plomb pendant l'année 1872, d'après M. R. W. Raymond, commissaire de statistique minière.

Plomb d'œuvre, 7.570<sup>l</sup>,090 produites comme il suit :

Usine Flagstaff. . . . .	2.721 <sup>l</sup> ,000 à 1.512 <sup>l</sup> ,50 la tonne	3.957.500 <sup>l</sup> ,00
— Sultana. . . . .	1.595,287 à 955,60	— 1.457.082,50
— Winnamuck. . . . .	1.117,552 à 1.506,60	— 1.856.142,75
— Utah. . . . .	589,607 à 656,25	— 426.562,50
— Saturn. . . . .	1.094,855 à 1.225,62	— 1.482.006,75
— Wahsatch. . . . .	136,065 à 1.512,50	— 196.875,00
Autres usines. . . . .	317,480 à 1.512,50	— 459.375,00
Argent expédié par express, 5.291 <sup>l</sup> ,408. . . . .		1.054.531,55
Barres et poudre d'or, <i>id.</i> 1.725 <sup>l</sup> ,46 . . . . .		525.042,00
Minérai expédié, 9.585 <sup>l</sup> ,458 à 462 fr. la tonne. . . . .		4.780.245,75

Pour obtenir la production du territoire en or et en argent seulement, il faut déduire de la somme de ces valeurs la valeur du plomb. Soit :

7.570<sup>l</sup>,090 à 412 fr. . . . . 3.122.500,00

Reste : Total or et argent. . . . . 12.842.665<sup>l</sup>,60

Pour obtenir la production totale en or, argent et plomb, il faut ajouter le plomb contenu dans le minérai expédié. 30 p. 100 de ce minérai ou 2.815<sup>l</sup>,473 peuvent être considérés comme du plomb valant 0<sup>l</sup>,29 le kilogramme. Soit. . . . . 814.815,75  
Ce qui porte la valeur de la production totale à . . 16.969.979<sup>l</sup>,75

D'un autre côté en partant des rapports publiés par les chemins de fer, la compagnie de transport express Wells, Fargo et compagnie, et l'usine Germania, on arrive aux nombres suivants :

Minérai expédié, 9.585 <sup>l</sup> ,458 estimés or et argent à. . . . .	4.780.245 <sup>l</sup> ,75
Plomb d'œuvre, 5.018 <sup>l</sup> ,451 à 987 <sup>l</sup> ,61 la tonne. . . . .	4.347.173,25
Plomb acheté par l'usine Germania, 838 <sup>l</sup> ,975. . . . .	726.689,25
Argent expédié par Wells, Fargo et C <sup>ie</sup> , 5.291 <sup>l</sup> ,408. . . . .	1.054.531,25
Or — — — — —	172,236,00
Total, or et argent. . . . .	11.435.481 <sup>l</sup> ,50

Somme à laquelle il faut ajouter pour le plomb :

Plomb d'œuvre non raffiné, 5.081 <sup>l</sup> ,451 à 0 <sup>l</sup> ,46 le kil. . . . .	2.324.038 <sup>l</sup> ,50
Plomb en magasin à l'usine Germania, 757 <sup>l</sup> ,545. . . . .	350.700,00
Plomb d'œuvre raffiné expédié, 81 <sup>l</sup> ,630 à 0 <sup>l</sup> ,69 le kil. . . . .	56.700,00
30 p. 100 de la quantité des minerais expédiés, } . . . . .	814.815,75
12.815 <sup>l</sup> ,473 à 0 <sup>l</sup> ,29 le kilog. . . . .	
Production totale apparente. . . . .	14.979.755 <sup>l</sup> ,75

Si l'on compare le nombre des tonnes de plomb d'œuvre expédiées et la quantité de ce plomb qu'a achetée l'usine Germania avec le nombre total de tonnes produites par les différentes usines, on voit que l'excès du nombre de tonnes produites sur le nombre de tonnes expédiées est de 1.411<sup>l</sup>,615. A la fin de l'année cet excès devait être, soit aux fourneaux, soit en transit sur les chemins de fer. Si l'on calcule sa valeur en estimant la tonne à 987<sup>l</sup>,61 et qu'on l'ajoute au total de l'or et argent donné par la seconde récapitulation, on trouve :

1.411 <sup>l</sup> ,615 à 987 <sup>l</sup> ,61. . . . .	1.309.218 <sup>l</sup> ,75
Plus. . . . .	14.979.755,75
Total. . . . .	16.288.954 <sup>l</sup> ,50

## DU PROFIL RATIONNEL DES SEGMENTS DES PISTONS

DES MACHINES A VAPEUR.

Par H. RÉSAL.

On n'emploie plus guère maintenant, dans la construction des machines à vapeur, que le piston dit suédois qui présente, sur ceux qui en ont précédé l'application, des avantages notables au point de vue de la simplicité, de la solidité et de l'obturation.

Le corps du piston est d'un diamètre légèrement inférieur au diamètre intérieur du cylindre.

Sur sa surface latérale on a pratiqué un certain nombre de cannelures circulaires identiques, également espacées, à section rectangulaire, dans lesquelles on fait pénétrer des bagues (*segments*) en fonte ou en acier, coupées suivant deux sections transversales voisines et dont l'épaisseur, ou est uniforme, ou va en augmentant à partir de chaque extrémité jusqu'au milieu.

Les segments débordent la surface du piston pour que, après la mise en place, ils exercent une pression sur la paroi du cylindre de manière à intercepter plus ou moins la communication entre les deux faces.

Lorsqu'il y a plusieurs segments, ils sont disposés de manière que les fentes ne soient pas limitées par les mêmes génératrices.

Un segment se place en ouvrant suffisamment ses deux branches pour lui faire embrasser le piston, et en le poussant ensuite jusqu'à sa cannelure.

Il est clair que, à l'état naturel, un segment devrait avoir

une forme telle que, après la mise en place, il prit exactement celle de la section intérieure du cylindre, que ses deux extrémités vinssent joindre, et, pour que l'usure fût uniforme, que la pression rapportée à l'unité de surface exercée par le piston fût constante.

Nous nous proposons dans ce mémoire d'étudier les formes qui satisfont à ces conditions.

Supposons que le segment à l'état naturel soit placé de manière que sa section du milieu  $A_1 B_1$  (Pl. I, fig. 7), passe par l'axe  $O$  du cylindre dont nous désignerons le rayon par  $R$ , et que la forme de la fibre moyenne diffère peu d'un cercle de rayon  $R_0$ .

Le rayon vecteur joignant l'origine  $O$  à un point quelconque  $C$  de la fibre moyenne pourra se présenter par

$$r_0 = R_0 (1 + u_0) \quad \text{ou} \quad r = R_0 (1 + u),$$

selon qu'elle sera à l'état naturel ou déformée,  $u_0$  et  $u$  étant des quantités assez petites pour que l'on puisse en négliger les carrés et ceux de leurs dérivés par rapport à l'angle polaire  $\theta$ , mesuré à partir du rayon  $OC_1$  mené au milieu  $C_1$  de la fibre.

Soient  $p$  la pression uniforme que doit exercer le segment sur le cylindre ;

$\varphi$  l'angle que forme une section quelconque  $A'C'B'$  avec une section déterminée  $AB$  définie par l'angle  $\theta$  ;

$A_0 C_0 B_0$  la section qui termine l'une des branches du segment.

Nous pouvons faire abstraction de la largeur de la bague dans le sens de l'axe  $O$  ou la supposer égale à l'unité, attendu qu'elle resterait en facteur commun dans les deux membres des équations que nous allons établir.

En négligeant la différence qui existe entre la fibre moyenne et le cercle de rayon  $R_0$  ainsi que l'angle au centre correspondant à la fente, le moment de la pression

totale sur l'arc  $A_0A$  par rapport au centre de gravité  $C$  de la section  $AB$  est

$$\int_0^{\pi-\theta} pRd\varphi \cdot R_0 \sin \varphi = pRR_0 (1 + \cos \theta) = 2pRR_0 \cos^2 \frac{\theta}{2}.$$

Soient :

$E$  le moment d'élasticité de la matière ;

$v$  la demi-largeur de la section normale en  $C$  ;

$\rho_0, \rho$  les rayons de courbure, en ce point, de la fibre moyenne, avant et après la déformation.

Le moment d'inertie de la section par rapport à  $C$  étant  $\frac{2}{3} v^3$ , on a

$$(1) \quad \frac{1}{3} Ev^3 \left( \frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} \right) = pRR_0 \cos^2 \frac{\theta}{2}.$$

Nous ferons abstraction de la compression longitudinale

$$p \frac{R}{v} (1 + \cos \theta) = 2pR \cos^2 \frac{\theta}{2},$$

devant la force élastique

$$(2) \quad Ev \left( \frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} \right) = 3p \cdot \frac{RR_0}{v^2} \cos^2 \frac{\theta}{2},$$

ce qui revient, comme approximation, à négliger devant l'unité le rapport  $\frac{v}{R_0}$ , qui est toujours une petite fraction.

*Forme d'égale résistance.* — Soit  $\Gamma$  la tension ou compression élastique maximum que doit supporter la matière. Examinons d'abord si la forme d'un solide d'égale résistance est compatible avec l'hypothèse de  $u, u_0$  très-petits ; nous aurons d'abord

$$Ev \left( \frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} \right) = \Gamma,$$

d'où en vertu de l'équation (2)

$$v = \sqrt{\frac{3pRR_0}{\Gamma}} \cdot \sin \frac{\theta}{2}.$$

Or (\*)

$$(3) \quad \frac{1}{\rho} - \frac{1}{R_0} = -\frac{1}{R_0} \left( u + \frac{d^2u}{d\theta^2} \right), \quad \frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{R_0} = -\frac{1}{R_0} \left( u_0 + \frac{d^2u_0}{d\theta^2} \right),$$

de sorte qu'en posant

$$u_0 - u = w, \quad v_1 = \sqrt{\frac{3pRR_0}{\Gamma}},$$

$v_1$  étant la demi-largeur en  $C_1$ , on a

$$\frac{d^2w}{d\theta^2} + w = \frac{\Gamma R_0}{Ev_1 \cos \frac{\theta}{2}}.$$

Pour des valeurs de  $\theta$  voisines de  $180$ , le second membre de cette équation serait très-grand, ce qui est incompatible

(\*) Soient en effet  $\varphi$  l'angle  $mNx$ , formé par la normale  $mN$  en  $m$  avec  $Ox$  et  $mT$  la tangente en  $m$ .

On a

$$\varphi = \theta + O \hat{m} N,$$

$\text{tang } O \hat{m} N = \text{tang } (O m T - 90^\circ) = -\cot OmT = -\frac{dr}{rd\theta} = -\frac{du}{d\theta}$ ,  
d'où, d'après le mode d'approximation adopté,

$$O \hat{m} N = -\frac{du}{d\theta},$$

$$\varphi = \theta - \frac{du}{d\theta}, \quad d\varphi = d\theta - \frac{d^2u}{d\theta^2} d\theta.$$

On a aussi

$ds = \sqrt{r^2 d\theta^2 + dr^2} = \sqrt{R^2 (1+u)^2 d\theta^2 + R^2 du^2} = R(1+u) d\theta$ ,  
et enfin

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d\varphi}{ds} = \frac{1 - \frac{d^2u}{d\theta^2}}{R(1+u)} = \frac{1}{R} - \frac{1}{R} \left( 1 + \frac{d^2u}{d\theta^2} \right).$$

avec l'hypothèse que nous avons faite sur la petitesse de  $u$ ,  $u_0$  et de leurs dérivés. Il faut donc renoncer à la forme d'un solide d'égale résistance.

*Hypothèse de  $v = v_0 \left(1 + \varepsilon \cos \frac{\theta}{2}\right)$ ,  $v_0$  et  $\varepsilon$  étant des constantes.* — L'analyse précédente nous conduit à cette hypothèse pour obtenir un segment dont la résistance n'éprouve que des variations restreintes de l'un à l'autre de ses points.

L'équation (1) donne pour la plus grande force élastique développée dans une section quelconque

$$(4) \quad Ev \left( \frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} \right) = \frac{3pRR_0 \cos^2 \frac{\theta}{2}}{v_0^2 \left(1 + \varepsilon \cos \frac{\theta}{2}\right)^2}.$$

Le maximum de cette expression correspond à  $\theta = 0$ , d'où la première relation

$$(5) \quad \Gamma = \frac{3pRR_0}{v_0^2 (1 + \varepsilon)^2}.$$

L'équation (4) peut maintenant se mettre sous la forme

$$(6) \quad \frac{d^2w}{d\theta^2} + w = \frac{\Gamma R_0}{Ev_0} (1 + \varepsilon) \frac{\cos^2 \frac{\theta}{2}}{\left(1 + \varepsilon \cos \frac{\theta}{2}\right)^2},$$

ou en développant le second membre de cette équation suivant les puissances ascendantes de  $\varepsilon$ .

$$\frac{d^2w}{d\theta^2} + w = \frac{\Gamma R_0}{Ev_0} (1 + \varepsilon)^2 \cos^2 \frac{\theta}{2} \left[ 1 - 3 \varepsilon \cos \frac{\theta}{2} + \frac{1}{2} \sum_{n=2}^{\infty} (-\varepsilon)^n (n+1)(n+2) \cos^n \frac{\theta}{2} \right].$$

Ce second membre pourra être remplacé par une suite indéfinie de sinus et cosinus des multiples de  $\frac{\theta}{2}$  et dont les coefficients, au facteur  $\frac{\Gamma R_0}{Ev_0}$  près, ne dépendront que de  $\varepsilon$ .

Posant donc

$$\frac{d^2w}{d\theta^2} + w = \sum \left( A_n \cos n \frac{\theta}{2} + B_n \sin n \frac{\theta}{2} \right),$$

il vient

$$w = A_0 + \frac{4}{3} \left( A_1 \cos \frac{\theta}{2} + B_1 \sin \frac{\theta}{2} \right) + \frac{\theta}{2} (A_2 \sin \theta - B_2 \cos \theta) + 4 \sum_{n=3}^{\infty} \left( \frac{A_n \cos n \frac{\theta}{2} + B_n \sin n \frac{\theta}{2}}{4 - n^2} \right) + M \cos \theta + N \sin \theta,$$

M et N étant deux constantes arbitraires.

On peut supposer que, avant son introduction dans le cylindre, le segment soit placé de manière que  $A_1$  ou  $C_1$  n'éprouve ensuite aucun déplacement, et comme  $OC_1$  est normal à la fibre moyenne après comme avant la déformations, les arbitraires se détermineront par les conditions

$$w = 0 \quad \frac{dw}{d\theta} = 0, \quad \text{pour } \theta = 0.$$

Mais on doit avoir par hypothèse

$$(7) \quad R_0 (1 + w) + v = R$$

ou

$$(8) \quad v_0 = (1 + u_0) = R - v_0 \left(1 + \varepsilon \cos \frac{\theta}{2}\right) + R_0 w,$$

et en remplaçant  $w$  par sa valeur, on aura l'équation polaire de la fibre moyenne à son état naturel et la forme de pièce sera complètement déterminée, si l'on se donne  $R_0$  qui reste indéterminé dans certaines limites. Nous pour-

rons supposer  $R_0 = OG_1$ , ou

$$(9) \quad R_0 = R - v_0(1 + \epsilon);$$

nous aurons alors

$$(10) \quad u_0 = \frac{v_0 \epsilon}{R_0 \epsilon} \left( 1 - \cos \frac{\theta}{2} \right) + w,$$

et par suite en vertu des formules (3) et (5)

$$(11) \quad \left\{ \begin{aligned} \frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{R_0} &= -\frac{v_0 \epsilon}{R_0^2} \left( 1 - \frac{3}{4} \cos \frac{\theta}{2} \right) - \\ & - \frac{\Gamma}{Ev_0} (1 + \epsilon)^2 \frac{\cos 2 \frac{\theta}{2}}{\left( 1 + \epsilon \cos \frac{\theta}{2} \right)^3}. \end{aligned} \right.$$

Nous ferons remarquer que l'analyse précédente suppose implicitement que  $\frac{v_0 \epsilon}{R}$  est une assez petite fraction pour que l'on puisse en négliger le carré devant l'unité.

*Cas où l'épaisseur est uniforme.* — Actuellement un grand nombre de constructeurs admettent une épaisseur uniforme pour les segments. Nous allons étudier spécialement ce cas ou celui de  $\epsilon = 0$ . Nous aurons

$$(9') \quad R_0 = R - v_0,$$

$$(10') \quad u_0 = w,$$

$$(11') \quad \frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{R_0} = -\frac{\Gamma}{Ev_0} \cos^2 \frac{\theta}{2},$$

$$(5') \quad \Gamma = \frac{3\mu R(R - v_0)}{v_0^2},$$

$$(6') \quad \frac{d^2 u}{d\theta^2} + u_0 = \frac{\Gamma R_0}{Ev_0} \cos^2 \frac{\theta}{2} = \frac{\Gamma(R - v_0)}{2Ev_0} (1 + \cos \theta),$$

d'où

$$u_0 = \frac{\Gamma(R - v_0)}{2Ev_0} \left( 1 + \frac{1}{2} \sin \theta + M \cos \theta + N \sin \theta \right),$$

et comme on a  $u_0 = 0$ ,  $\frac{du_0}{d\theta} = 0$ , pour  $\theta = 0$ , il vient

$$(12) \quad u_0 = \frac{\Gamma(R - v_0)}{2Ev_0} \varphi(\theta),$$

en posant pour simplifier l'écriture

$$(13) \quad \varphi(\theta) = 1 - \cos \theta + \frac{\theta}{2} \sin \theta.$$

Le maximum de cette fonction correspond à la valeur de  $\theta$  donnée par

$$(14) \quad \text{tang } \theta = -\frac{\theta}{3},$$

soit environ  $\theta = 141^\circ$ .

Pour bien nous rendre compte de la manière dont varie la fonction  $\varphi$ , nous avons formé le tableau suivant :

$\theta$	$\varphi(\theta)$	$\theta$	$\varphi(\theta)$	$\theta$	$\varphi(\theta)$
0°	0,000	70	1,232	140	2,551
10	0,030	80	1,513	150	2,520
20	0,120	90	1,785	160	2,427
30	0,265	100	2,034	170	2,242
40	0,458	110	2,214	180	2,000
50	0,691	120	2,407		
60	0,953	130	2,512		

Le rayon vecteur du profil extérieur du segment étant  $r' = R_0(1 + u_0) + v_0 = R + (R - v_0)u_0$ , sa valeur moyenne est

$$(15) \quad R_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi r' d\theta = R + \frac{3}{4} \frac{\Gamma(R - v_0)^2}{Ev_0}.$$

Soit  $\delta\theta$  la variation éprouvée par  $\theta$  par suite de la déformation; en négligeant les variations de longueur des éléments de la fibre moyenne dues aux composantes longitudinales, il faut exprimer que  $ds$  ne change pas de longueur

ou que  $(1 + u_0) d\theta = d(\theta + \delta\theta)$ , d'où

$$\delta\theta = \int_0^{\theta} u_0 d\theta.$$

Pour que les deux extrémités du segment se joignent, après la mise en place, il faut que l'angle au centre qui les détermine soit égal au double de  $\delta\theta$  pour  $\theta = \pi$  aux termes près du second ordre. En appelant  $i$  cet angle, on a

$$(16) \quad i = \int_0^{\pi} u_0 d\theta = \frac{\pi(R_1 - R)}{R - v_0}.$$

Pour que l'on puisse introduire le segment dans le cylindre sans danger de rupture, il faut que le maximum de  $E v_0 \left( \frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{R + v_0} \right)$  soit au plus égal à la limite d'élasticité que nous désignerons par  $\Gamma'$ , ou en vertu de la formule (11') que

$$2E v_0 \left( \frac{1}{R - v_0} - \frac{1}{R + v_0} \right) < \Gamma'$$

d'où

$$\frac{v_0}{R} < \sqrt{\frac{\Gamma'}{2E \left( 1 + \frac{\Gamma'}{2E} \right)}},$$

ou comme  $\frac{\Gamma'}{2E}$  est une petite fraction,

$$(17) \quad \frac{v_0}{R} < \sqrt{\frac{\Gamma'}{2E}}.$$

Pour l'acier on a

$$E = 2 \cdot 10^{10}, \quad \Gamma' = 70 \cdot 10^6, \quad \text{d'où} \quad \frac{v_0}{R} < 0,041.$$

Pour la fonte

$$E = 12 \cdot 10^9, \quad \Gamma' = 12 \cdot 10^6, \quad \text{d'où} \quad \frac{v_0}{R} < 0,0225.$$

La limite supérieure de la pression que l'on pourra exercer sur le cylindre s'obtiendra en supposant dans l'é-

quation (5)  $\varepsilon = 0$ ,  $\Gamma = \Gamma'$ , et  $\frac{v_0}{R}$  égal au second membre de l'égalité (17). Cette limite correspond à 16 kilogrammes par centimètre carré pour l'acier et à  $0^k,2$  pour la fonte.

#### APPLICATION A UN CAS PARTICULIER.

Dans certaines machines locomotives de la compagnie de Lyon, on a  $R = 0^m,510$ ,  $v_0 = 0^m,0075$ , les segments sont en acier; mais au lieu d'affecter la forme à laquelle nous sommes parvenu, ils sont circulaires. Supposons néanmoins que notre théorie leur soit applicable en considérant le rayon du cercle extérieur primitif comme étant égal au rayon moyen  $R_1$  donné par la formule (15);  $R_1 - R$  varie entre 0,005 et 0,0075; supposons que cette différence soit égale à  $0^m,006$ ; les équations (15), (5), (16) donnent

$$\Gamma = 50^k \cdot 10^6, \quad p = 1,32 \times 10^k, \quad i = 2^{\circ},2,$$

et l'on a  $\frac{v_0}{R} = 0,0375$ , chiffre inférieur à la limite obtenue plus haut.

L'équation (12) devient, eu égard à (15),

$$(18) \quad R_0 u_0 = \frac{\Gamma(R - v_0)^2}{2E v_0} = \frac{2}{5} (R - R_1) \varphi(0) = 0,004 \varphi(0).$$

D'après le tableau qui donne les valeurs de  $\varphi(0)$  correspondant à des angles croissant de 10 en 10° à partir de zéro, on a formé le suivant en prenant le millimètre pour unité de longueur :

0	$R_0 u_0$	0	$R_0 u_0$	0	$R_0 u_0$
0	0,000	70	4,928	140	10,294
10	0,120	80	6,052	150	10,080
20	0,480	90	7,140	160	9,708
30	1,060	100	8,136	170	8,968
40	1,832	110	8,976	180	8,000
50	2,764	120	9,628		
60	3,812	130	10,048		

d'où l'on déduira facilement par une épure la forme que doit affecter la fibre à l'état naturel.

## DES SEGMENTS AVEC FAUX SEGMENTS.

Lorsque dans les locomotives on emploie des segments en fonte, on les double à l'intérieur d'un faux segment en acier d'une moindre épaisseur, mais dont l'ouverture est en général diamétralement opposée à celle du segment. Cette ouverture correspond à une dizaine de degrés pour laisser passer le dispositif employé pour maintenir le point  $C_1$  à une distance déterminée de l'axe. Le faux segment s'appuie sur le fond de la cannelure, par l'intermédiaire de deux faibles ressorts dont on peut faire abstraction.

Soit  $A_2C_2B_2$  la section du segment correspondant à l'extrémité du faux segment.

Le faux segment a pour objet d'obtenir une pression suffisante pour donner au segment une épaisseur telle que, lors de la mise en place, la limite de l'élasticité ne soit atteinte ou dépassée.

Nous conserverons les notations qui précèdent en accentuant les lettres qui se rapportent au faux segment.

Nous aurons pour une section normale comprise entre  $C_0$  et  $C_2$ ,

$$(19) \quad \frac{E v_0^3}{3} \left( \frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} \right) + \frac{E v_0'^3}{3} \left( \frac{1}{\rho'} - \frac{1}{\rho_0} \right) = p R_0 R \cos \frac{\theta}{2},$$

et pour une section comprise entre  $C_0$  et  $C_2$ , la même équation en y supposant  $v_0' = 0$ , de sorte que la forme de l'arc  $C_1C_2$  appartient à la courbe que nous avons déterminée plus haut, et qui se confond sensiblement, dans cette région, avec un cercle de centre  $O$  comme nous l'avons reconnu.

On a

$$\rho' = \rho_0 - v - v_0', \quad \rho = \rho_0 - v_0 - v_0',$$

d'où, en négligeant les carrés de  $\frac{v_0 + v_0'}{\rho}$ ,  $\frac{v_0 + v_0'}{\rho_0}$

$$\begin{aligned} \frac{1}{\rho'} - \frac{1}{\rho_0} &= \frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} + (v_0 + v_0') \left( \frac{1}{\rho^2} - \frac{1}{\rho_0^2} \right) = \\ &= \left( \frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} \right) \left[ 1 + 2(v_0 + v_0') \left( \frac{1}{\rho} + \frac{1}{\rho_0} \right) \right]. \end{aligned}$$

Comme  $\rho$ ,  $\rho_0$  diffèrent peu de  $R_1$ , on voit que l'on peut remplacer dans le second terme du coefficient, qui est déjà petit,  $\rho$  et  $\rho_0$  par  $R$ . Si donc nous posons

$$(20) \quad E'' = E + E' \frac{v_0'^3}{v_0^3} \left( 1 + 2 \frac{(v_0 + v_0')}{R} \right),$$

l'équation (18) devient

$$(21) \quad \frac{E'' v_0^3}{3} \left( \frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} \right) = p R_0 R \cos \frac{\theta}{2};$$

on rentre ainsi dans le cas précédent, en remplaçant dans les formules  $E$  par  $E''$ , seulement  $\Gamma$  n'a plus la signification physique que nous lui avons attribuée.

Si  $\Gamma_1$ ,  $\Gamma_1'$  sont les forces élastiques maximum développées dans la fonte et l'acier, on a

$$(22) \quad \begin{cases} \Gamma_1 = E v_0 \text{ maximum } \left( \frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} \right) = \frac{E}{E''} \Gamma, \\ \Gamma_1' = E' v_0' \left( 1 + 2 \frac{v_0 + v_0'}{R} \right) \text{ maximum } \left( \frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} \right) = \\ = \frac{E'}{E''} \frac{v_0'}{v_0} \left( 1 + 2 \frac{(v_0 + v_0')}{R} \right) \Gamma. \end{cases}$$

Pour les cylindres de 0,450 de diamètre intérieur des machines de la compagnie de Lyon, on a

$$R = 0,225 \quad v_0 = 0,006, \quad v_0' = 0,0035,$$

et d'après les données numériques que nous avons indiquées plus haut

$$E'' = 16,34 \cdot 10^9,$$

$$R_1 - R = 0,008 \quad \text{et} \quad \frac{v_0}{R} = 0,027,$$

limite supérieure à celle que nous avons obtenue en premier lieu pour la fonte et qui d'après la formule (17), correspondrait à  $\Gamma' = 15^k \times 10^6$ , et certaines qualités de fonte peuvent atteindre  $16^k \times 10^6$  et même  $18^k \times 10^6$ .

Pour l'acier il faut remplacer dans la formule (17) R par  $R' = R - 0,12$ , et l'on a  $\frac{v_0'}{R'} = 0,0255$ .

Les formules (16) et (18) donnent

$$R_0 v_0 = 0,0053 \varphi (0),$$

et

$$i = 6^\circ, 36',$$

d'où l'on déduira le tracé de la fibre moyenne.

Enfin des équations (15) et (5') on déduit

$$p = \frac{E'' v_0^3 (R_1 - R)}{R (R - v_0)^3} = 1^k, 2 \times 10^4.$$

Ainsi donc la pression est de  $1^k, 2$  par centimètre carré, et diffère peu, comme on le voit, de celle que nous avons obtenue dans le cas précédent.

Il paraît donc résulter de là que pour qu'un piston ferme bien, il faut qu'il exerce sur le cylindre, par une unité de surface, une pression à peu près égale à une atmosphère, et alors il est facile de tenir compte dans le calcul du travail d'une machine, de celui qui est absorbé par le frottement du piston.

## LE SONDAGE DE SPERENBERG (PRUSSE).

### I. — Coupe géologique.

### II. — Exécution du sondage.

### III. — Observations géothermométriques.

Traduction, par extraits, de mémoires publiés par M. KESTNER et M. DUNKER dans le *Zeitschrift f. d. Berg-H.-u. S.-Wesen*, XX<sup>e</sup> vol.,

Par M. H. VOISIN, ingénieur des mines.

### I.

Un sondage exécuté aux frais de l'État prussien près du village de *Sperenberg*, dans le cercle de *Potsdam*, à 40 kilomètres environ au sud de *Berlin*, vient de révéler l'existence d'un gîte de sel gemme qui surpasse de beaucoup, par sa puissance, tous ceux connus jusqu'à ce jour.

Le *Schlossberg* de *Sperenberg*, un peu au sud duquel a été foré ce trou de sonde, est une colline dirigée du sud-est au nord-ouest, longue de 2 kilomètres, large presque d'autant, et s'élevant à la cote de 27 mètres au-dessus du niveau du lac dit *Krummen See*, qui la borde au sud et au sud-est. Cette colline est constituée presque en entier par une masse de gypse, dont l'âge n'a pu encore être déterminé avec certitude.

Comme on s'était placé dans une ancienne carrière à plâtre, la sonde pénétra immédiatement dans le gypse. A l'affleurement et jusqu'à une assez grande profondeur, ce minéral se présente à l'état de grands cristaux en touffes ; la masse finit pourtant par prendre une texture plus serrée et plus confuse ; en même temps, elle perd peu à peu la

teinte grisâtre qu'on lui voit à la surface, jusqu'à devenir tout à fait blanche. A 85<sup>m</sup>,80 de profondeur, des veines d'anhydrite apparaissent dans le gypse.

A 87<sup>m</sup>,40, on atteint une couche d'anhydrite pur et compacte ; à 88 mètres, cette substance commence à contenir des traces de sel gemme.

Enfin, à 88<sup>m</sup>,80, on arrive à la masse de sel. Ce minéral est d'une grande pureté, il est incolore et translucide ; il se clive très-facilement suivant les faces du cube. L'anhydrite est la seule matière étrangère dont il soit souillé ; il n'y existe, du reste, en proportion un peu forte qu'à la partie supérieure et dans une veine située assez bas dans l'intérieur du gîte : on en a rarement trouvé plus de 4,6 p. 100 dans les échantillons extraits. Le sel est absolument exempt de potasse et ne renferme que des traces faibles de magnésie.

Le forage fut poussé dans le sel gemme jusqu'à la profondeur de 1.271<sup>m</sup>,60. On dut alors s'arrêter sans avoir rien appris sur l'âge du dépôt, et sans que rien indiquât si l'on approchait de la limite du gisement.

Deux autres sondages ont été exécutés en vue de reconnaître l'étendue du gîte de sel dans le sens horizontal.

Le n° II, situé à 715 mètres à l'est du grand sondage (n° I), atteignit le gypse à 30<sup>m</sup>,50 et le sel à 115<sup>m</sup>,80 de profondeur.

Le n° III, situé à 90 mètres au nord du n° I, atteignit le gypse à 62<sup>m</sup>,50 et le sel à 110<sup>m</sup>,65.

Ils furent arrêtés dans le sel, le premier à 155<sup>m</sup>,80, et le second à 142 mètres de profondeur.

## II.

A cause de l'énorme profondeur atteinte par le sondage n° I, il est utile d'en faire l'histoire.

Jusqu'à 300 mètres, on employa la force des hommes ; au delà de cette profondeur, on eut recours à la vapeur.

La première partie du travail n'offre pas grand intérêt ; nous en dirons néanmoins quelques mots, pour que l'on puisse comparer les résultats obtenus aux différentes profondeurs.

### PREMIÈRE PARTIE. — SONDAGE A BRAS.

*Installation et outillage.* — La chèvre avait 14<sup>m</sup>,50 de hauteur totale. La tige s'assemblait par parties de 10<sup>m</sup>,50 de longueur. On la manœuvrait au moyen d'un treuil à double engrenage et à frein, dont le tambour avait 0<sup>m</sup>,26 de diamètre et présentait une rainure en hélice, grâce à laquelle la chaîne s'enroulait et se déroulait très-régulièrement. Le câble rond en chanvre qui servait à descendre la cloche à soupape s'enroulait sur le tambour d'un treuil à engrenage simple et à frein.

Le levier de battage était une pièce de sapin de 0<sup>m</sup>,26 d'épaisseur sur 0<sup>m</sup>,31 de hauteur ; les deux bras avaient respectivement 4<sup>m</sup>,20 et 1<sup>m</sup>,70 de longueur. Le point d'appui ne pouvait être déplacé par rapport au levier, de sorte qu'il fallut charger le petit bras au commencement du sondage et le grand bras à la fin ; le contre-poids fixé à l'extrémité du grand bras atteignit, en dernier lieu, 400 kilogrammes ; 12 hommes pouvaient prendre place à la barre transversale de manœuvre.

Les éléments de la tige étaient des barres de fer de 10<sup>m</sup>,50 de long et de 0<sup>m</sup>,025 d'équarrissage, assemblées par des emmanchements à vis. La tige pesait 4<sup>k</sup>,8 en moyenne par mètre courant.

On fit usage de l'instrument à chute libre du système *Fabian* (\*). Il y en avait deux, pesant l'un 100 kilogrammes,

(\*) La coulisse de *Fabian* se compose d'un manchon percé de deux ou trois longues fenêtres verticales, dans lesquelles glissent autant d'ailettes fixées sur une tige ronde qui forme la tête de la partie inférieure de la sonde. Vers le haut, chacune de ces fenêtres s'élargit sur la gauche, de manière à présenter, au bas de cette

l'autre 138 kilogrammes, et donnant respectivement des hauteurs de chute de 0<sup>m</sup>,47 et de 0<sup>m</sup>,58.

La maîtresse-tige, au bas de laquelle était fixé le trépan, portait une lanterne de guidage. Les deux maîtresses-tiges employées pesaient respectivement 225 et 350 kilogrammes.

L'outil foreur était le trépan à biseau avec oreilles tranchantes courbées suivant la circonférence du trou; il avait 1 mètre de hauteur et pesait 150 kilogrammes environ. La lame était de 0<sup>m</sup>,025 à 0<sup>m</sup>,040 moins large en haut qu'en bas, et de 0<sup>m</sup>,04 à 0<sup>m</sup>,05 plus haute que large; ainsi, pour un taillant de 0<sup>m</sup>,40, la lame avait 0<sup>m</sup>,44 à 0<sup>m</sup>,45 de hauteur et 0<sup>m</sup>,56 à 0<sup>m</sup>,575 de largeur à sa partie supérieure. Les oreilles avaient 0<sup>m</sup>,09 de largeur et descendaient jusqu'au niveau du taillant. On travailla aussi avec des trépans à lame moins haute, pesant 65 à 75 kilogrammes, quand on voulait élargir et foncer simultanément, auquel cas on intercalait, entre la maîtresse-tige et le trépan, un outil élargisseur à couteaux articulés — système *Kind* — du poids de 161 kilogrammes.

Le matériel comprenait, en outre, divers outils raccrocheurs et des instruments destinés à découper et à extraire des échantillons de la roche.

*Marche du travail. — Résultats obtenus.* — Après avoir monté la chèvre et foncé un puits carré de 2<sup>m</sup>,70 de côté sur 5<sup>m</sup>,50 de profondeur, ce qui demanda un mois de travail, on commença le forage le 25 avril 1867.

partie élargie, un siège horizontal. Quand on relève la sonde, les ailettes s'appuient sur ces sièges, et les deux portions de la tige sont ainsi attelées l'une à l'autre. Pour faire ensuite retomber l'outil, le chef sondeur n'a qu'à tourner brusquement la tête de sonde dans le sens convenable, au moyen du levier de manœuvre: les ailettes échappent leurs points d'appui et la partie inférieure de la sonde tombe librement. Un étui en tôle, qui enveloppe le manchon, empêche les détritits d'y pénétrer. On conçoit que cet appareil ne convient que pour des profondeurs assez faibles, ne dépassant pas 500 mètres. (Voir, pour plus de détails, le « *Leitfaden zur Bergbaukunde* » de *Lottner* et *Serlo*, p. 74). H. V.

Le sol étant formé de gypse, on put procéder immédiatement par battage. On débuta avec un trépan de 150 kilogrammes, large de 0<sup>m</sup>,592. Jusqu'à 1<sup>m</sup>,25 de profondeur, on fit usage de la coulisse d'*Oeynhausén*, puis on eut recours à l'instrument à chute libre de *Fabian*.

Jusqu'à 50 mètres, l'avancement fut très-lent et très-irrégulier, à cause des nombreuses fentes, presque toutes remplies de sable, que présentait la masse de gypse. Mais plus bas, la roche offrant partout la même résistance (sauf à la traversée des petites veines assez dures d'anhydrite intercalées dans la masse de sel), le trépan à biseau travailla toujours régulièrement et d'une manière très-satisfaisante: l'angle du biseau, qui était de 70°, parut très-convenable; les oreilles remplissaient bien leur rôle, et l'on n'eut jamais besoin de redresser ni d'aléser le trou de sonde. Grâce à la grande hauteur de leur lame, les trépans, pouvant être réparés un grand nombre de fois, faisaient un très-long service. Du reste, il n'y eut jamais enserrement de l'outil, accident que l'on reproche aux lames trop hautes de provoquer.

Dans le gypse, en allure normale, chaque volée de battage se composait de 600 coups, durait une demi-heure et était suivie d'un repos de dix minutes. La hauteur de chute, qui était de 0<sup>m</sup>,59 au début (avec la coulisse), fut ensuite portée à 0<sup>m</sup>,47. La première volée donnait ordinairement un avancement de 0<sup>m</sup>,16; l'effet utile des volées successives allait en décroissant rapidement, à tel point que, pour la onzième ou la douzième (la dernière), l'avancement n'était guère que de 0<sup>m</sup>,025. Dès que le trou s'était approfondi de 0<sup>m</sup>,80 environ, on procédait au curage; en général, on n'aurait pu retarder davantage cette opération, parce que la boue de gypse, en s'épaississant, tendait à se mettre en boules et opposait une grande résistance au mouvement de rotation de l'outil. A la traversée des fentes remplies de sable et de la couche d'anhydrite située au-

dessous du gypse, la durée de chaque volée de battage dut souvent être réduite à quinze minutes. Dans l'anhydrite, on n'avancait guère que de 0<sup>m</sup>,025 par heure de battage.

Dans le sel gemme, la hauteur de chute fut portée d'abord à 0<sup>m</sup>,52 et finalement à 0<sup>m</sup>,58. La durée et le nombre des volées de battage successives étaient à peu près les mêmes qu'en pleine masse de gypse. La première volée donnait un avancement de 0<sup>m</sup>,10 à 0<sup>m</sup>,13, avancement moindre que dans le gypse; mais l'effet utile du battage décroissait ensuite moins rapidement. Cette différence tient à ce que les menus éclats de sel se mettaient en suspension, dans l'eau agitée par le mouvement de la sonde, beaucoup plus facilement que la boue grasse de gypse. Somme toute, chaque reprise de battage, comprenant le même nombre de coups, donnait à peu près le même approfondissement dans les deux roches. On doit considérer, toutefois, que dans le gypse on travailla presque constamment avec l'élargisseur, ce qui diminuait l'avancement de 16 à 17 p. 100.

Le tableau n° 1 (V. p. 70) donne, mois par mois, les résultats obtenus dans le sondage à bras. On peut y voir que l'effet utile du battage diminua considérablement dans les derniers temps. Voici pourquoi : à mesure que le trou devenait plus profond, il fallait plus de temps pour relever la sonde ; les particules de sel en suspension dans l'eau se précipitaient au fond, pendant cette manœuvre, et y formaient une masse de plus en plus volumineuse et compacte que l'on ne parvenait plus, vers la fin, à extraire complètement au moyen de la cloche à soupape.

Cette circonstance rendait au moins le curage très-difficile ; il fallait d'abord battre fortement avec la cloche, quelquefois pendant près d'une heure, pour remettre les détritiques en suspension dans l'eau. Aussi dut-on, au delà d'une certaine profondeur, employer la tige au lieu du câble pour cette manœuvre.

A cause des éboulements nombreux qui se produisirent,

on avait intérêt à employer, comme instrument à chute libre, le système *Fabian* plutôt que tout autre; en effet, le jeu de cet instrument ne peut guère être entravé par un éboulement ; tandis qu'avec les appareils *Kind* et *Zobel*, par exemple, le chapeau sur lequel doit agir la résistance de l'eau pour déterminer le décliquetage peut, en pareil cas, ne pas fonctionner.

Dès que l'on eut atteint la profondeur de 16 mètres, on reconnut qu'il fallait tuber le trou de sonde pour retenir le sable remplissant les fentes du gypse. La première colonne de tubes ne put dépasser la profondeur de 26<sup>m</sup>,70 ; une deuxième colonne fut arrêtée à 31 mètres, tout tubage ayant paru inutile au delà de cette profondeur, à cause de la solidité et de la compacité du gypse. Mais quand on fut à 250 mètres, des éboulements considérables, provenant d'une fente située à 87<sup>m</sup>,20 et de la couche d'anhydrite, laquelle s'était désagrégée par suite de la dissolution du sel qui y était disséminé en petite quantité, rendirent nécessaire l'introduction d'une nouvelle colonne de tubes, que l'on poussa jusqu'à 113<sup>m</sup>,10. Les trois colonnes avaient respectivement 0<sup>m</sup>,366 — 0<sup>m</sup>,340 et 0<sup>m</sup>,315 de diamètre intérieur.

La vitesse de la sonde était, en moyenne, de 0<sup>m</sup>,31 par seconde à la descente et de 0<sup>m</sup>,16 pendant le relèvement. A la profondeur extrême de 300 mètres, la première de ces manœuvres durait 38 minutes, et la deuxième 54 minutes, y compris le temps employé à visser et à dévisser les tiges.

Outre le directeur du sondage et deux forgerons, le personnel comprenait, dès le début, sept ouvriers par poste, soit en tout quatorze ouvriers. Pendant le battage, six hommes se tenaient à la barre du levier, et le septième (le chef sondeur) au manche de manœuvre. Pendant les allées et venues de la sonde, quatre hommes agissaient sur les manivelles du treuil, les deux autres se tenaient, l'un au sommet de la chèvre pour accrocher et décrocher les

tiges, l'autre dans le puits pour assister le chef sondeur. On dut augmenter le nombre des ouvriers, à mesure que le trou s'approfondissait, et le porter finalement à treize par poste.

*Frais.* — Dans la période correspondante au sondage à bras,

on dépensa en tout. . . . .	39.813',40
soit, en moyenne, par mètre courant. . . . .	152',71

Ces chiffres sont un peu trop faibles : on n'y a pas compris le coût d'une partie du matériel, empruntée à une autre installation de sondage.

Les salaires se sont élevés à la somme de. . . . .	10.578',75
soit, en moyenne, par mètre courant, à. . . . .	55',26

#### DEUXIÈME PARTIE. — SONDAGE A LA VAPEUR.

*Installation et outillage.* — Au commencement du mois d'août 1868, on arrêta le travail de forage pour procéder à l'installation d'un matériel de sondage à vapeur.

On donna à la chèvre une hauteur de 28<sup>m</sup>,25, de sorte que l'on pouvait désassembler la tige par parties de 22<sup>m</sup>,60 de longueur. Les quatre montants, plantés aux quatre angles d'un carré de 10 mètres de côté, comprenaient au sommet un carré de 6 mètres de côté; ils avaient 0<sup>m</sup>,28 d'équarrissage au petit bout, et étaient assemblés à tenon et mortaise avec des semelles de 0<sup>m</sup>,31 d'équarrissage reposant sur une fondation en maçonnerie; ils étaient maintenus par des câbles en fil de fer ancrés dans le sol; en outre, du côté opposé à la machine, une chaîne également ancrée avait pour but de détruire la composante horizontale de la force oblique appliquée, pendant les manœuvres, à la partie supérieure de la charpente.

Les deux poulies de renvoi servant, l'une pour la sonde, l'autre pour la cloche à soupape, étaient portées sur deux

traverses en sapin de 0<sup>m</sup>,34 d'équarrissage, faisant partie d'un châssis rendu mobile au moyen de trois petites roues en fonte roulant sur des plates-bandes en fer.

Outre le plancher supérieur, trois échafaudages régnaient dans la tour à différentes hauteurs. Du côté du sud, une baraque en planches abritait la machine du treuil et les deux chaudières; du côté de l'est, se trouvaient le bureau et un abri pour les ouvriers.

La machine du treuil avait une force de 80 chevaux; c'était une machine horizontale à un seul cylindre, à tiroir, à détente, à volant et à engrenages, marchant à une pression effective de 3 atmosphères. Les deux tambours sur lesquels s'enroulaient les câbles de manœuvre de la sonde et de la cloche à soupape avaient respectivement 0<sup>m</sup>,94 et 1<sup>m</sup>,57 de diamètre; ils étaient placés sur un même arbre, sur lequel on pouvait les caler alternativement au moyen d'un manchon d'embrayage. Celui du câble de la cloche était pourvu d'un frein à feuillard; un frein à mâchoire était en outre disposé sur la jante du volant.

Le câble plat en chanvre qui servait à manœuvrer la sonde avait 62<sup>m</sup>,80 de longueur, 0<sup>m</sup>,24 de largeur et 0<sup>m</sup>,039 d'épaisseur; il pesait 8 kilogrammes par mètre courant. A la fin du sondage on employa un câble un peu plus fort, ayant 0<sup>m</sup>,046 d'épaisseur et pesant 9<sup>k</sup>,4 par mètre. Des masses de plomb étaient fixées à l'extrémité du câble pour faire contre-poids à la partie pendante entre le tambour et la poulie. La clef de relevée pesait 53 kilogrammes.

Le câble rond en fil de fer de la cloche à soupape avait 0<sup>m</sup>,026 de diamètre et pesait 2<sup>k</sup>,4 par mètre courant. En dernier lieu, on fit usage d'un câble à section diminuée qui avait, pour une longueur de 1.200 mètres, 0<sup>m</sup>,053 de diamètre au gros bout et 0<sup>m</sup>,020 au petit bout, et dont le poids moyen par mètre était de 0<sup>k</sup>,4 inférieur à celui du câble ordinaire. Quand la sonde dépassa la profondeur de 1.200

mètres, on ajouta à l'extrémité de ce câble un bout de câble cylindrique de 0<sup>m</sup>,020 de diamètre.

La machine à battre se composait d'un cylindre à vapeur vertical à simple effet, ouvert à la partie inférieure, ayant 0<sup>m</sup>,55 de diamètre intérieur; la course du piston était, au *maximum*, de 0<sup>m</sup>,63. Pour une pression effective de 3 atmosphères, l'effort exercé par la vapeur sur le piston était de 7.207 kilogrammes. Comme le montrent les *fig. 1* et *2* (Pl. II), le cylindre à vapeur était placé dans une fosse murillée, à l'aplomb de la queue du levier de battage, à laquelle la tige du piston se liait par une chaîne-Galle. Deux glissières en bois de chêne, fixées sur le couvercle du cylindre, guidaient la tête de tige du piston. La vapeur se distribuait par un robinet placé à l'extrémité supérieure du cylindre et manœuvré par le machiniste, qui pouvait modifier à volonté la vitesse et la longueur de course du piston. La fosse de la machine était prolongée jusqu'au puits, pour que le machiniste pût communiquer facilement avec le chef sondeur.

La vapeur était fournie par deux chaudières du Cornouailles à grille plane (ce système de grille permettant d'activer le feu, à un moment donné, plus rapidement que tout autre).

Les frais d'établissement des deux machines et de leurs accessoires, y compris les chaudières, s'élevèrent à la somme de 36.621 francs, dont 16.875 francs pour la machine du treuil et 2.812 francs pour la machine à battre.

Le levier de battage (*fig. 1* et *3*) se composait de deux pièces de bois superposées, l'une (celle de dessous) en chêne, de 0<sup>m</sup>,21 de hauteur, et l'autre en sapin, de 0<sup>m</sup>,51, se prolongeant de 1<sup>m</sup>,60 environ au delà de la première pour former la queue du levier. Ces deux pièces étaient solidement reliées par des étriers, dont l'un portait l'essieu.

La tête du levier était constituée par un bloc de chêne assemblé par des ferrures, et arrondi suivant une circon-

férence ayant son centre au point d'appui. Le piston de la machine était attelé en un point tel que les deux bras de levier avaient même longueur.

Le contre-poids destiné à équilibrer la sonde était placé dans une caisse *a* (*fig. 1* et *2*) portée par deux limons dont les extrémités étaient articulées d'un côté avec des attaches fixes, de l'autre avec deux tirants verticaux, qui transmettaient l'effort de la pesanteur à la queue du levier. A la fin du sondage, le contre-poids dépassait 5 tonnes.

Deux heurtoirs *b* et *c* (*fig. 1*) limitaient l'oscillation de la queue du levier. Les chocs se transmettaient par le chevalet en bois *b* et par les deux tirants en fer *d* à l'extrémité d'un madrier horizontal *i*, de 8<sup>m</sup>,80 de long et de 0<sup>m</sup>,31 de haut, enterré dans le sol sur la moitié de sa longueur, et faisant l'office de ressort. Deux autres tirants *f* reliaient en outre le heurtoir supérieur à une pièce de bois *n* placée en croix sur le madrier, à 2<sup>m</sup>,70 de son extrémité; quatre chapeaux en fer, dont deux posés sur le madrier de part et d'autre de cette pièce et les deux autres sur la traverse elle-même, étaient amarrés chacun par deux grands boulons à un plancher très-solide et lourdement chargé avec des masses de fonte. Pour régler la course du piston, on exhaussait plus ou moins le heurtoir inférieur au moyen de blocs mobiles de différentes hauteurs.

Deux chaînes-Galle, articulées à l'extrémité de la plate-bande en fer *g* boulonnée sur la tête du levier, supportaient la sonde par l'intermédiaire d'un ressort en caoutchouc *h*.

La tige se composait de barres de fer de 11<sup>m</sup>,30 de longueur et de 0<sup>m</sup>,026 d'équarrissage assemblées par des emmanchements à vis. On les vissait et les dévissait deux par deux. Les tenons filetés avaient 0<sup>m</sup>,085 de longueur, 0<sup>m</sup>,049 de diamètre à la base et 0<sup>m</sup>,042 à l'extrémité. La tige pesait en moyenne 5<sup>k</sup>,8 par mètre courant. Vers la fin du forage, on jugea à propos de remplacer, pour les tiges de la partie

supérieure, le fer ordinaire par du fer à grain fin de première qualité.

Comme instruments à chute libre, on employa un appareil du système *Kind* et deux du système de M. *Zobel*, pesant respectivement 265—255 et 286 kilogrammes.

L'appareil *Zobel* (fig. 5 à 12) comprend trois parties distinctes et susceptibles de se mouvoir l'une par rapport à l'autre : 1° la *fourchette*, invariablement fixée à l'extrémité de la tige; 2° la *coulisse*, au bas de laquelle est vissée la maîtresse-tige portant le trépan et qui peut monter et descendre entre les branches de la fourchette; et 3° le *décliv*, dont le rôle est de rétablir et de supprimer alternativement la liaison des deux pièces précédentes.

La *fourchette* (fig. 5, 6, 8 et 15) se compose de deux joues *a* reliées entre elles à la partie inférieure par un boulon plat claveté *b*, et à la partie supérieure par une chape *p* fixée par de fortes clavettes et pourvue d'une queue assez longue qui est vissée dans la douille de la dernière tige. Ces joues présentent en face l'une de l'autre deux longues fenêtres *d*, dans lesquelles glissent les ailes d'un papillon *i* faisant partie de la coulisse. A sa partie supérieure, chacune de ces fenêtres s'élargit vers la droite; le petit siège horizontal *e* qui se trouve au bas de la partie élargie est formé par une pièce d'acier rapportée.

La *coulisse* B (fig. 7) se termine vers le bas par une douille *f*, qui reçoit la maîtresse-tige du trépan, et vers le haut par deux branches (dont la fig. 9 montre la section) entre lesquelles se logent l'axe du papillon *i* et les deux crapaudines *h* et *h*<sub>1</sub> (fig. 12), dans lesquelles il pivote: ces trois pièces sont maintenues en place par un étrier *g* fixé par des clavettes. Les deux ailes du papillon (fig. 10) présentent, dans le voisinage de l'axe, une section rectangulaire dont le grand côté est vertical, et dont le petit côté est égal à la largeur des fenêtres *d*; dans toute la partie qui dépasse extérieurement les joues de la fourchette, l'arête supé-

rieure de gauche et l'arête inférieure de droite de chacune des ailes sont abattues et remplacées par des faces planes inclinées à 45°. La coulisse est guidée dans sa chute par le boulon plat *b* et par deux plaques *l* qui glissent sur la tranche des deux joues de la fourchette.

Le *décliv* (fig. 15) se compose de deux platines *c* appliquées extérieurement sur les joues de la fourchette, sur lesquelles elles peuvent glisser, et reliées invariablement par les bras *r* au chapeau D, qui joue dans cet appareil le même rôle que le clapet en gutta-percha dans l'appareil *Kind*. Dans ces platines sont pratiquées des fentes *n* ouvertes par le bas, dans lesquelles glissent les extrémités des ailes du papillon; la partie inférieure de chacune de ces fentes se trouve en face des fenêtres *d* de la fourchette, mais la partie supérieure est rejetée vers la droite et réunie à la première par une partie inclinée à 45°. Quand les platines montent, le papillon, dont les ailes reposent sur les sièges *e*, reste d'abord immobile; mais lorsque les facettes obliques des deux fentes atteignent les ailes, celles-ci, dont les extrémités ont, comme on l'a vu, une forme appropriée, sont forcées de tourner, jusqu'à ce qu'elles arrivent dans le plan des fentes *d*; à ce moment, elles cessent d'être soutenues par les sièges *e* et la coulisse tombe librement.

Quand la sonde descend, le chapeau D est soulevé par la résistance de l'eau (fig. 15); lorsque le trépan a atteint le fond du trou, la fourchette continue à descendre et les sièges *e* viennent se présenter en face des ailettes du papillon. Dès que la tige s'arrête, le chapeau D tombe au bas de sa course: les platines *c*, en glissant sur les joues de la fourchette, forcent les ailes du papillon à tourner et à s'asseoir sur les sièges *e*, et la tige se trouve ainsi attelée au trépan (fig. 5), qui remonte avec elle. Quand la tige commence à redescendre, le chapeau D et les platines *c* prennent un déplacement relatif en sens contraire: les

aillettes *i* échappent leurs points d'appui et le trépan retombe.

Sauf le déclic, le papillon et ses crapaudines, qui sont en acier fondu, toutes les pièces de l'appareil sont en fer forgé; elles sont aciérées dans les parties les plus exposées à l'usure.

La maîtresse-tige du trépan pesait 587 kilogrammes. Outre la lanterne-guide fixée sur cette tige, un autre appareil de guidage était disposé sur une tige spéciale, au-dessus de l'instrument à déclic.

On fit usage du même trépan que dans le sondage à bras. Vers la fin seulement, à partir de 1.200 mètres de profondeur, pour éviter l'enserrment de l'outil, qui se produisait fréquemment, on dut diminuer la hauteur de la lame et la largeur des oreilles; on dut également réduire le poids de la maîtresse-tige à 225—250 kilogrammes.

La cloche à soupape avait 2<sup>m</sup>,65 de hauteur.

*Marche du travail. — Résultats obtenus.* — Le forage à la machine commença vers le milieu du mois de janvier 1869. On reprit le trou de sonde à la profondeur de 300 mètres, en lui conservant le diamètre de 0<sup>m</sup>,518, auquel il était réduit depuis la profondeur de 280 mètres.

A chaque reprise de battage, l'avancement était de 1<sup>m</sup>,90, c'est-à-dire double de ce qu'il était dans le travail à bras, sans que l'on y dépensât plus de temps: c'est qu'on donnait 1.500 coups à l'heure au lieu de 900, et qu'en outre la force était mieux utilisée que dans le sondage à bras, par la raison que, l'eau étant plus violemment agitée, le sel s'y mettait plus facilement en suspension, et le fond du trou restait plus longtemps à découvert, exposé à l'action directe de l'outil. Dans la première heure de battage, l'avancement dépassait ordinairement 0<sup>m</sup>,26; dans la dernière, il descendait rarement au-dessous de 0<sup>m</sup>,18. Vers la fin du sondage, comme on avait diminué la vitesse de battage et réduit le poids du trépan de 650 à 450 kilogrammes

et la hauteur de chute de 0<sup>m</sup>,55 à 0<sup>m</sup>,38, et comme en outre le curage ne pouvait plus être complet, le sel ayant le temps de se rassembler et de se prendre en masse au fond du trou pendant les manœuvres de plus en plus longues du relèvement de la sonde et de la descente de la cloche à soupape, l'avancement était un peu moins rapide; toutefois, chaque reprise donna toujours au moins 1<sup>m</sup>,25 d'approfondissement.

Le tableau n° 2 (V. p. 72) donne, mois par mois, les résultats du sondage à la vapeur.

Il montre que l'avancement fut très-régulier. Le ralentissement que l'on constate depuis 750 mètres jusqu'à 970 mètres de profondeur tient à la présence de veines dures d'anhydrite dans la masse de sel à ce niveau.

C'est grâce à l'appareil *Zobel* que l'on a pu pousser le forage jusqu'à l'énorme profondeur de 1.270 mètres dans des conditions aussi satisfaisantes. Au début, on employait, concurremment avec cet appareil, celui de *Kind*. Ce dernier donnait également de bons résultats; mais, dès la profondeur de 600 mètres, il commença à travailler avec moins de précision; à 800 mètres, on dut le rejeter définitivement. Cette infériorité de l'appareil *Kind* tenait surtout à une circonstance particulière, à savoir: la difficulté que l'on éprouvait à arracher le trépan de la masse de menu sel déposée au fond du trou, une fois qu'il y était engagé. Comme, au delà d'une certaine profondeur, le curage ne pouvait jamais être parfait, l'outil se pinçait à chaque instant au début du battage, tant que la masse sableuse ne s'était pas remise en suspension dans l'eau; or il arrivait alors très-souvent, avec l'appareil *Kind*, que les griffes de la pince à déclic glissaient sur le champignon formant la tête de la coulisse, et que la tige remontait sans le trépan; par suite, au bout de fort peu de temps, les angles étaient arrondis à tel point que l'appareil refusait de fonctionner. L'enserrment du trépan n'avait, au contraire,

aucune influence fâcheuse sur le jeu de l'appareil *Zobel* : le relèvement et la chute de l'outil se produisaient toujours très-régulièrement ; l'instrument fonctionnait avec autant de précision à la profondeur de 1.270 mètres qu'à celle de 500 mètres. On reconnut, en outre, que l'on brûlait moins de charbon avec cet appareil qu'avec celui de *Kind* ; d'après les expériences, assez peu rigoureuses, il est vrai, que l'on fit à ce sujet, le rapport des consommations aurait été de 4 : 5. Cette différence paraît provenir de ce que le chapeau évasé vers le bas qui remplace, dans le nouvel instrument, le disque plat de *Kind*, éprouve de la part de l'eau, en montant, une résistance moins grande que ce dernier. Malgré la complication assez grande de l'appareil *Zobel*, on avait rarement à y faire des réparations. Les pièces qui se détérioraient le plus souvent sont les ailes du papillon, leurs sièges et les platines du dé clic.

Jusqu'à une certaine profondeur, le curage s'opéra à l'aide du câble sans difficulté. Mais dans les derniers mois, comme il s'écoulait quelquefois jusqu'à six heures entre la fin du travail de forage et le commencement du curage, il fallait employer la tige, afin de battre fortement avec la cloche pour désagréger le dépôt formé.

A la fin du travail, la machine du treuil était sur le point de devenir insuffisante ; sa marche était pénible et irrégulière ; ce qui tenait bien plus à l'accroissement des frottements à vaincre qu'à l'augmentation du poids à soulever.

La manœuvre de la sonde s'effectuait à la vitesse moyenne de 22<sup>m</sup>,60 par minute en montant, et de 18<sup>m</sup>,80 en descendant. Il fallait 1 1/4 minute pour assembler ou désassembler chaque élément de la tige. A la profondeur extrême de 1.270 mètres, le relèvement de la sonde durait 2 heures 6 minutes, et la descente 2 heures 17 minutes.

Le personnel comprenait, outre 2 forgerons, 6 hommes par poste, à savoir : 1 machiniste, 1 chauffeur, 1 décro-

cheur (sur le plancher supérieur), 1 homme sur un des planchers intermédiaires, le chef sondeur et son aide.

Un seul accident grave vint entraver la marche régulière du travail : le 22 juillet 1869, à la profondeur de 663 mètres, le fût du trépan se rompit un peu au-dessous de son emmanchement avec la maîtresse-tige ; quand on s'en aperçut, le trépan s'était déjà plus qu'à moitié enfoncé dans la roche sous les coups de la maîtresse-tige, qui continuait à battre. On commença par enlever, avec la cuiller, la boue qui recouvrait le fond du trou. On ne réussit pas à extraire le trépan avec la caracole, ni avec l'accrocheur à pince. On résolut alors de dégager l'outil en élargissant le trou au moyen de tréfans élargisseurs à une et à deux branches. On employa notamment l'outil représenté par la *fig.* 14 ; on chercha à mettre à nu, avec cet outil, d'abord le manche, puis la lame du trépan. Tous les efforts faits dans ce sens parurent d'abord infructueux ; on persévéra néanmoins. Le 13 septembre 1869, on s'aperçut que le trépan avait changé de position ; le lendemain il était complètement dégagé ; enfin le 15 septembre, après environ deux mois d'efforts, on le rapporta au jour au moyen de l'accrocheur à pince.

A plus de 1.200 mètres, la marche du travail était encore très-satisfaisante ; rien ne s'opposait à ce que l'on poursuivît le forage jusqu'à une profondeur beaucoup plus considérable. Mais, vu l'insuffisance de la chèvre et de la machine à vapeur et le peu d'espoir que l'on avait d'atteindre bientôt le mur du gîte, on se décida à arrêter le travail, le 13 septembre 1871, à la profondeur de 1.271<sup>m</sup>,60.

Grâce au soin et à l'attention que l'on apportait dans les manœuvres, grâce aussi à la suspension à ressort, qui amortissait les chocs, il n'y eut pas une seule rupture de tige dans tout le cours du sondage, quoique la section des barres eût été calculée pour une profondeur de 1.000 mètres seulement.

*Frais.* — Les frais du sondage à la machine se sont élevés à la somme de 178.131<sup>f</sup>,40.

Le travail de forage proprement dit a coûté en moyenne, par centimètre,

0<sup>f</sup>,171 en salaires

et 0<sup>f</sup>,290 en combustible consommé pour produire la vapeur.

En résumé, le sondage de Sperenberg a coûté. . . 217.944<sup>f</sup>,75

soit, en moyenne, par mètre courant. . . . . 171<sup>f</sup>,40

Si l'on tient compte de la valeur qu'avaient encore la chèvre, les machines et les chaudières à la fin du travail, ce chiffre se réduit à 167<sup>f</sup>,50.

#### SONDAGES A BRAS ET A LA VAPEUR

Pages 70, 71, 72 et 73.



Tableau 2. — Sondage à la vapeur.

MOIS.	AVANCEMENT. mètres.	NOMBRE de coups	TEMPS EMPLOYÉ				TEMPS PERDU. h.	TOTAL du temps dépensé. heures	DÉPENSE			PAR CENTIMÈTRE D'AVANCEMENT.						PROFON- DEUR du trou de sonde à la fin du mois. mètres.	OBSERVATIONS.	
			au battage. heures.	à la descente de la sonde. heures.	au relevement de la sonde. heures.	au curage. heures.			TOTAL des frais spéciaux. francs.	en salaires. francs.	en combustible. francs.	Temps employé			Dépense		Total des frais spéciaux. fr.			
												Nombre de coups.	au battage. min.	aux manœuvres accessoires. min.	total. min.	en salaires. fr.				en combustible. fr.
Janvier... 1869	9,58	119.000	107	14	15	56	3	195	193,75	501,53	695,28	24	6,7	5,5	12,2	0,20	0,52	0,72	300,04	Profondeur initiale.
Février... —	51,61	402.000	335	48	48	145	"	576	468,75	1.110,09	1.578,84	78	3,9	2,8	6,7	0,09	0,21	0,30	309,62	
Mars... —	61,18	486.000	324	49	49	170	8	600	500,00	1.307,37	1.807,37	79	3,2	2,7	5,9	0,08	0,22	0,30	361,23	
Avril... —	68,16	427.500	285	47	47	181	4	564	480,00	1.237,84	1.717,84	63	2,5	2,5	5,0	0,07	0,18	0,25	427,41	
Mai... —	62,77	335.500	237	41	41	161	12	492	480,00	1.155,93	1.635,93	53	2,3	2,4	4,7	0,08	0,18	0,26	495,57	
Juin... —	59,32	337.500	230	40	40	170	"	480	520,00	980,62	1.500,62	57	2,3	2,6	4,9	0,09	0,16	0,25	558,34	
Juillet... —	45,51	247.500	170	51	34	153	12	420	364,37	693,12	1.057,49	54	2,2	3,3	5,5	0,08	0,15	0,23	617,66	
Septembre... —	10,43	219.500	128	19,5	13,5	55	"	216	200,00	285,00	485,00	210	7,4	5,0	12,4	0,19	0,27	0,46	673,60	
Octobre... —	47,92	332.500	204	48	48	237	15	552	480,00	800,62	1.280,62	69	2,6	4,3	6,9	0,10	0,17	0,27	714,65	
Novembre... —	45,04	380.500	251	43,5	43,5	277	9	624	544,37	910,06	1.454,43	84	3,3	5,0	8,3	0,12	0,20	0,32	759,69	
Décembre... —	33,43	317.500	224	47,5	47,5	273	8	600	568,75	1.013,84	1.582,59	95	4,0	6,8	10,8	0,17	0,30	0,47	793,12	
Janvier... 1870	34,20	225.500	242	50	50	229	5	576	546,87	976,75	1.523,62	66	4,2	5,9	10,1	0,16	0,29	0,45	827,32	
Février... —	33,58	307.500	243	58	58	227	2	588	526,75	1.065,75	1.592,50	92	4,3	6,2	10,5	0,16	0,31	0,47	860,90	
Mars... —	43,16	376.500	251	58	58	217	4	648	570,37	1.296,93	1.867,30	87	3,5	5,5	9,0	0,13	0,30	0,43	904,06	
Avril... —	32,75	307.500	205	54	54	226	13	552	513,25	1.168,06	1.681,31	94	3,7	6,4	10,1	0,16	0,35	0,51	936,81	
Mai... —	33,21	291.000	194	51,5	51,5	275	4	576	568,87	1.241,71	1.810,58	87	3,5	6,9	10,4	0,17	0,37	0,54	970,92	
Juin... —	25,10	193.500	129	52,5	52,5	234	36	504	491,25	1.058,90	1.550,15	77	3,1	8,9	12,0	0,19	0,43	0,62	995,12	
Juillet... —	22,39	166.500	112	56	56	272	14	510	549,81	718,12	1.267,93	74	3,0	10,6	13,6	0,24	0,33	0,57	1.017,51	
Août... —	14,37	99.000	66	33	33	108	"	240	237,50	397,96	635,46	68	2,7	7,3	10,0	0,16	0,28	0,44	1.031,88	
Septembre... —	20,16	139.500	93	51	51	169	2	366	348,12	620,62	968,74	69	2,7	8,2	10,9	0,17	0,31	0,48	1.052,04	
Octobre... —	13,99	97.000	102	42	42	172	23	381	368,12	640,06	1.008,18	69	4,4	11,9	16,3	0,26	0,46	0,72	1.066,03	
Novembre... —	7,35	52.000	58	21	21	104	6	190	154,37	249,37	403,74	71	3,1	12,4	15,5	0,21	0,34	0,55	1.073,38	
Décembre... —	17,03	124.000	85	39	39	177	8	348	438,12	677,34	1.115,46	73	3,0	9,2	12,2	0,25	0,40	0,65	1.090,41	
Janvier... 1871	14,57	113.000	77	36	36	127	3	279	289,06	745,25	1.034,31	78	3,2	8,3	11,5	0,20	0,51	0,71	1.104,98	
Février... —	10,77	81.500	57	34,5	31	86,5	12	218	216,72	559,31	776,03	76	3,2	8,9	12,1	0,20	0,52	0,72	1.115,75	
Mars... —	17,44	136.000	91	49	45,5	148,5	"	342	360,81	722,50	1.083,31	78	3,1	8,7	11,8	0,21	0,41	0,62	1.133,19	
Avril... —	26,71	220.500	147	73,5	76,5	222	9	528	663,87	1.028,12	1.691,99	83	3,3	8,5	11,8	0,25	0,38	0,53	1.159,90	
Mai... —	26,15	211.500	141	77	77	259,5	21,5	576	589,50	1.108,90	1.698,40	81	3,2	10,0	13,2	0,23	0,42	0,65	1.186,05	
Juin... —	22,64	190.500	127	73,5	73,5	252	23	549	557,90	1.066,31	1.624,21	84	3,4	11,1	14,5	0,25	0,47	0,72	1.208,69	
Juillet... —	24,18	215.000	142	73,5	70	294	20,5	600	613,81	1.211,71	1.825,52	89	3,5	11,4	14,9	0,25	0,50	0,75	1.232,87	
Août... —	25,44	229.300	153	70	73,5	316	35,5	648	662,93	1.224,93	1.887,86	90	3,6	11,7	15,3	0,26	0,48	0,74	1.258,31	
Septembre... —	13,31	127.500	85	28	28	152,5	6,5	300	343,87	436,50	780,37	98	3,8	9,7	13,5	0,26	0,33	0,59	1.271,62	
<b>Totaux et moyennes.</b>	<b>971,58</b>	<b>7.509.500</b>	<b>5.275</b>		<b>9.563</b>			<b>14.838</b>	<b>14.411,86</b>	<b>28.241,12</b>	<b>42.652,98</b>	<b>77</b>	<b>3,26</b>	<b>5,90</b>	<b>9,16</b>	<b>0,148</b>	<b>0,291</b>	<b>0,439</b>		

Profondeur initiale.

Rupture de la pince de l'appareil Kind, accident qui impose trois jours de chômage.  
Le 23 juillet, rupture du fût du trepan. On ne parvient à extraire l'outil que le 15 septembre. Le travail de forage n'est repris que le 20 septembre, en employant d'abord la coulisse avec une faible hauteur de chute.

Rupture des limons portant la caisse du contre-poids, ce qui oblige à travailler pendant quelques jours avec la coulisse et un trepan léger.

Le goudron du câble de la cuiller fond et tombe en partie au fond du trou, ce qui empêche l'appareil à chute libre de fonctionner.

Même accident. — Nouvelle rupture des limons portant la caisse du contre-poids.  
Emploi exclusif de l'appareil Zobel jusqu'à la fin du travail.

Nouvelle rupture des limons du contre-poids.  
La cuiller s'accroche à la base de la troisième colonne de tubes.

Jusqu'au 11, on répare et on enfonce la troisième colonne de tubes.

Faute d'ouvriers, on supprime le poste de nuit.  
On fore pour faire des observations thermométriques, un avant-trou de 0<sup>m</sup>,16 de diamètre sur 3<sup>m</sup>,60 de profondeur.

Travail irrégulier, à cause du manque d'ouvriers. — On élargit l'avant-trou à 0<sup>m</sup>,318 de diamètre.

Plusieurs jours de chômage, faute d'ouvriers.  
Nouvelle rupture des limons portant le contre-poids.

Le travail est arrêté le 15 du mois.

## III.

L'un des moyens qu'on peut employer pour arriver à connaître l'état calorifique du globe, à des distances plus ou moins grandes de sa surface, consiste à mesurer, à diverses profondeurs, la température de l'eau qui remplit un trou de sonde. L'administration des mines de Prusse entreprit, en 1869, des observations de cette nature sur plusieurs sondages. Les résultats obtenus sur le trou de sonde de *Sperenberg*, le plus profond qui ait été foré jusqu'à ce jour, sont ceux qui offrent le plus d'intérêt.

Il est démontré qu'au-dessous d'un certain niveau, la température de la terre est sensiblement constante en chacun de ses points, et qu'elle augmente avec la profondeur : dès qu'on est sûr que la température à mesurer surpasse celle qui règne soit au jour, soit dans le voisinage de la surface, on peut employer, pour les observations, un thermomètre à *maxima*. On a fait usage, à *Sperenberg*, du géothermomètre de *Magnus*, qui diffère du thermomètre de *Walferdin* en ce que l'air pénètre librement à l'intérieur de l'appareil.

La tige *ac* (Pl. II, fig. 15) du thermomètre est ouverte et courbée à angle droit près de son extrémité ; elle est graduée à contre-sens, le zéro de l'échelle correspondant à l'extrémité du bec *c*. Le réservoir *ab* est maintenu entre deux capsules de laiton *fghi*, *klmn*, qui s'appuient sur le verre par l'intermédiaire de rondelles de liège ou de caoutchouc ; du fond de la capsule supérieure partent trois tiges de laiton *x*, qui traversent le fond de l'autre capsule, sont filetées à leurs extrémités et reçoivent des écrous que l'on serre avec précaution pour assujettir le tout ensemble.

L'ampoule de verre *de*, qui coiffe le haut de la tige, présente un orifice *e* à sa partie supérieure ; elle est fixée sur la tige avec de la cire, ou mieux avec de la laque, substance qui se ramollit moins facilement que la cire sous l'action de la chaleur. Le thermomètre étant vertical, le mercure

contenu dans l'ampoule ne doit jamais, quand même on agiterait légèrement, arriver jusqu'au niveau du bec *c*.

Sur la capsule *fghi* se visse un manchon en laiton *pqfg*, dans lequel est solidement mastiquée une cloche de verre *rst*, et qui est percé latéralement, vers le bas, d'un petit trou *v*. Le sommet *e* de l'ampoule doit approcher autant que possible du fond de la cloche, sans que toutefois il y ait contact.

Si l'ampoule était fermée, comme dans l'appareil de *Walferdin*, l'énorme pression à laquelle sera soumis le thermomètre, ne pouvant se transmettre à l'intérieur, risquerait de le briser ; au moins l'enveloppe de verre diminuerait-elle sensiblement de volume, ce qui fausserait les résultats.

Quand on veut faire une observation, on plonge d'abord l'instrument dans de l'eau tiède jusqu'à ce que le mercure, s'élevant dans la tige, en atteigne l'extrémité *c* ; on l'incline alors de manière que le bec *c* plonge dans le mercure de l'ampoule et on le laisse refroidir à l'air dans cette position, en versant au besoin de l'eau froide sur le réservoir, jusqu'à une température à coup sûr inférieure à celle que l'on veut mesurer. L'appareil est ensuite introduit dans un tube en fer *abcd* (fig. 16), composé de deux parties que l'on réunit en vissant l'une sur l'autre deux viroles en cuivre *ef*, *gh*, qu'elles portent à leurs extrémités. Le thermomètre repose sur une cloison intérieure *rr* percée de quatre petites ouvertures *t* ; il est maintenu dans une position verticale au moyen d'un manchon en cuivre *mnp*, qui s'ajuste sur la cloche de verre et qui s'appuie par trois ailettes *q* contre les parois de l'étui en fer. À sa partie supérieure, cet étui est fermé hermétiquement ; au contraire, à sa partie inférieure, il est ouvert ou au moins percé latéralement d'un trou *o* qui permet à l'eau d'y pénétrer. Il doit avoir une capacité assez grande pour que la masse d'air renfermée tant dans le tube que dans la cloche de verre conserve encore, sous la pression à laquelle elle

pourra être soumise, un volume tel que l'eau ne puisse pas s'élever, dans la cloche, jusqu'à l'orifice de l'ampoule.

On descend l'appareil dans le trou de sonde au moyen du câble qui sert à manœuvrer la cuiller à soupape; pour tendre le câble, on suspend à son extrémité quelques-unes des tiges de sondage. Le plus souvent, on laissait le thermomètre en observation pendant une demi-heure; mais un quart d'heure suffit. Avant de le relever, il faut le secouer un peu, soit en faisant butter légèrement l'étui contre le fond du trou, soit en faisant vibrer le câble. Cette secousse a pour but de faire tomber la goutte de mercure qui pourrait rester suspendue au bec de la tige, et qui rentrerait ensuite dans le thermomètre au moindre refroidissement.

Dès qu'on a retiré l'appareil de son étui, on dévisse la cloche de verre et l'on plonge le géothermomètre, en même temps qu'un thermomètre ordinaire, dans un seau d'eau froide; la somme des nombres de degrés que marquent les deux instruments, lorsqu'ils sont en équilibre de chaleur, donne la température demandée.

On peut encore ajouter de l'eau chaude dans le vase, peu à peu et en agitant, jusqu'à ce que, dans le géothermomètre, le mercure atteigne l'extrémité de la tige: on n'a alors qu'à noter la température que marque à ce moment le thermomètre ordinaire. Cette deuxième méthode est moins rapide que la première, mais elle dispense de graduer le géothermomètre (\*).

Quand on peut craindre que la température de l'air extérieur ne soit supérieure à celle que l'on veut mesurer, on a recours à l'artifice suivant: le thermomètre, dès qu'il est préparé pour l'observation, est introduit

(\*) On peut ajouter qu'elle est plus rigoureuse que la première; car la graduation du géothermomètre est faussée dès qu'il ne contient pas une quantité de mercure exactement égale à celle pour laquelle il a été gradué.

dans un petit vase en zinc *xiki* (fig. 16), que l'on remplit d'eau froide, de manière que le réservoir à mercure plonge tout entier dans l'eau; ce vase, qui peut se manier au moyen d'une queue *xs*, repose sur la cloison *rr* par trois points seulement, afin de ne pas fermer les ouvertures *t*. Quand on relève l'appareil au jour, le petit vase se trouve rempli avec de l'eau relativement froide provenant d'une faible profondeur. Ainsi, après comme avant son séjour dans le trou de sonde, le thermomètre est plongé dans de l'eau froide qui l'empêche de s'échauffer au delà de la température à mesurer.

Les résultats obtenus à *Sperenberg* sont réunis dans le tableau suivant (les nombres marqués du signe \* se rapportent aux observations dans lesquelles l'appareil était placé au fond du trou).

Tableau I.

Numéro d'ordre.	DATE DE L'OBSERVATION.			PROFONDEUR du trou de sonde au moment de l'observation.	PROFONDEUR à laquelle était placé le thermomètre.	TEMPÉRATURE observée.
	Jour.	Mois.	Année.			
1	12	Juillet.	1869	mètres. 641,20	mètres. 31,38	degrés C. 13,75
2	24	Janvier.	1870	681,10	62,77	14,50
3	12	Juillet.	1869	641,20	94,16	15,37
4	24	Janvier.	1870	681,10	125,54	17,00
5	12	Juillet.	1869	641,20	156,93	17,50
6	24	Janvier.	1870	681,10	188,31	19,00
7	12	Juillet.	1869	641,20	219,70	19,50
8	—	—	—	—	251,08	20,25
9	—	—	—	—	282,47	21,00
10	—	—	—	—	313,85	23,25
11	—	—	—	—	345,23	23,87
12	13	—	—	—	376,62	25,25
13	12	—	—	—	408,01	25,62
14	13	—	—	—	439,39	27,37
15	12	—	—	—	470,78	27,75
16	23	Avril.	—	477,10	476,74	29,00
17	13	Juillet.	—	641,20	502,16	29,37
18	18	Mai.	—	525,40	523,50	29,50
19	12	Juillet.	—	641,20	533,55	29,75
20	24	Mai.	—	537,00	534,80	29,37
21	31	—	—	555,50	553,32	30,37
22	13	Juillet.	—	641,20	564,93	31,25
23	12	—	—	—	596,32	31,75
24	13	—	—	—	627,71	33,00
25	12	—	—	—	638,70	33,00
26	26	Septembre.	—	668,50	651,25	33,12
27	19	Juillet.	—	654,70	652,82	33,12

Tableau I (Suite).

Numéro d'ordre.	DATE DE L'OBSERVATION.			PROFONDEUR du trou de sonde au moment de l'observation.	PROFONDEUR à laquelle était placé le thermomètre.	TEMPÉRATURE observée.
	Jour.	Mois.	Année.			
28	24	Janvier.	1870	mètres, 821,40	mètres. 659,09	33,37
29	—	—	—	—	690,48	34,75
30	—	—	—	—	721,87	36,00
31	—	—	—	—	753,25	37,00
32	—	—	—	—	784,64	38,12
33	—	—	—	—	816,02	38,87
34	31	—	—	827,30	* 825,44	39,37
35	21	Février.	—	849,30	* 847,41	40,12
36	7	Mars.	—	869,10	* 867,18	40,50
37	14	—	—	878,80	* 878,79	40,50
38	14	Novembre.	—	1.067,40	( 894,49	39,00)
39	11	Avril.	—	915,20	900,18	42,00
40	14	Novembre.	—	1.067,40	( 920,87	39,25)
41	9	Mai.	—	945,60	941,56	43,00
42	14	Novembre.	—	1.067,40	( 957,25	39,62)
43	7	Juin.	—	973,50	972,94	44,00
44	14	Novembre.	—	1.067,40	( 988,63	40,50)
45	14	Août.	—	1.018,80	1.004,33	44,12
46	14	Novembre.	—	1.067,40	( 1.026,02	40,75)
47	12	Septembre.	—	1.039,80	* 1.035,71	44,75
48	14	Novembre.	—	1.067,40	* 1.051,40	41,62)
49	10	—	—	—	* 1.063,95	42,00
50	11	—	—	—	* 1.063,95	42,37
51	28	—	—	1.070,90	1.063,95	42,25
52	23	Janvier.	1871	1.103,50	1.063,95	42,37
53	20	Février.	—	1.110,40	1.063,95	42,37
54	28	Novembre.	1870	1.070,90	* 1.067,70	42,25
55	2	Février.	1871	1.105,10	1.082,79	43,37
56	28	Janvier.	—	1.103,80	* 1.098,49	44,00
57	2	Février.	—	1.105,10	* 1.102,57	44,00
58	27	—	—	1.114,50	* 1.112,63	44,25
59	17	Avril.	—	1.144,90	1.114,18	44,25
60	13	Mars.	—	1.122,70	* 1.120,46	44,50
61	20	—	—	1.126,40	* 1.124,85	44,50
62	3	Avril.	—	1.134,60	* 1.129,87	44,62
63	17	—	—	1.144,90	* 1.142,42	44,87
64	1	Mai.	—	1.160,00	1.145,56	44,87
65	24	Avril.	—	1.152,50	* 1.150,27	45,00
66	1	Mai.	—	1.160,00	* 1.158,12	45,25
67	30	—	—	1.183,50	* 1.161,26	45,25
68	8	—	—	1.166,30	* 1.164,40	45,37
69	15	—	—	1.172,60	* 1.170,68	45,50
70	22	—	—	1.177,90	* 1.175,69	45,50
71	19	Juin.	—	1.200,80	* 1.176,95	45,50
72	30	Mai.	—	1.183,80	* 1.181,66	45,62
73	5	Juin.	—	1.188,90	* 1.187,31	45,75
74	12	—	—	1.195,20	* 1.192,64	45,75
75	19	—	—	1.200,80	* 1.198,92	46,00
76	26	—	—	1.205,20	* 1.203,31	46,25
77	3	Juillet.	—	1.208,60	* 1.207,06	46,25
78	17	—	—	1.219,90	* 1.208,33	46,12
79	10	—	—	1.214,00	* 1.212,42	46,25
80	24	—	—	1.225,60	* 1.224,03	46,62
81	31	—	—	1.231,90	* 1.230,31	46,87
82	10	Octobre.	—	1.271,70	* 1.268,59	48,12

Quelle valeur peut-on attribuer à ces résultats ? Si l'eau était absolument immobile dans le trou de sonde, on pourrait, sans erreur sensible, considérer sa température comme étant égale, en chaque point, à celle que possède la roche au même niveau. Mais, au contraire, le liquide est constamment en mouvement, comme dans un tube inégalement chauffé en ses différentes parties, l'eau chaude s'élevant à cause de sa faible densité et étant remplacée par de l'eau relativement froide, qui descend : vers l'orifice du trou de sonde, l'eau est à une température plus élevée que la roche voisine ; vers le fond, la différence est inverse. Les écarts doivent être d'autant plus considérables que le trou de sonde est plus profond : on a pu s'en convaincre par des expériences comparatives faites sur un autre sondage (n° II) peu profond exécuté dans la même localité ; voici les résultats obtenus, rapprochés de ceux du grand sondage (n° I) :

PROFONDEUR à laquelle était placé le thermomètre.	SONDAGE N° I. (Observations faites quand le trou de sonde avait déjà 641 <sup>m</sup> ,20 à 821 <sup>m</sup> ,40 de profondeur).	SONDAGE N° II. (Le thermomètre était placé chaque fois au fond du trou.)	DIFFÉ- RENCES.
mètres.	degrés C.	degrés C.	degrés C.
31,38	13,75	11,25	2,50
62,77	14,50	13,00	1,50
94,16	15,37	14,37	1,00
125,54	17,00	15,62	1,37

Si l'on pouvait isoler un tronçon assez court de la colonne d'eau, il se mettrait bientôt en équilibre de chaleur avec la roche voisine ; et, en mesurant alors sa température, on atteindrait bien le but que l'on se propose dans ces observations. C'est là ce que l'on parvint à réaliser en novembre 1870, alors que la sonde avait atteint la profondeur de 1.060 mètres.

Au fond du trou, qui avait encore 0<sup>m</sup>,317 de diamètre, on forait une poche cylindrique *abcd* (fig. 17) de 0<sup>m</sup>,157

de diamètre sur 5<sup>m</sup>,50 de profondeur, à l'orifice de laquelle on pratiqua, au moyen d'un outil spécial, un évasement conique aussi régulier que possible. On y descendit ensuite le géothermomètre au moyen de la tige de sondage; un tampon A, fixé sur le dernier élément de la tige, s'emboî-tait dans l'orifice *ab* (ce tampon consistait en une pièce de bois taillée en tronc de cône, frettée aux deux bouts et portant une épaisse garniture d'étoupe, que maintenait une enveloppe de toile assujettie à chaque extrémité par une bande de cuir clouée sur le bois). Un joint à coulisse interrompait la tige à une hauteur telle que la partie située au-dessous du joint exerçait, par son poids, une pression convenable sur le tampon A.

On obtint les résultats suivants, le thermomètre étant placé à la profondeur de 1.063<sup>m</sup>,95.

Tableau II.

DATE de l'observation.	OBSERVATIONS AVEC OBTURATEUR.		OBSERVATIONS sans obturateur.
	Durée du séjour du thermomètre dans le trou de sonde.	Température.	Température.
	heures.	degrés C.	degrés C.
9 novembre 1870.	28	45,75	
10 — — —			42,00
11 — — —	24	45,62	
11 — — —			42,37
28 — — —			42,12
	Moyenne . . . . .	45,69	

La concordance des nombres obtenus tend à prouver leur exactitude. On s'explique, du reste, pourquoi le deuxième nombre de la dernière colonne du tableau ci-dessus sur-passe les deux autres: l'observation à laquelle il se rapporte a suivi de très-près la précédente, dans laquelle on avait employé l'obturateur; l'échauffement provoqué artificielle-ment à la base de la colonne liquide n'avait sans doute pas eu le temps de disparaître entièrement dans l'intervalle.

Ainsi l'on peut admettre que la température réelle de la roche, à la profondeur de 1.063<sup>m</sup>,95, dans le trou de sonde n° I de *Sperenberg*, est de 45°,69, sauf une légère correction à faire subir à ce chiffre, en tenant compte d'un petit déplacement du zéro du thermomètre ordinaire employé et de l'influence de la pression sur les indications du géothermomètre. Quand on permettait à l'eau de se mou-voir librement, il y avait donc une différence de plus de 3°.5 entre sa température, mesurée au fond du trou, et celle de la roche voisine.

On peut remarquer que les nombres de la dernière co-lonne du tableau II sont inférieurs à ceux obtenus pré-cédemment pour la même profondeur et même pour des profondeurs moindres, en opérant de la même manière (tableau I, observations 39, 41, 43, 45, 47). On en a trouvé l'explication dans le fait de l'échauffement qui se produit dans la colonne liquide pendant le battage. Une partie du tra-vail mécanique se transforme en effet en calorique, lequel se répartit entre l'outil, la roche et les fragments qui s'en détachent; l'outil, qui est très-bon conducteur, et les débris de la roche, dont la masse est très-faible, cèdent à l'eau presque toute la chaleur qu'ils ont acquise. Quand on in-terrompt le battage, l'excédant de température dû à cet échauffement artificiel disparaît, il est vrai, mais très-len-tement, surtout si la masse d'eau est considérable, comme c'est ici le cas. On a constaté qu'une relâche de vingt-quatre heures n'y suffit pas, après une semaine d'un travail continu de jour et de nuit. Lors des observations qui eurent lieu du 9 au 14 novembre (tableau I, n° 38, 40, 42, 44, 46, 48), l'eau avait eu le temps de revenir à sa tempéra-ture normale, la préparation de la poche *abcd* ayant exigé beaucoup de temps et produit peu de chaleur.

En définitive, les seuls résultats exacts, ou plutôt les seuls qui donnent réellement la température de la terre, à la profondeur à laquelle on place le thermomètre, sont ceux

obtenus en empêchant la circulation de l'eau dans le voisinage de l'instrument. L'appareil décrit ci-dessus (*fig. 17*) aurait suffi, à la rigueur, pour établir la série exacte des températures aux différentes profondeurs, si on l'avait employé, dès le commencement du sondage, au fur et à mesure de l'approfondissement du trou; mais quand on songea à s'en servir, on avait déjà atteint une profondeur de plus de 1.000 mètres; il fallait donc recourir à un autre procédé d'observation, au moins pour les profondeurs inférieures à 1.000 mètres.

Voici en quoi consistait l'appareil (*fig. 18*) dont on fit usage et qui permettait d'isoler, à une profondeur quelconque, un tronçon de la colonne liquide.

Le trou de sonde est obstrué, au-dessus et au-dessous du point où est installé le géothermomètre, par deux espèces de lanternes formées chacune de deux disques de fer *a* et *a'* réunis par un manchon en caoutchouc, dont les bords sont fixés sur le métal au moyen de vis avec rondelles en fer. Le disque supérieur présente deux ouvertures, l'une portant un robinet et servant à remplir d'eau le manchon, l'autre permettant à l'air de s'échapper et pouvant se boucher au moyen d'une vis. Sur ce même disque est fixée une fourchette *de*, portant des lames d'acier *fg*, qui exercent une pression sur les parois du trou et forment autour d'elle une espèce de cage circulaire. Une tige *i* filetée sur une partie de sa longueur passe entre les deux branches de la fourchette et traverse la douille taraudée *h* qui réunit leurs extrémités; un écrou *n* est placé sur la vis un peu au-dessous de cette douille. La tige traverse les deux disques de la lanterne supérieure dans des boîtes à étoupe *m* et *o*; deux arrêts qui comprennent entre eux le disque inférieur font que la tige l'entraîne toujours dans son mouvement, soit qu'elle monte, soit qu'elle descende. Elle traverse également dans une boîte à étoupe le disque supérieur de l'autre lanterne, et se termine par

une tête *x* qui supporte le disque inférieur au moyen d'un étrier *s*, dans lequel elle peut tourner librement.

Quand on tourne la tige à gauche, les lanternes restent immobiles, le frottement des lames d'acier *fg* contre les parois du trou opposant une résistance plus grande que le frottement de la tige dans les boîtes à étoupe et de la tête *x* contre la semelle de l'étrier *s*; par suite la tige s'élève: la tête *x* et l'arrêt *q* entraînent dans leur mouvement ascendant les disques inférieurs des deux lanternes; les manchons de caoutchouc se gonflent à mesure qu'ils se raccourcissent, l'eau qui y est enfermée ne pouvant diminuer de volume. On tourne la tige jusqu'à ce que les écrous *m* viennent buter contre les douilles *h* et s'opposer au mouvement. Par une expérience faite au jour dans un tube de même diamètre que le trou de sonde, on s'est rendu compte de la position qu'il faut donner aux écrous *n* sur la tige, pour qu'à ce moment les manchons de caoutchouc réalisent une fermeture hermétique. Quand on veut relever l'appareil, on n'a qu'à donner à la tige un mouvement de rotation en sens contraire, et les deux lanternes reprennent leur forme primitive. Pour pouvoir ainsi tourner la sonde à volonté dans les deux sens, il fallait placer, aux emmanchements, des étriers à vis, ce qui compliquait et ralentissait beaucoup les manœuvres d'assemblage et de désassemblage des tiges.

Les résultats des observations faites au moyen de l'appareil ci-dessus décrit, pendant le dernier trimestre de l'année 1871, sont réunis dans le tableau III. On faisait toujours deux observations à la même profondeur, l'une avec, l'autre sans les obturateurs, afin de s'assurer, par la différence des températures obtenues, si l'appareil avait réellement atteint son but. On a fait subir ici aux températures observées les corrections rendues nécessaires par le déplacement du zéro du thermomètre ordinaire employé.

Tableau III.

Numéro d'ordre.	PROFON- DEUR.	TEMPÉRATURE OBSERVÉE		OBSERVATIONS.
		avec obturation.	sans obturation.	
	mètres.	degrés C.	degrés C.	
1	4,71		12,94	
2	—	11,75		Résultat trop fort, par suite de la conductibilité des tuyaux de tubage.
3	9,42		12,75	
4	—	11,95		Comme au n° 2.
5	15,69		13,00	
6	—	12,32		Comme au n° 2.
7	21,97		15,37	
8	—	12,70		
9	94,16		16,90	
10	—	18,25		
11	125,54		17,87	
12	—	18,50		
13	156,93		18,35	
14	—	18,95		Expérience manquée : le trou étant trop large à cette profondeur, les lames d'acier glissaient sur la paroi.
15	219,70		20,10	
16	—	21,32		
17	282,47		21,47	
18	—	23,12		
19	345,24		23,85	
20	—	26,00		Le thermomètre était resté en observation pendant 19 heures.
21	—	24,87		Idem idem 1 —
22	—	24,37		Idem idem 2 —
23	—	24,50		Idem idem 2 —
24	—	24,50		Idem idem 1 — (1)
25	—	24,62		Idem idem 6 — (2)
26	—	26,00		Idem idem 10 —
27	408,01		25,47	
28	—	26,37		
29	470,78		27,60	
30	—	28,50		
31	533,55		28,62	
32	—	30,12		Il s'était produit, dans le manchon supérieur, une crevasse longue de 2 centimètres.
33	—	30,25		
34	596,32		31,00	
35	—	32,25		L'appareil était resté en observation pendant 12 heures. Le manchon encore intact s'était déchiré à tel point qu'on ne pouvait plus le remettre en bon état.
36	—	32,37		L'appareil était resté en observation pendant 37 heures.
37	—	32,37		Au lieu des manchons de caoutchouc, on emploie des tampons d'argile enfermés dans des sacs de toile.
38	659,09		33,50	Avec tampons d'argile. — Résultat trop faible : le tampon supérieur ne fermait pas bien.
39	—	33,87		Idem. Idem.
40	—	33,87		Idem. Résultat trop faible.
41	—	35,00		Idem. Expérience bien réussie.
42	721,87		35,12	
43	—	35,62		Idem. Résultat trop faible.
44	784,63		36,87	
45	—	37,12		Idem. Idem.
46	847,41		37,87	
47	—	38,12		Idem. Idem.
48	910,18		39,50	
49	972,94		40,87	
50	1.035,72		42,00	
51	1.063,95		42,62	
52	—	45,19		Moyenne des deux résultats obtenus, en 1870, en plaçant le thermomètre au fond du trou dans une poche fermée par un tampon en bois garni d'étoupe.
53	1.098,49		43,37	
54	1.161,26		44,75	
55	1.224,03		45,75	
56	1.268,59		47,62	
57	—	47,81		Avec un manchon de caoutchouc, qui se déchira entièrement.
58	12,55		9,75	Température de l'eau d'un puits voisin.

(1) et (2) — L'un des deux manchons s'était déchiré.

On s'était d'abord rendu compte, par une série d'expériences préliminaires (n° 20 à 26), du temps que mettait l'eau emprisonnée entre les deux obturateurs à acquérir la température de la roche voisine : on trouva que dix heures suffisaient.

Au delà de 620 mètres de profondeur, le trou de sonde était trop étroit pour qu'on pût continuer à se servir des mêmes obturateurs. On commanda deux nouveaux manchons de caoutchouc moins larges que les premiers. En attendant, on essaya de poursuivre les observations en remplaçant chacune des enveloppes de caoutchouc par un sac en forte toile ayant la forme d'un double tronç de cône et renfermant un boudin d'argile plastique de même diamètre que les deux disques de fer. Quand on introduit l'appareil dans le trou de sonde, les deux sacs, soumis à une tension suivant la verticale, prennent, en se plissant, la forme cylindrique; une fois qu'il est en place, on tourne la tige à gauche : les disques se rapprochent, les cylindres d'argile s'aplatissent et les sacs s'élargissent de manière à obstruer complètement le trou de sonde. Si l'on tourne ensuite la tige en sens contraire, les sacs sont forcés de s'allonger et conséquemment de se rétrécir, et l'on peut relever l'appareil.

Quand on reçut les manchons de caoutchouc, on voulut tout d'abord s'en servir pour mesurer la température de la roche tout à fait au fond du trou de sonde; un seul obturateur suffisait. L'expérience n'eut malheureusement pas de succès : l'enveloppe de caoutchouc se déchira à tel point qu'il n'en restait que quelques lambeaux attachés aux disques de fonte; l'un des ressorts *fg* fut brisé, les autres forcés; ces lames d'acier s'étant accrochées, en remontant, à la base du troisième tubage, celui-ci fut détérioré et il fallut introduire la *poire* dans le tube pour lui rendre la forme cylindrique.

On reprit alors la série des observations à la profondeur

de 596<sup>m</sup>,32 en faisant usage des sacs remplis d'argile. Deux expériences seulement (n<sup>os</sup> 37 et 41) réussirent. Le tubage ayant été de nouveau endommagé dans l'expérience n<sup>o</sup> 47, on dut abandonner les observations, sans avoir même pu déterminer la température au fond du trou, au moyen du manchon de caoutchouc dont on disposait encore.

La température moyenne de l'année dans la localité de *Sperenberg* n'est pas connue, mais on peut admettre, sans erreur sensible, qu'elle est la même qu'à *Berlin*, soit 8<sup>o</sup>,975 C. Il n'est donc pas douteux que les températures de 11<sup>o</sup>,75 et de 11<sup>o</sup>,95 (n<sup>os</sup> 2 et 4) obtenues, dans une saison froide, pour les faibles profondeurs de 4<sup>m</sup>,71 et de 9<sup>m</sup>,42, sont trop élevées. On en eut la preuve certaine en mesurant la température de l'eau débitée, après épuisement prolongé, par une pompe installée sur un puits de 12<sup>m</sup>,55 de profondeur situé dans le voisinage : on ne trouva en effet que 9<sup>o</sup>,75 C. (n<sup>o</sup> 58). Cette anomalie que présentent les températures observées dans la partie haute du trou de sonde tient à ce que les tubes de tôle, qui règnent jusqu'à la profondeur de 159<sup>m</sup>,40, étant très-bons conducteurs, transmettaient au tronçon de colonne d'eau isolé où était placé le thermomètre un certain flux de chaleur venant du bas.

Si l'on élimine du tableau précédent les résultats qui sont à coup sûr entachés d'erreur, il ne reste que les suivants :

Tableau IV.

N <sup>o</sup> D'ORDRE.	PROFONDEUR.	TEMPÉRATURE.
	mètres.	degrés C.
16	219,70	21,32
18	282,47	23,12
20	345,24	26,00
28	408,01	26,37
30	470,78	28,50
33	533,55	30,25
36	596,32	32,37
41	659,09	35,00
52	1.063,95	42,62

Comme le mercure est plus compressible que le verre, les températures doivent être corrigées en tenant compte de la pression à laquelle était soumis le thermomètre. D'après *Magnus*, il faut ajouter à la température observée la quantité

$$0,0111 \times p,$$

$p$  exprimant la pression en atmosphères. Afin de pouvoir calculer  $p$ , on détermina la densité de l'eau salée prise à différentes profondeurs dans le trou de sonde.

Toutes corrections faites, on trouve, en appliquant la méthode des moindres carrés, que la loi de variation de la température suivant la profondeur est représentée par la formule suivante :

$$T = 8,975 + 0,004075614 S - 0,000000123820 S^2,$$

où  $T$  représente la température centigrade et  $S$  la profondeur en mètres ; la constante 8,975 est la température moyenne de l'année, que l'on suppose être la même à *Sperenberg* qu'à *Berlin*.

Le tableau suivant donne, d'une part, les nombres fournis par l'observation, toutes corrections faites, et, d'autre part, ceux que l'on déduit de cette formule.

Tableau V.

PROFONDEUR.	DIFFÉRENCES.	TEMPÉRATURE observée.	ACCROISSEMENT de la température pour 62 <sup>m</sup> ,77 (200 pieds du Rhin).	ACCROISSEMENT de profondeur correspondant à une élévation de température de 1 deg. C.	TEMPÉRATURE calculée.	ACCROISSEMENT de la température pour 62 <sup>m</sup> ,77 (200 pieds du Rhin).	ACCROISSEMENT de profondeur correspondant à une élévation de température de 1 deg. C.	ÉCART entre les températures observée et calculée.
mètres.	degrés C.	degrés C.	degrés C.	mètres.	degrés C.	degrés C.	mètres.	degrés C.
219,70	"	21,594	"	"	19,567	"	"	- 2,027
282,47	62,77	23,475	1,881	33,37	22,311	2,744	22,80	- 1,464
345,24	62,77	26,434	2,959	21,21	24,929	2,618	24,26	- 1,505
408,01	62,77	26,887	0,453	138,61	27,421	2,492	25,72	+ 0,534
470,78	62,77	29,096	2,209	28,42	29,787	2,366	27,18	+ 0,691
533,55	62,77	30,926	1,830	34,30	32,027	2,240	28,64	+ 1,101
596,32	62,77	33,130	2,204	28,48	34,141	2,114	30,10	+ 1,011
659,09	62,77	35,835	2,705	23,20	36,129	1,988	31,57	+ 0,294
1.063,95	404,88	46,547	1,661	37,79	45,945	1,522	41,24	- 0,602

Les différences de la série des températures observées, rapportées à un même accroissement de profondeur (4<sup>e</sup> colonne du tableau V), sont assez peu comparables entre elles, et ne paraissent varier suivant aucune loi certaine à mesure que la profondeur augmente. Du reste, il n'y a pas de motifs sérieux pour laisser de côté telle de ces différences plutôt que telle autre. La formule à laquelle conduit la méthode des moindres carrés ne doit donc pas représenter exactement la loi de variation de la température beaucoup au delà de la profondeur de 1.000 mètres.

On se contente ordinairement de savoir de combien augmente la température, *en moyenne*, pour un accroissement donné de la profondeur : en ne considérant que les deux termes extrêmes de la série, on voit que la température s'accroît, *en moyenne*, de 1° C. pour un accroissement de profondeur de

$$\frac{1065,95 - 219,70}{46,547 - 21,594} = 33^m,83.$$

On remarquera que, dans l'expression de T, le coefficient de S<sup>2</sup> est négatif. En établissant la même formule, par la même méthode, pour d'autres sondages, M. W. v. *Freeden* a toujours trouvé aussi un coefficient négatif pour le troisième terme. Il paraît donc démontré que la température du globe augmente de moins en moins vite à mesure que la profondeur s'accroît.

Tels sont les résultats des observations faites sur le trou de sonde de *Sperenberg*. Ils ne sont malheureusement pas aussi complets qu'on l'aurait désiré ; les observations rigoureuses, au moyen de l'isolement d'une portion de la colonne d'eau, ont en effet commencé trop tard, et des accidents sont ensuite survenus, qui ont empêché de les poursuivre en allant jusqu'au fond du trou de sonde. Au moins l'expérience acquise sera fort utile pour les observations de même nature à faire sur d'autres sondages, observations qu'il y aurait grand intérêt à multiplier da-

vantage. On peut, en effet, déterminer la température de la roche au fond d'un trou de sonde avec autant de précision que dans une mine ; or on a l'avantage d'obtenir ainsi la température qui règne réellement dans toute la région à la profondeur considérée ; tandis que, dans une mine, le régime calorifique normal se trouve modifié par mille causes, telles que la circulation de l'air et de l'eau dans les galeries et dans les fissures du terrain.

## RECHERCHES SUR LA TEXTURE DU FER.

LA TEXTURE A GRAINS EST SEULE INHÉRENTE  
A CE MÉTAL (\*).

Par M. JANOYER, ingénieur civil, directeur de forges.

Depuis cinquante ans, la sidérurgie s'est enrichie d'une foule de découvertes; de nouvelles méthodes ont été adoptées, les anciennes ont été modifiées, et il a paru un grand nombre d'ouvrages groupant toutes ces connaissances. L'art des forges est devenu une véritable science, mais comme toutes les sciences d'observation, elle est encore incomplète.

On pourrait croire que la nature d'un métal aussi important que l'est le fer doit être parfaitement connue; mais les métallurgistes qui se livrent sérieusement à son étude ne tardent pas à s'apercevoir qu'il reste encore un vaste champ à l'observation, et carrière ouverte sur un grand nombre de points où le sujet semblait épuisé.

La texture du fer, qui fait l'objet de ce mémoire, est une de ces questions délicates, dont on croirait volontiers que tout a été dit, car son étude est, en apparence du moins, de la plus grande simplicité. Une expérience de nombreuses

(\*) Ce mémoire fait suite à mon travail publié dans les *Annales des mines*, tome XV, 1859, sur le fer à grains et l'acier naturel aux fours à puddler. Des raisons particulières se rattachant à la position industrielle que j'occupais ont été, jusqu'à ce jour, un obstacle à sa publication; ces raisons ayant disparu, je m'empresse de compléter mon travail.

années, accompagnée d'essais multipliés et aidée d'intéressantes communications, m'a conduit à reconnaître que les idées émises jusqu'à ce jour ne répondent pas *toutes* aux exigences de la science, et que ce qui a été dit sur la grainure du fer a besoin d'être, en grande partie, modifié.

Depuis les Bergmann, les Hassenfratz, les Karsten jusqu'à nos jours, on a donné au fer un polymorphisme très-complexe, faute de se rendre un compte exact de la cause des divers aspects sous lesquels il se présente dans les arts.

Ainsi, obéissant à une observation incomplète, on a classé les fers, en *fers à grains*, *fers nerveux*, *fers mélangés de grains et de nerfs*, et en outre, comme avec certains minerais il était plus facile de produire un fer nerveux qu'un fer à grains et réciproquement, beaucoup de métallurgistes ont considéré cette tendance comme *inhérente à la matière*. En conséquence, tel minerai a été réputé donner toujours du fer à nerfs, et tel autre, toujours du fer à grains.

Je vais essayer de démontrer que cette disposition à telle ou telle texture n'est point inhérente à la nature, et que le fer n'est pas un corps polymorphe, comme l'indiquent Hassenfratz et le Suédois Bergmann.

Ainsi que je l'ai annoncé (*Annales des mines*, t. XV, 1859), le fer ne présente qu'une *seule* texture : *la texture à grains*, et toutes les autres ne sont qu'un métamorphisme de celle-ci, dû au défaut de température au moment de l'élaboration, défaut qui ne permet pas le soudage complet de la masse. La grainure reposant dès lors uniquement sur la *soudabilité*, il serait plus rationnel, je crois, de baser la classification des fers sur cette propriété, le grain et le nerf n'étant que l'un des effets de cette propriété.

Sans prétendre substituer d'un coup ma classification de *fers soudés*, *fers non soudés*, ou *imparfaitement soudés*, à la classification de fers à grains et fers à nerfs, consacrée par le temps et l'habitude, il faut toutefois que la désigna-

tion de fer à grains soit l'indication d'un fer parfaitement soudé dans sa masse, et celle de fer à nerfs l'indication d'un fer non soudé. Ce fait, bien compris et bien établi, suffira pour jeter une grande clarté sur plusieurs des propriétés incomplètement étudiées du fer. C'est là que l'on trouvera l'explication de toutes les assertions de Karsten et des autres savants métallurgistes :

« *Le fer mou devient fibreux plutôt que le fer dur.*

« *Le fer en grosses barres ne présente jamais de nerfs, etc., etc....* »

C'est là que se trouveraient relevées ces erreurs qui se perpétuent sans contrôle :

« *La cassure à facettes plus ou moins grosses est toujours un signe de mauvais fer.*

« *Un fer mal affiné se reconnaît aux facettes entremêlées de nerfs.* »

Les preuves à l'appui de cette nouvelle manière d'envisager les fers sont très-nombreuses; on les trouvera :

- 1° Dans les différents modes de fabrication;
- 2° Dans l'étude du fer au microscope;
- 3° Dans les propriétés physiques de ce métal;
- 4° Dans l'influence bien constatée de certains métalloïdes sur la qualité du fer.

#### PREUVES TIRÉES DES DIFFÉRENTS MODES DE FABRICATION.

Le fer au bois (méthode comtoise), c'est-à-dire exclusivement fabriqué avec le combustible végétal et ayant la plus grande pureté, présente toujours la texture grenue. Je dirai avec Karsten (*Manuel de métallurgie*, t. I, p. 58) : *Lorsque le fer est très-pur, sa texture est grenue; mais j'y ajouterai l'homogénéité, et je dirai que lorsqu'il est très-pur et très-homogène, sa texture est grenue.*

Nous trouvons bien des personnes qui pensent que le grain est dû au martelage, moyen puissant de comprimer

les molécules les unes contre les autres, et que de cette compression résulte nécessairement l'état grenu; déduction purement tirée de l'aspect sous lequel se présente la structure du fer martelé, comparée à celle du fer laminé qui est toujours plus ou moins nerveuse.

Sans nier l'action du martelage qui, surtout à froid, donne au fer des facettes planes et brillantes qui ne sont point le grain inhérent au métal, ainsi que je le démontrerai plus loin, je prétends que le grain du fer est essentiellement dû à la haute température qui règne pendant les deux opérations, *soulèvement* et *avalement*, température qui permet l'expulsion plus complète des scories et *un soudage parfait de la masse.*

Pendant le soulèvement, l'ouvrier affineur fait passer devant la tuyère, dans la région oxidante, tout le fer qui, sous l'influence de la haute température, tombe fragment par fragment, en quelque sorte entièrement fondu l'un sur l'autre, et la scorie très-fluide favorise le décapage de la matière et un soudage parfait; le soudage est encore favorisé par la pression que l'ouvrier exerce sur la masse, au moyen de son ringard, en faisant levier contre les parois du four. Pour se convaincre du soudage parfait il suffit, après le cinglage, de couper une loupe d'affinerie, et l'on ne tarde pas à reconnaître qu'elle présente une homogénéité parfaite et une compacité que ne possède pas le massiau du four à puddler.

La température à laquelle la masse de fer a été produite est telle qu'on est quelquefois obligé de la laisser refroidir un peu avant de la cingler, pour qu'il n'y ait pas écrasement sous le marteau. Ce léger refroidissement, qui serait une faute grave dans le travail du massiau provenant du puddlage, à cause de l'énorme quantité de scories à expulser, n'est pas nuisible pour le massiau provenant de l'affinage au charbon de bois dans les bas foyers. Le massiau a déjà atteint après l'affinage un soudage complet.

Le fer puddlé (méthode anglaise), contrairement au fer au bois, présente plus fréquemment la texture nerveuse. En comparant les deux procédés de fabrication, il est facile de reconnaître que la température dans le puddlage est infiniment plus faible. D'un autre côté, l'opération du puddlage consiste à remuer une masse de fer spongieux au milieu de scories qui empêchent le rapprochement intime des particules. Ce sont autant de causes s'opposant au soudage de la masse, et par suite favorisant la structure nerveuse; pendant le travail, les molécules peuvent glisser les unes sur les autres, et donner à la pièce l'aspect fibreux.

Mais, dira-t-on, aux fours à puddler on produit également du bon fer à grains; il suffit, pour s'en convaincre, de jeter les yeux sur les beaux produits qui sortent tous les jours des forges de la Loire: bandages, essieux, etc. C'est cependant encore le puddlage qui fournit cette qualité de fer si recherché. Oui, c'est le puddlage, mais bien différent de celui qui s'opère dans les grandes forges anglaises pour le fer en barres ordinaires du commerce. Cette différence est précisément basée sur une haute température qui règne dans le travail à grains, sur un martelage prompt et, par suite, sur une expulsion plus complète des scories et un *soudage parfait* de la masse.

Dans la description que j'ai faite de la fabrication du fer à grains (*Annales des mines*, t. XV, p. 147), j'ai insisté sur la haute température nécessaire à la production de ce fer. J'ai appelé l'attention des fabricants sur tous les moyens à employer pour y arriver, surtout pendant la deuxième période, celle qui précède immédiatement la confection des boules.

Sous cette haute température, condition *sine qua non*, le rapprochement des molécules de fer est plus intime par la séparation des scories. Je recommande également, ce que savent très-bien tous ceux qui ont fabriqué du fer à grains, le prompt transport des boules sous le marteau, afin qu'elles

n'aient pas le temps d'atteindre un refroidissement capable d'arrêter l'expulsion des scories et d'empêcher le soudage. Pour rendre plus palpable encore ce que je viens de dire sur les causes qui différencient la fabrication du fer à grains et celle du fer à nerfs, il suffit, au moment où le puddleur se dispose à faire les boules de *fer à grains*, de baisser les registres du four pour diminuer la température, de rouler ensuite les boules dans la scorie qui reste sur la sole, et de les porter dans ces conditions sous le marteau; *les boules donnent alors du fer entièrement à nerfs*.

Le puddlage lui-même n'a cependant pas été modifié, et pourtant le fer qui était à grains est devenu à nerfs. L'abaissement de température, qui a favorisé un soudage incomplet et une interposition de scories dans la masse, a été le seul agent qui a déterminé le changement de texture.

L'expérience me paraît concluante.

Les sidérurgistes, qui voient uniquement dans le grain l'influence du carbone, me diront probablement que le séjour prolongé dans le four, au contact des scories, amène une déperdition de carbone et que le fer étant plus décarburé, il n'est pas étonnant que la texture ait changé. Ils seront conduits à me faire cette objection parce que l'acier se présente presque toujours sous l'aspect grenu; et comme entre le fer et l'acier il n'y a de différence que par une teneur plus considérable en carbone, ils attribueront le grain à la présence de ce métalloïde.

L'objection tombera lorsque nous dirons que l'acier étiré en plaques minces présente quelquefois du nerf. L'acier puddlé donne souvent ce produit nerveux qui prend assez bien la trempe. Mais l'objection ne sera surtout plus soutenable lorsque l'on verra *qu'il est possible de ramener à grains ce même fer à nerfs*, par une seule opération qui *n'est point propre à donner du carbone* au fer, par une *chaude suante* qui expulsera les scories et amènera un soudage parfait.

D'après cela, je suis autorisé à dire que la texture nerveuse n'est point inhérente à la matière.

La transformation de la texture grenue en texture fibreuse, par le refroidissement ou le défaut de température au moment de l'élaboration, est donc établie d'une manière incontestable; la réciproque est également vraie, c'est-à-dire que, étant donné du fer à nerfs, il suffit de le porter à une température élevée, capable de développer la soudabilité, pour le transformer en fer à grains. En donnant à l'extrémité d'une barre de fer à nerfs une chaude suante, on obtiendra en ce point la texture grenue et l'on pourra obtenir une barre de fer à nerfs à l'une des extrémités et à grains à l'autre. Cette simple expérience, du plus haut intérêt pour la science et de la plus grande portée pour la pratique, donne le moyen de produire à volonté du fer à grains et du fer à nerfs, selon les besoins du consommateur, sans changer la matière première employée.

Dans tout ce qui précède, on trouvera l'explication de la raison pour laquelle les compagnies de chemins de fer exigent que les rails en fer soient à grains, et pour laquelle les constructeurs demandent du fer à grains pour les pièces à frottement qui, par conséquent, doivent avoir un beau poli.

C'est que le fer à grains étant bien soudé, on est sûr qu'il ne s'exfoliera pas sous le poids des locomotives ou par le frottement, comme le ferait un fer à nerfs, c'est-à-dire non soudé.

Tout ce que je viens de dire jusqu'à présent s'applique à la production du fer brut; mais on pourra me demander ce que deviendra ce fer brut à grains ou à nerfs lorsqu'on le soumettra au corroyage.

Tous les phénomènes se reproduiront de la même manière.

Si l'on prend deux ou plusieurs barres de fer brut à grains, superposées de manière à former un paquet, et si ce paquet, réchauffé au blanc soudant, est passé dans la série

des cannelures nécessaires pour produire une barre, il donnera toujours du fer à grains, si, en sortant de la dernière cannelure, la température est encore assez élevée pour avoir un soudage complet. Si au contraire la barre sort de la dernière cannelure à simple chaleur rouge, la texture sera nerveuse, précisément parce qu'elle ne sera pas soudée.

Étirée trop froide, la matière est désagrégée et dessoudée; il y a glissement des particules les unes sur les autres, allongement du tissu et par suite texture nerveuse.

Comme preuve de ce glissement, il suffit de faire sur le côté d'un paquet de fer une entaille d'un centimètre de profondeur bien perpendiculaire à la longueur. Chauffé au blanc soudant, le paquet, passé dans une assez grande série de cannelures, présentera l'entaille constamment normale à la barre, jusqu'au moment où la température n'aura plus été suffisante pour maintenir l'état pâteux nécessaire au soudage. A cet instant, l'entaille prendra de plus en plus la forme d'un > couché.

Cette simple expérience prouve à l'évidence que, dans la cannelure, le centre ou cœur de la barre ne reçoit en passant qu'une pression verticale et que les deux surfaces glissent sur lui en formant exactement l'allongement. On trouve encore la preuve de ce glissement en jetant un coup d'œil sur les barres sortant d'un laminoir et non encore affranchies à la cisaille. L'extrémité qui sort la première a toujours le centre en saillie sur la mise supérieure et la mise inférieure. L'inverse se présente à l'autre extrémité des barres.

Au moment où l'on engage dans une cannelure la barre portée au rouge sombre, les cylindres présentent un obstacle au passage du métal dont le centre seul passe facilement, tandis que les mises supérieures et inférieures sont obligées de reculer devant les cylindres en glissant sur lui. Si la barre présente, à la dernière cannelure, une température suffisante pour qu'il n'y ait pas glissement et par

suite désagrégation de la matière, *le soudage existe*, la barre est à grains. Ce dernier cas se présente dans les gros fers qui, pendant tout le laminage, ont conservé une température suffisamment élevée.

Il arrive cependant que, dans ces gros fers à grains, on trouve encore en quelques points un peu de nerf. L'œil exercé ne tarde pas à reconnaître que cette texture nerveuse se trouve toujours à la jonction des mises constituant le paquet. Elle est uniquement due à l'interposition de la scorie, corps étranger qui empêche le soudage.

Aussi les maîtres de forges, pour arriver à l'expulsion de ces scories, ont souvent recours au pilonage des paquets, moyen sûr de se débarrasser des oxydes interposés et d'avoir un soudage parfait.

Si nous jetons un coup d'œil sur la série des engins employés à l'épuration du fer, nous voyons la pratique, après bien des essais infructueux, revenir toujours aux marteaux sous des formes plus ou moins variées, et abandonner la presse (squeezer), la machine à cingler rotative, tous moyens aussi simples qu'ingénieux pour un cinglage rapide, mais défectueux. Les marteaux d'un grand poids ont partout donné de très-bons résultats.

J'ai annoncé, plus haut, que le martelage à froid donnait au fer nerveux des facettes planes et brillantes, qui n'étaient point le grain inhérent au fer.

Je vais essayer de donner ici mon appréciation sur la manière dont s'opère *cette transformation à froid du fer à nerfs en fer à grains* par des chocs et vibrations successifs souvent répétés.

L'examen des cercles de roues de voitures roulant sur le pavé ne laisse aucun doute sur le fait. Généralement ces cercles sont en fer nerveux. Après un temps plus ou moins long de travail, le fer est à grosses facettes planes brillantes. Pour avoir l'explication de cette transformation, il suffit d'examiner ce qui se passe lorsqu'on frappe avec un

marteau d'un certain poids un point quelconque d'une barre. La partie qui se trouve immédiatement entre le marteau et l'enclume se déplace latéralement et est obligée de vaincre l'inertie des portions de la barre placée en dehors de l'action du marteau. L'inertie des bouts fait l'office de deux marteaux qui refouleraient la barre dans le sens de la longueur. Il y a compression de la matière, et de là le grain observé qui se présente toujours dans ce cas sous formes de grosses facettes planes et qui n'est plus le grain fin inhérent au fer. Ce sont les mêmes facettes que l'on observe sur la demi-section d'une barre de fer à nerfs, qui a fléchi avant de rompre. Elles sont dues à la compression des fibres.

PREUVES TIRÉES DE L'ÉTUDE DE LA STRUCTURE DU FER  
AU MICROSCOPE.

Il résulte de l'examen approfondi et de la comparaison des différents modes de fabrication du fer que ce métal à l'état de pureté et d'homogénéité, résultant d'une bonne fabrication, où les conditions de chauffage auront été observées, est toujours à grains, et que cette texture grenue devient nerveuse ou fibreuse lorsque la température, pendant l'élaboration, a été trop faible pour permettre un soudage complet de la masse.

Si tout se passe ainsi, l'étude du fer au microscope devait nécessairement me révéler une compacité parfaite du métal lorsqu'il est à grains, et au contraire très-peu d'homogénéité dans le fer à nerfs. Ces faits se sont complètement vérifiés.

Mais là ne s'est pas borné l'office de la puissante loupe dont je me suis servi (\*). Comme nous le verrons plus loin,

(\*) Toutes les personnes qui voudront se livrer aux observations que je relate dans ce travail, pourront, au lieu de micros-

elle m'a décelé, dans le cas de non-soudure, c'est-à-dire, dans le cas du fer à nerfs produit aux fours à puddler, cette interposition de matière noire, pulvérulente (scorie), dont j'ai déjà parlé à propos de la fabrication du fer par la méthode anglaise. Cette substance est précisément logée dans les cellules du fer à nerfs, cellules très-perceptibles au microscope.

L'étude du fer à la loupe Coddington, grossissant environ trente fois l'objet soumis à l'observation, m'a encore conduit à établir d'une manière nette et irrécusable que :

Le fer à l'état de pureté est à grains ;

Le fer à grains est compacte et bien soudé ;

Le fer à nerfs est caverneux et non soudé ;

Le fer mélangé de grains et de nerfs n'est pas soudé uniformément dans sa masse ;

Le fer à la houille (méthode anglaise) contient des matières étrangères interposées.

Le fer à la houille présente ordinairement la texture nerveuse et un tissu fort peu homogène, parce que le soudage n'a pas eu lieu.

Je vais présenter en détail les observations qui m'ont conduit à ces conclusions.

Un échantillon de fer fabriqué avec beaucoup de soin et provenant de fonte au bois première qualité, c'est-à-dire, présentant un degré de pureté aussi grand qu'il est possible de l'atteindre par les moyens que possède la métallurgie, soumis à l'observation la plus scrupuleuse sans instrument grossissant, a offert, dans la cassure, une structure à grains très-fins, qui ne présentait à l'œil que de faibles arrachements. Les doigts y rencontraient des aspérités qui ont fait donner à ce fer le nom de structure apiforme. Cette déno-

copies, instruments coûteux et difficiles à manier, se servir de loupes puissantes, grossissant au moins 50 fois l'objet soumis à l'observation. La loupe de cette force est tout à fait suffisante.

mination, comme nous le verrons, est tout à fait impropre ; le grain n'a pas la forme crochue de l'hameçon.

Cette cassure, soumise à l'examen de la loupe, a présenté une foule de facettes planes enchevêtrées sans ordre les unes dans les autres. Au moment de la rupture, certains éléments ou facettes, se trouvant dans le plan de la cassure parallèle à la force agissante, se sont séparés ou, en quelque sorte, décollés les uns des autres et ont donné, dans ce cas particulier, *des grains plats ou facettes brillantes*. D'autres, au contraire, se trouvent dans des plans plus ou moins inclinés à la direction de la force agissante, et, en se séparant, se présentent à l'œil sous un angle plus ou moins grand, d'où résulte une *texture grenue plus fine*. Dans ce dernier cas, le fer présente toujours une ténacité plus grande, car les éléments du métal, pris entre des plans, se croisant dans tous les sens, et plus ou moins inclinés par rapport à la force agissante, sont obligés, pour se séparer, de produire des arrachements assez considérables.

Nous voyons qu'indépendamment de la texture grenue inhérente au fer pur, *de deux fers, celui qui a la texture la plus fine présente la plus grande résistance*.

Une autre déduction non moins importante à faire et qui redressera des erreurs bien accréditées, c'est que la finesse du grain, prise d'une manière absolue, n'est pas constamment due à une dose plus considérable de carbone et par suite n'accuse pas toujours la tendance aciéreuse ; elle en est tout à fait indépendante. Il suffit, au reste, de jeter les yeux sur les fers de Suède qui, quoique très-aciéreux, présentent souvent de très-gros grains.

Pour moi, ainsi que je l'ai dit plus haut, cette finesse du grain accuse seulement un fer de qualité supérieure au point de vue de la ténacité.

Dans le fer pur, métallurgiquement parlant, indépendamment de la texture grenue, la loupe accuse une com-

pacité et une homogénéité parfaites provenant du soudage complet.

Si l'on soumet à l'observation un échantillon de fer à nerfs, les choses ne se passent plus de même.

Indépendamment des déchirures très-apparentes, de l'aspect plus ou moins brillant du nerf, de son allongement plus ou moins grand avant la rupture, l'œil très-exercé ne tarde pas à y découvrir un manque d'homogénéité que ne présente jamais le fer à grains. Ce manque d'homogénéité devient bien plus frappant si l'on soumet ce fer à nerfs à l'observation au moyen d'une forte loupe. Elle laisse voir, dans le tissu même du métal, une quantité considérable de trous, de cavernes toutes dirigées dans le sens de la longueur de la barre. Ces trous sont de toutes formes et de toutes dimensions.

La cassure en est littéralement criblée au point d'offrir l'aspect fistuleux et poreux du jonc; la comparaison serait peut-être plus exacte en disant que l'aspect est celui que présenterait une section faite dans une éponge.

Ces cavités tenant à distance les différentes particules de la masse, et étant un obstacle à leur union intime qui constitue le soudage, nous pouvons déjà dire que la loupe accuse encore un manque de soudage dans le fer à nerfs. Travaillées à trop basse température, les particules du fer simplement juxtaposées ont glissé les unes sur les autres en produisant des déchirements, et par suite les cavités observées. Il pourrait encore se faire que la masse primitivement bien soudée eût été dessoudée par une élaboration à trop basse température; le résultat est le même.

Le fer mélangé de grains et de nerfs ne sera plus, comme le dit Karsten, un fer mal affiné; ce sera simplement un fer mal soudé.

Outre l'influence de la température au moment de l'élaboration du fer, il existe encore une autre cause purement mécanique qui influe sur la texture du fer, c'est l'interpo-

sition d'un corps étranger : sable non fondu, scorie très-basique, etc... dans la masse du fer, qui empêchera le rapprochement des molécules. Dans la plupart des cas, c'est la scorie très-basique qui se trouve emprisonnée dans le fer et dont l'expulsion incomplète favorise le non-soudage, et par suite la texture nerveuse.

Aussi voyons-nous les maîtres de forges expérimentés exiger que du sable, aussi siliceux que possible, soit projeté sur les pièces de fer portées au blanc soudant pour favoriser un décapage par la formation de scories moins basiques et obtenir ainsi un soudage parfait.

Cette scorie, dont on cherche à se débarrasser, est à mon avis *une des principales causes qui différencient* (à qualité égale de fonte) *le fer au bois du fer à la houille*. Elle empêche le soudage et donne au nerf un aspect noir.

L'étude du fer au microscope ne laisse aucun doute sur la question. Le fer au bois nerveux, mais qui ne laisse pas apercevoir à la loupe de parties noires, a toujours un aspect brillant argenté et jamais un nerf noir mat et court comme les fers à la houille.

Pour donner une idée bien précise de la fâcheuse influence de la scorie interposée dans la masse du fer, je vais citer une expérience qui est bien concluante.

On sait que dans la fabrication du fer au bois (méthode comtoise) on laisse, au début de l'affinage de la fonte, précisément sous le jet de vent des tuyères, une certaine quantité de fer de l'opération précédente (2 kilogrammes environ), afin de favoriser la formation de scories basiques dont la réaction sur les métaux étrangers et le carbone est plus énergique que celle des scories neutres. (C'est l'explication scientifique du dire du forgeron, lorsqu'il prétend que ce fer en brûlant donne de la chaleur au laitier.)

En 1859-60 pour augmenter la production du fer au bois, je fis ajouter à chaque charge 15 kilogrammes environ de ferraille, croyant à sa pure incorporation au fer

provenant de la fonte. Ma déception fut grande lorsque, pesant le produit, nous trouvâmes un déchet aussi grand qu'avant l'addition de la ferraille, et le fer destiné à être tréfilé présenta de très-mauvaises qualités.

La ferraille ajoutée trop tôt s'était toute oxydée et avait formé *une scorie trop basique qui n'était point sortie du massiau*. Ce corps étranger avait provoqué à la filière de nombreux déchirements, le fil de fer cassait en petits morceaux. En revenant à l'affinage des mêmes fontes sans addition de ferraille, la qualité redevint irréprochable. L'expérience me paraît tout à fait concluante.

Toutes les observations faites sur le fer au moyen du microscope conduisent donc aux mêmes résultats que celles faites en comparant les différentes méthodes de fabrication.

RELATION INTIME ENTRE LES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DU FER  
ET L'ÉTAT DE SOUDAGE DE LA MASSE.

**Densité.**

Le fer à grains étant plus soudé que le fer à nerfs, et par suite plus compacte et plus homogène, nous devons nécessairement conclure *à priori* que le fer à nerfs a une densité plus faible que le fer à grains.

Ce fait trouve effectivement sa vérification dans tout ce qu'offrent la science et la pratique.

Le savant professeur d'Upsal Hassenfratz donne pour densité du fer à grains *bien soudé* 7.791 et pour le fer doux *nerveux* 7.751. Flachet, Barrault et Petiet donnent pour le premier le chiffre 7.780 et pour le second 7.600, ce qui constitue un écart bien plus considérable. Dans la pratique nous voyons les forges, fabriquant des rails en fer à nerfs, n'obtenir le *poids exigé par mètre courant* qu'en donnant une plus grande épaisseur à la section transversale; tandis que les forges, qui obtiennent généralement du

fer à grains, arrivent très-facilement au poids exigé en suivant exactement et presque mathématiquement le gabarit fourni par les compagnies de chemins de fer. Je pourrais citer bien d'autres exemples à l'appui de la plus grande densité du fer à grains. Le fait me paraît démontré.

**Dureté.**

Le meilleur fer, dit Karsten, est celui qui possède la plus grande dureté, et il met en première ligne le fer fort dur qui est toujours *un fer à grains* très-pur à éclat argentin. Ce fer est le type du *fer soudé*; il ne contient point de matières interposées, il ne laisse pas apercevoir de solution de continuité dans son tissu.

**Ténacité.**

La ténacité du fer est la résistance qu'oppose le métal à une puissance extérieure qui tend à rompre les parties constituant la masse. Suivant le mode d'action de la puissance, nous aurons à examiner :

La résistance à la traction ;

» à la compression ;

» à la flexion.

Le fer à grains est celui qui résiste le mieux à la traction et à la compression. Il devait nécessairement en être ainsi, car il est soudé dans toute sa masse, et les surfaces à séparer sont plus considérables que celles du fer à nerfs à égales sections.

L'inverse a lieu pour la résistance à la flexion. Le fer à nerfs n'est pas soudé; par suite le rapprochement intermoléculaire est possible avant que la barre ait atteint le moment de rupture. Aussi présente-t-il toujours une plus grande résistance à la flexion que le fer à grains, mais moins d'élasticité.

**Malléabilité.**

La malléabilité est la propriété du fer de s'étendre sous le marteau. Cette propriété est surtout développée dans le *fer mou* qui est un fer *non soudé*, toujours nerveux. Le fer fort dur au contraire, c'est-à-dire le fer soudé (à grains), s'étend moins facilement.

**Ductilité.**

C'est la propriété que possède le fer de se laisser étirer en fils plus ou moins fins sans se rompre.

Que faut-il pour qu'un fer soit ductile? Deux conditions : homogénéité pour passer à la filière, et ténacité pour supporter la traction.

Le fer fort dur, c'est-à-dire notre fer à grains *soudé*, est le seul convenable. Le fer nerveux *non soudé* présentant peu d'homogénéité, ne pourrait passer à la filière et se romprait à chaque instant. Aussi voyons-nous la pratique rechercher pour cet usage le fer à grains et rejeter le fer à nerfs, c'est-à-dire non soudé. Karsten nous dit (*Manuel de métallurgie*, page 86, tome I) : Le fer fort, quelle que soit sa dureté, peut s'étirer en fils très-minces. Le fer fort dur du sidérurgiste est évidemment notre *fer soudé*.

Si nous généralisons nos observations, nous voyons toutes les forges qui fabriquent du fer à grains, c'est-à-dire *bien soudé* et *homogène*, obtenir du fer plus beau et moins criqué que celles qui fabriquent du fer nerveux.

En résumé nous voyons que toutes les propriétés physiques du fer répondent très-bien à notre manière de l'envisager au point de vue de sa texture.

## INFLUENCE DE QUELQUES MÉTALLOÏDES SUR LA TEXTURE DU FER.

**Soufre.**

Si nous jetons un coup d'œil sur tout ce qui a été dit touchant les fers sulfureux, rouverains ou de couleur, nous trouvons toujours que ces fers ont généralement une structure fibreuse, noire plus ou moins foncée, fibres courtes, absence plus ou moins complète de soudabilité et une grande résistance à froid à la rupture par *flexion*.

Nous trouvons dans ce résumé toute l'explication de ma thèse : l'absence de soudabilité que donne le soufre doit nécessairement amener une structure fibreuse ; les fibres sont noires et courtes par le fait d'interposition de scories dans la masse. Ces fers présentent une grande résistance à la flexion à froid par le rapprochement possible des molécules avant d'atteindre le moment de rupture. Ce sont tous les caractères du fer *non soudé*.

**Phosphore.**

En parlant de l'influence du phosphore sur la structure du fer, je mets de côté les composés de phosphore et de fer dans lesquels le métalloïde est en suffisante quantité pour former de vrais phosphures, composés qui ne sauraient rentrer dans la question que je traite dans ce mémoire.

Je ne veux m'occuper ici que des fers très-légèrement phosphoreux dans lesquels le métalloïde n'entre que pour des millièmes.

Le phosphore, dans ces conditions, joue un rôle diamétralement opposé à celui du soufre.

Les fers phosphoreux *se soudent* avec facilité. Karsten (*Manuel de métallurgie*, § 196, tome I) et tous les métallurgistes praticiens nous disent aussi que les fers phosphurés possèdent une grande soudabilité. Comme ces fers se

présentent toujours avec la structure grenue, nous voyons une fois de plus que ces fers à grains sont bien nos *fers soudés*.

## RÉSUMÉ.

Bien qu'il me soit possible d'apporter encore d'autres preuves à l'appui de ma thèse, je me bornerai là, pensant avoir suffisamment élucidé la question et avoir aussi démontré que le fer ne possède qu'une seule texture, la *texture à grains*, qui repose sur sa propriété la plus essentielle, la *soudabilité*. Toute autre structure n'est qu'un changement dans la texture à grains par défaut de soudabilité pendant le travail de la matière.

## OBSERVATIONS SUR LE MÉMOIRE DE M. JANOYER

Par M. L. GRUNER.

On peut difficilement observer la texture réelle d'un métal plus ou moins malléable. Par la rupture, on déforme toujours certaines parties de la barre dont on cherche à étudier la structure interne. Il est certain néanmoins que la plupart des métaux, sinon tous, prennent une texture *crystalline* par le fait d'un refroidissement prolongé. Les cristaux sont d'autant plus gros et plus lâches que la masse métallique a des dimensions plus grandes. De là ces cavités à parois cristallines que l'on constate toujours dans les gros arbres en fer forgé, lorsque par accident ils viennent à se rompre.

Il suit de ce qui précède que la rupture d'une barre de fer, plus ou moins malléable, permet de juger l'apparence de la *cassure*, mais non sa *texture* proprement dite. Ce que M. Janoyer dit des fers à *grains* et des fers à *nerfs* s'applique donc en réalité à la *cassure* et non à la *texture*.

Une cassure peut être obtenue par un choc sec, violent, brusque, ou par une flexion graduée et lente. Selon le mode de rupture, l'apparence de la cassure pourra être très-différente. Lorsqu'on casse par flexion lente, les fibres du fer peuvent se ployer et s'allonger avant de se déchirer : il pourra se former une cassure à *nerfs*; tandis que ce même fer, rompu brusquement, pourra présenter une cassure plus ou moins *grenue*. Pour comparer les cassures, il faut donc toujours opérer de la même façon, et sur des barres de mêmes dimensions. Une flexion graduée produit précisément le même effet de déchirement qu'un laminage trop froid : les molécules glissent les unes sur les autres, dans la partie convexe de la courbure; il y a déchirement et, par suite, cassure nerveuse.

Ces réserves faites, il est certain que la plupart des observations, présentées par M. Janoyer, sont justes. C'est aux scories interposées qu'il faut bien souvent attribuer le soudage imparfait de certains fers et leur tendance à offrir alors la cassure nerveuse. Mais il faut se rappeler aussi que lorsqu'on soumet un fer, encore partiellement *carburé*, à une chaude suante, ce carbone peut précisément faire disparaître par réduction les scories basiques, tandis que rien ne tend à modifier, dans les mêmes circonstances, un fer non carburé. Il en résulte que les fers *carburés* sont donc bien réellement plus disposés à prendre, ou à garder, la cassure *grenue* que les fers faiblement carburés.

M. Janoyer me paraît aussi critiquer à tort l'assertion de Karsten, « qu'un fer mêlé de nerfs et de grains est mal affiné. » Il est certain qu'un fer *mal affiné*, contenant encore du silicium, ou des scories, dans quelques-unes de ses parties, offrira précisément des défauts de soudure sur quelques points, par suite, une cassure assez variable d'un point à un autre.

## MÉMOIRE

SUR

## LES COORDONNÉES CURVILIGNES

Par M. E. ROGER, ingénieur en chef des mines.

*Introduction.* — L'emploi des coordonnées curvilignes s'étend chaque jour davantage. Bien que l'on ne se soit guère occupé jusqu'ici que des systèmes orthogonaux, cette méthode analytique, extension naturelle de la méthode créée par Descartes, s'est montrée remarquablement féconde, surtout entre les mains de l'éminent géomètre que la science et le corps des mines ont perdu récemment, M. Lamé. « Ce sont précisément les systèmes de coordonnées, comme le fait remarquer M. Lamé, qui caractérisent les phases ou les étapes de la science. Sans l'invention des coordonnées rectilignes, l'algèbre serait peut-être encore au point où Diophante et ses commentateurs l'ont laissée, et nous n'aurions ni le calcul infinitésimal ni la mécanique analytique. Sans l'introduction des coordonnées sphériques, la mécanique céleste était absolument impossible. Sans les coordonnées elliptiques, d'illustres géomètres n'auraient pu résoudre plusieurs questions importantes de cette théorie, qui restaient en suspens, et le règne de ce troisième genre de coordonnées spéciales ne fait que commencer. Mais quand il aura transformé ou complété toutes les solutions de la mécanique céleste, il faudra s'occuper sérieusement de la physique mathématique ou de la mécanique terrestre. Alors viendra nécessairement le règne des coor-

« données curvilignes quelconques, qui pourront seules aborder les nouvelles questions dans leur généralité... »

Nous nous proposons d'étudier, dans le présent mémoire, divers systèmes de coordonnées curvilignes, obliques pour la plupart. Nous établirons quelques formules, à la fois très-générales et très-simples, les premières, en quelque sorte, que l'on rencontre dans cette voie nouvelle que M. Lamé a signalée à l'attention et aux efforts des géomètres. Nous ferons ensuite ressortir l'utilité de nos formules, en montrant avec quelle facilité elles donnent la solution, à peu près complète, de l'une des questions les plus épineuses de la mécanique moléculaire, la capillarité.

## PREMIÈRE PARTIE.

1. *Systèmes unicursifs.* — On peut définir la position d'un point de l'espace soit par les trois coordonnées rectilignes habituelles  $(x, y, z)$ , soit par trois autres variables  $(\lambda, \mu, \nu)$  liées d'une manière quelconque aux coordonnées  $(x, y, z)$ . Si, à chaque système de valeurs réelles des variables  $(x, y, z)$ , il correspond un système unique de valeurs réelles des nouvelles variables  $(\lambda, \mu, \nu)$ , le nouveau système sera propre à représenter, sans ambiguïté, tous les points de l'espace indéfini. Nous dirons alors qu'il est *unicursif*. Supposons cette condition remplie pour un point déterminé, et considérons un point infiniment voisin. Lisons les deux systèmes de coordonnées par trois équations telles que celles-ci :

$$(1) \quad x = f_1(\lambda, \mu, \nu), \quad y = f_2(\lambda, \mu, \nu), \quad z = f_3(\lambda, \mu, \nu);$$

il est facile de voir que le système  $(\lambda, \mu, \nu)$  ne pourra être

unicursif que si chacun des neuf paramètres différentiels  $\frac{dx}{d\lambda}$ ,  $\frac{dx}{d\mu}$ ,  $\frac{dx}{d\nu}$ ,  $\frac{dy}{d\lambda}$ ,  $\frac{dy}{d\mu}$ ,  $\frac{dy}{d\nu}$ ,  $\frac{dz}{d\lambda}$ ,  $\frac{dz}{d\mu}$ ,  $\frac{dz}{d\nu}$  n'est susceptible que d'une seule valeur et si, de plus, aucune de ces valeurs n'est infinie. Mais ces conditions, évidemment nécessaires, ne sont point suffisantes; en effet, des équations ci-dessus on déduit, par différentiation,

$$dx = \frac{dx}{d\lambda} d\lambda + \frac{dx}{d\mu} d\mu + \frac{dx}{d\nu} d\nu, \quad dy = \dots, \quad dz = \dots;$$

ces équations ne donneront, pour chacune des variations  $d\lambda$ ,  $d\mu$ ,  $d\nu$  exprimées en fonctions de  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$  une solution unique et finie que si le déterminant

$$D = \frac{dx}{d\lambda} \left( \frac{dy}{d\mu} \frac{dz}{d\nu} - \frac{dz}{d\mu} \frac{dy}{d\nu} \right) + \frac{dy}{d\lambda} \left( \frac{dz}{d\mu} \frac{dx}{d\nu} - \frac{dx}{d\mu} \frac{dz}{d\nu} \right) + \frac{dz}{d\lambda} \left( \frac{dx}{d\mu} \frac{dy}{d\nu} - \frac{dy}{d\mu} \frac{dx}{d\nu} \right)$$

ne s'annule pas. Nous supposons, par la suite, que ces conditions d'*unicursivité* sont toujours satisfaites.

2. *Parallépipèdes élémentaires.* — Considérons maintenant les trois équations

$$\lambda = \text{const.}, \quad \mu = \text{const.}, \quad \nu = \text{const.};$$

en attribuant aux trois constantes arbitraires des valeurs qui croissent ou diminuent uniformément par degrés infiniment petits, on obtiendra trois séries de surfaces qui décomposeront l'espace en une série de parallépipèdes ayant pour côtés les éléments linéaires des trajectoires qui résultent des intersections successives des surfaces appartenant à des séries différentes. De cette manière un point quelconque N de l'espace pourra être considéré, en élargissant les notions élémentaires de la cristallographie, comme l'un des huit sommets d'une molé-

cule hexaédrique appartenant à un système cristallin défini, quant à sa nature et quant à sa position par rapport aux axes  $(x, y, z)$ , par les équations (1) du numéro précédent. Nous allons rechercher les expressions analytiques des divers éléments de cette molécule cristalline.

3. *Éléments linéaires; leur inclinaison mutuelle. Conditions d'orthogonalité.* — Désignons par  $ds_1$ ,  $ds_2$ ,  $ds_3$  les éléments linéaires des trois trajectoires qui se coupent au point N. On a évidemment

$$ds_1 = \sqrt{\left(\frac{dx}{d\lambda}\right)^2 + \left(\frac{dy}{d\lambda}\right)^2 + \left(\frac{dz}{d\lambda}\right)^2} d\lambda, \quad ds_2 = \dots, \quad ds_3 = \dots$$

Les angles  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  que font deux à deux les trois trajectoires sont donnés, en fonctions de  $(\lambda, \mu, \nu)$ , par les trois équations suivantes :

$$\cos \alpha = \frac{\frac{dx}{d\mu} \frac{dx}{d\nu} + \frac{dy}{d\mu} \frac{dy}{d\nu} + \frac{dz}{d\mu} \frac{dz}{d\nu}}{ds_2 ds_3} d\mu d\nu, \quad \cos \beta = \dots, \quad \cos \gamma = \dots$$

Pour que le système  $(\lambda, \mu, \nu)$  soit orthogonal, il faut et il suffit que l'on ait en chaque point

$$\cos \alpha = 0, \quad \cos \beta = 0, \quad \cos \gamma = 0.$$

4. *Éléments superficiels; leur orientation; leur inclinaison mutuelle.* — L'aire  $d\sigma_1$  de l'une des trois faces adjacentes au point N a évidemment pour mesure le produit  $ds_2 ds_3 \sin \alpha$ . On a donc

$$d\sigma_1 = ds_2 ds_3 \sqrt{1 - \cos^2 \alpha} = \sqrt{\left[\left(\frac{dx}{d\mu}\right)^2 + \left(\frac{dy}{d\mu}\right)^2 + \left(\frac{dz}{d\mu}\right)^2\right] \left[\left(\frac{dx}{d\nu}\right)^2 + \left(\frac{dy}{d\nu}\right)^2 + \left(\frac{dz}{d\nu}\right)^2\right] - \left(\frac{dx}{d\mu} \frac{dx}{d\nu} + \frac{dy}{d\mu} \frac{dy}{d\nu} + \frac{dz}{d\mu} \frac{dz}{d\nu}\right)^2} d\mu d\nu;$$

d'où, en effectuant quelques réductions qui se présentent d'elles-mêmes,

$$(2) \quad d\sigma_1 = \sqrt{\left(\frac{dx}{d\mu} \frac{dy}{d\nu} - \frac{dy}{d\mu} \frac{dx}{d\nu}\right)^2 + \left(\frac{dy}{d\mu} \frac{dz}{d\nu} - \frac{dz}{d\mu} \frac{dy}{d\nu}\right)^2 + \left(\frac{dz}{d\mu} \frac{dx}{d\nu} - \frac{dx}{d\mu} \frac{dz}{d\nu}\right)^2} d\mu d\nu.$$

Désignons maintenant par  $X_1, Y_1, Z_1$  les cosinus des angles que fait avec les trois axes  $(x, y, z)$  la normale à la surface  $\lambda = \text{const.}$  au point N. Ces trois cosinus seront déterminés par les trois équations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} X_1 \frac{dx}{d\mu} + Y_1 \frac{dy}{d\mu} + Z_1 \frac{dz}{d\mu} = 0, \\ X_1 \frac{dx}{d\nu} + Y_1 \frac{dy}{d\nu} + Z_1 \frac{dz}{d\nu} = 0, \\ X_1^2 + Y_1^2 + Z_1^2 = 1. \end{array} \right.$$

Il résulte des deux premières équations que  $X_1, Y_1, Z_1$  sont respectivement proportionnels aux binômes

$$\frac{dy}{d\mu} \frac{dz}{d\nu} - \frac{dz}{d\mu} \frac{dy}{d\nu}, \quad \frac{dz}{d\mu} \frac{dx}{d\nu} - \frac{dx}{d\mu} \frac{dz}{d\nu}, \quad \frac{dx}{d\mu} \frac{dy}{d\nu} - \frac{dy}{d\mu} \frac{dx}{d\nu}.$$

On aura donc, en ayant égard à la valeur de  $d\sigma_1$ ,

$$X_1 = \frac{\frac{dy}{d\mu} \frac{dz}{d\nu} - \frac{dz}{d\mu} \frac{dy}{d\nu}}{d\sigma_1} d\mu d\nu, \quad Y_1 = \dots, \quad Z_1 = \dots$$

Il est à peine nécessaire de faire remarquer que les cosinus  $X_1, Y_1, Z_1$  mesurent respectivement l'inclinaison de l'une des faces du parallépipède sur chacun des trois plans coordonnés du système  $(x, y, z)$ . L'aire  $d\sigma_1$  s'obtient, comme on pouvait s'y attendre, en réunissant les trois projections de cette aire sur les plans coordonnés, de la même manière que l'une des diagonales d'un parallépipède rectangle se déduit des trois côtés du parallépipède.

L'angle  $L$ , que l'élément linéaire  $ds_1$  forme avec la normale à la surface  $\lambda = \text{const.}$ , est donné par l'équation

$$\cos L = \frac{X_1 \frac{dx}{d\lambda} + Y_1 \frac{dy}{d\lambda} + Z_1 \frac{dz}{d\lambda}}{ds_1} d\lambda.$$

Désignons par  $A, B, C$  les inclinaisons mutuelles des trois faces adjacentes au sommet N; nous aurons

$$\cos A = X_2 X_3 + Y_2 Y_3 + Z_2 Z_3.$$

Si l'on remplace  $X_2, X_3, \dots$  par leurs valeurs, on trouvera sans peine, toutes réductions faites, l'équation suivante

$$\cos A = \frac{ds_1^2 ds_2 ds_3}{d\sigma_2 d\sigma_3} (\cos \beta \cos \gamma - \cos \alpha) = \frac{\cos \beta \cos \gamma - \cos \alpha}{\sin \beta \sin \gamma},$$

formule identique (sauf la substitution de  $\pi - A$  à  $A$ ) à celle qui lie, dans un triangle sphérique, l'un des trois angles aux trois côtés du triangle. Par un simple changement de lettres, on déduirait de là  $\cos B$  et  $\cos C$ .

Il est facile de voir que les trois cosinus des angles  $\alpha, \beta, \gamma$  et les trois cosinus des angles  $A, B, C$  s'évanouissent simultanément; il en résulte que si les éléments linéaires du parallépipède infinitésimal se rencontrent orthogonalement, il en est nécessairement de même des éléments superficiels, et réciproquement.

5. *Éléments de volume.* — En donnant à ce parallépipède  $d\sigma_1$  pour base, et, par suite,  $ds_1 \cos L$  pour hauteur, le volume  $dU$  du solide élémentaire s'exprimera ainsi qu'il suit :

$$dU = d\sigma_1 ds_1 \cos L.$$

On déduit de là

$$(3) \quad dU = \left[ \frac{dx}{d\lambda} \left( \frac{dy}{d\mu} \frac{dz}{d\nu} - \frac{dz}{d\mu} \frac{dy}{d\nu} \right) + \frac{dy}{d\lambda} \left( \frac{dz}{d\mu} \frac{dx}{d\nu} - \frac{dx}{d\mu} \frac{dz}{d\nu} \right) + \frac{dz}{d\lambda} \left( \frac{dx}{d\mu} \frac{dy}{d\nu} - \frac{dy}{d\mu} \frac{dx}{d\nu} \right) \right] d\lambda d\mu d\nu.$$

Le coefficient différentiel qui multiplie  $d\lambda d\mu d\nu$  n'est autre chose que le déterminant  $D$  des neuf quantités  $\frac{dx}{d\lambda}, \frac{dx}{d\mu}, \frac{dx}{d\nu}, \frac{dy}{d\lambda}, \frac{dy}{d\mu}, \dots$ ; de sorte que l'élément de volume  $dU$  ne s'éva-

nouit que lorsque le système  $(\lambda, \mu, \nu)$  cesse de remplir l'une des conditions nécessaires de l'unicursivité (n° 1).

Analytiquement, le volume  $dU$  se compose de la réunion de trois prismes, ayant respectivement pour base les projections de l'une quelconque des six faces, par exemple de la face  $\lambda = \text{const.}$  sur les trois plans coordonnés, et pour hauteur les variations que subissent les trois coordonnées  $(x, y, z)$  de l'un des sommets de cette face lorsqu'on attribue à  $\lambda$  une variation  $d\lambda$ .

Il peut arriver que deux des trois équations (1) ne renferment que deux des trois variables  $(\lambda, \mu, \nu)$ ,  $\mu$  et  $\nu$  par exemple; la valeur de  $dU$  devient alors, si  $z$  dépend seul des trois variables,

$$dU = \frac{dz}{d\lambda} \left( \frac{dx}{d\mu} \frac{dy}{d\nu} - \frac{dy}{d\mu} \frac{dx}{d\nu} \right) d\lambda d\mu d\nu.$$

Il est facile de déduire de cette équation l'expression de l'élément superficiel  $d\sigma_1$ . Projétons, en effet, cet élément sur le plan  $xy$ ; nous obtiendrons ainsi un prisme que les surfaces  $\lambda = \text{const.}$  décomposeront en une infinité d'éléments de volume; chaque élément  $dU$  devra évidemment satisfaire à l'équation ci-dessus; mais, d'autre part, si l'on introduit l'angle que l'élément  $d\sigma_1$  fait avec plan  $xy$ ,  $dU$  est mesuré par l'expression  $d\sigma_1 \cdot Z_1 \frac{dz}{d\lambda} d\lambda$ ; l'identité nécessaire des deux valeurs de  $dU$  permet d'obtenir  $d\sigma_1$ , en ayant égard à la valeur de  $Z_1$  donnée dans le numéro précédent.

6. *Coordonnées planisphériques. Formules de transformation.* — Particularisons, dans une certaine mesure, le système  $(\lambda, \mu, \nu)$ , en supposant que  $\lambda$  désigne la distance à un point fixe choisi comme origine des coordonnées, et  $\mu$  l'orientation variable d'un plan susceptible de tourner autour d'un axe d'une direction arbitraire, passant par l'origine. Les surfaces  $\lambda = \text{const.}$  seront alors une série de sphères

concentriques, et les surfaces  $\mu = \text{const.}$ , une série de plans; l'intersection commune de ces plans ou l'axe du système passera par le centre commun de toutes les sphères. La variable  $\nu$  demeurant arbitraire, il existera une infinité de systèmes de coordonnées satisfaisant à ces conditions; nous les désignerons, dans leur ensemble, sous le nom de *systèmes planisphériques*.

Combiné avec une surface d'une série  $\nu = \text{const.}$ , tout système planisphérique fournit, par rapport à cette surface, un système de coordonnées à deux dimensions qui peut, dans certains cas, être d'une très-grande utilité. Les coordonnées polaires sur un plan sont évidemment une application particulière de cette méthode; il en est de même du système des longitudes et des latitudes sur la sphère, en ce sens que les surfaces  $\lambda = \text{const.}$  tracent des parallèles à latitude constante;  $\lambda$  est donc une fonction de la latitude seule et du rayon de la sphère.

Faisons coïncider l'axe  $Mz$  du système  $(x, y, z)$  avec l'intersection commune des plans  $\mu = \text{const.}$ , et introduisons, à titre de variable auxiliaire, la distance  $G$  d'un point de l'espace à l'axe  $Mz$ . Nous aurons, quelle que soit la définition de la troisième variable  $\nu$ ,

$$x = G \cos \mu, \quad y = G \sin \mu, \quad G^2 = \lambda^2 - z^2,$$

en admettant que le plan  $\mu = 0$  se confonde avec le plan  $xz$ . Par rapport à l'une des surfaces de la série  $\nu = \text{const.}$ , ces trois équations, combinées avec l'équation de la surface mise sous la forme  $z = f_3(\lambda, \mu, \nu)$ , pourront être considérées comme les formules de transformation servant à passer du système à deux dimensions  $(\lambda, \mu)$  au système habituel  $(x, y)$ , et réciproquement.

Ces formules permettent d'exprimer comme il suit les neuf paramètres différentiels  $\frac{dx}{d\lambda}, \frac{dx}{d\mu}, \frac{dx}{d\nu}, \frac{dy}{d\lambda}, \dots, \frac{dG}{d\nu}$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dx}{d\lambda} = \frac{dG}{d\lambda} \cos \mu, \quad \frac{dx}{d\mu} = \frac{dG}{d\mu} \cos \mu - G \sin \mu, \quad \frac{dx}{d\nu} = \frac{dG}{d\nu} \cos \mu, \\ \frac{dy}{d\lambda} = \frac{dG}{d\lambda} \sin \mu, \quad \frac{dy}{d\mu} = \frac{dG}{d\mu} \sin \mu + G \cos \mu, \quad \frac{dy}{d\nu} = \frac{dG}{d\nu} \sin \mu, \\ G \frac{dG}{d\lambda} = \lambda - z \frac{dz}{d\lambda}, \quad G \frac{dG}{d\mu} = -z \frac{dz}{d\mu}, \quad G \frac{dG}{d\nu} = -z \frac{dz}{d\nu}. \end{array} \right.$$

Il résulte de là que tous les éléments de la molécule N peuvent être ramenés à ne plus dépendre que des trois paramètres  $\frac{dz}{d\lambda}$ ,  $\frac{dz}{d\mu}$ ,  $\frac{dz}{d\nu}$ ; si l'on s'agit des éléments linéaires ou superficiels de la face  $\nu = \text{const.}$ , on n'a plus que des fonctions de  $\frac{dz}{d\lambda}$  et de  $\frac{dz}{d\mu}$ . Nous ne nous occuperons ici que de l'élément de volume  $dU$  et de l'élément superficiel  $d\sigma_s$ .

7. *Éléments de volume en coordonnées planisphériques.* — Si l'on remplace, dans la formule (5), les six paramètres  $\frac{dx}{d\lambda}$ ,  $\frac{dx}{d\mu}$ ,  $\frac{dx}{d\nu}$ ,  $\frac{dy}{d\lambda}$ ,  $\frac{dy}{d\mu}$ ,  $\frac{dz}{d\nu}$  par leurs valeurs en fonctions de  $\frac{dz}{d\lambda}$ ,  $\frac{dz}{d\mu}$ ,  $\frac{dz}{d\nu}$ , déduites des équations différentielles données dans le numéro précédent, on obtiendra

$$(4) \quad dU = \lambda \frac{dz}{d\nu} d\lambda d\mu d\nu.$$

Cette formule, remarquablement simple, peut s'établir à l'aide de considérations géométriques tout à fait élémentaires. Soient, en effet, N un point placé à une distance  $\lambda$  de l'origine M, Mz l'axe du système planisphérique,  $\mu$  l'orientation du plan zMN. Les trajectoires déterminées sur ce plan par les surfaces  $\lambda = \text{const.}$ ,  $\nu = \text{const.}$  forment une série de parallélogrammes élémentaires; l'aire  $d\sigma$  de l'un de ces parallélogrammes a évidemment pour mesure  $NN'd\lambda$ , si  $NN'$  est l'élément linéaire de la courbe  $\lambda = \text{const.}$  Soient, d'autre part, P et P' les projections des points N et N' sur l'axe Mz,

Q la projection du point N' sur la droite NP; on aura  $N'Q = PP' = \frac{dz}{d\nu} d\nu$ . Le parallépipède dont nous avons à rechercher le volume a pour base, dans le plan zMN, l'élément superficiel  $d\sigma$ , et sa hauteur est  $NPd\mu$ ; de là

$$dU = NN'.NP.d\lambda d\mu.$$

Mais les deux triangles NN'Q, MNP sont semblables, puisque leurs côtés sont perpendiculaires, et l'on a

$$NN' : MN :: N'Q : NP,$$

ce qui permet de déduire la formule (4) de l'équation précédente, par la substitution de  $MN.N'Q$  ou de  $\lambda \frac{dz}{d\nu} d\nu$  à  $NN'.NP$ .

La variable  $\nu$  est complètement arbitraire; si on la suppose indentique à  $z$ , ce qui revient à prendre pour la série des surfaces  $\nu = \text{const.}$  une série de plans perpendiculaires à l'axe Mz, on aura  $\frac{dz}{d\nu} d\nu = dz$ ; d'où il suit que l'élément de volume est donné, dans le système  $(\lambda, \mu, z)$ , par l'équation

$$dU = \lambda d\lambda d\mu dz.$$

Cette formule ne le cède en rien, quant à la simplicité, à celle qui convient aux coordonnées rectangulaires, savoir :

$$dU = dx dy dz.$$

8. *Éléments superficiels en coordonnées planisphériques.* — L'élément superficiel  $d\sigma_s$  est donné par l'équation

$$d\sigma_s = \sqrt{\left(\frac{dx dy}{d\lambda d\mu} - \frac{dy dx}{d\lambda d\mu}\right)^2 + \left(\frac{dy dz}{d\lambda d\mu} - \frac{dz dy}{d\lambda d\mu}\right)^2 + \left(\frac{dz dx}{d\lambda d\mu} - \frac{dx dz}{d\lambda d\mu}\right)^2} d\lambda d\mu.$$

L'élimination des paramètres  $\frac{dx}{d\lambda}$ ,  $\frac{dy}{d\lambda}$ ,  $\frac{dz}{d\lambda}$  peut s'effectuer sans aucune difficulté au moyen des équations différentielles du n° 6; on obtient ainsi, en supprimant un indice désormais inutile,

$$(5) \quad d\sigma = \lambda \sqrt{1 + \left(\frac{dz}{d\lambda}\right)^2 - 2\frac{z}{\lambda} \frac{dz}{d\lambda} + \frac{\left(\frac{dz}{d\mu}\right)^2}{\lambda^2 - z^2}} d\lambda d\mu.$$

9. *Éléments superficiels des surfaces de révolution; de la sphère; du plan.* — Considérons une surface de révolution dont l'axe coïncide avec  $Mz$ ; on aura, en chaque point,

$$\frac{dz}{d\mu} = 0,$$

équation qu'on peut regarder comme l'équation différentielle des surfaces de révolution dans le système  $(\lambda, \mu, z)$ , et qui, par l'intégration, donnerait, en introduisant une fonction arbitraire,

$$z = F(\lambda).$$

Par suite, l'élément  $d\sigma$  devient

$$d\sigma = \lambda \sqrt{1 + \left(\frac{dz}{d\lambda}\right)^2 - 2\frac{z}{\lambda} \frac{dz}{d\lambda}} d\lambda d\mu.$$

Il est facile d'établir synthétiquement cette formule. Soient, en effet,  $NN'$  un élément linéaire d'une section principale,  $G$  ou  $\sqrt{\lambda^2 - z^2}$  la distance du point  $N$  à l'axe  $Mz$ . L'élément  $NN'$  engendrera, en tournant autour de cet axe, un élément superficiel  $d\sigma$  dont la mesure est évidemment  $NN' \cdot G d\mu$ . Mais, en menant par les points  $N$  et  $N'$  deux droites  $NP$  et  $N'Q$ , l'une perpendiculaire, l'autre parallèle à  $Mz$ , on détermine un triangle rectangle  $NN'Q$  dans lequel

les côtés de l'angle droit ont respectivement pour valeurs  $\frac{dG}{d\lambda} d\lambda$  et  $\frac{dz}{d\lambda} d\lambda$ ; on a donc

$$NN' = \sqrt{\left(\frac{dG}{d\lambda}\right)^2 + \left(\frac{dz}{d\lambda}\right)^2} d\lambda,$$

et, par suite,

$$d\sigma = \sqrt{\left(G \frac{dG}{d\lambda}\right)^2 + \left(G \frac{dz}{d\lambda}\right)^2} d\lambda d\mu.$$

Il suffirait maintenant d'éliminer  $G$  et  $\frac{dG}{d\lambda}$  pour obtenir la formule donnée plus haut.

Supposons que la surface de révolution devienne une sphère et que l'origine  $M$  soit placée en un point de cette sphère. Si l'on abaisse  $NT$  perpendiculaire sur  $MN'$ , le triangle infinitésimal  $NN'T$  sera semblable au triangle  $MNP$  (les angles  $NN'T$  et  $NMP$  étant évidemment complémentaires) et l'on aura

$$NP : N'T :: MN : NN',$$

d'où

$$NN' = \frac{MN \cdot N'T}{NP} = \frac{\lambda d\lambda}{G},$$

et, par suite,

$$(6) \quad d\sigma = \lambda d\lambda d\mu.$$

C'est, en effet, à cette formule que se réduit l'expression générale de  $d\sigma$ , lorsqu'on tient compte de l'équation

$$z = \frac{\lambda^2}{D},$$

qui est, en coordonnées  $(\lambda, \mu, z)$ , celle d'une sphère de diamètre  $D$ .

On peut remarquer que l'élément  $d\sigma$  de la sphère est indépendant du diamètre. Si l'on suppose ce diamètre infini, la sphère se confond avec son plan tangent, et la for-

mule (6) n'en demeure pas moins applicable. On sait, en effet, que c'est ainsi que s'exprime, en coordonnées polaires, l'élément superficiel d'un plan.

L'équation (6) donne immédiatement la surface totale d'un cercle de diamètre  $D$  et celle d'une sphère de même diamètre; on a, en effet, dans le premier cas,

$$S = \int_0^{\frac{D}{2}} \int_0^{2\pi} \lambda d\lambda d\mu = \frac{\pi D^2}{4},$$

et dans le second

$$S' = \int_0^D \int_0^{2\pi} \lambda d\lambda d\mu = \pi D^2.$$

10. *Élément superficiel de la sphère en coordonnées planisphériques obliques.* — Lorsque l'axe du système planisphérique passe par le centre d'une sphère donnée, les courbes  $\lambda = \text{const.}$   $\mu = \text{const.}$  constituent un système orthogonal de méridiens et de parallèles. Supposons maintenant que cet axe fasse avec la direction du diamètre un angle  $\theta$  différent de zéro; nous obtiendrons un système de coordonnées obliques. Il n'est pas sans intérêt de rechercher l'expression de  $d\sigma$  dans ce système.

Introduisons à titre de coordonnées auxiliaires deux systèmes  $(x, y, z)$   $(x, Y, Z)$  respectivement formés au moyen de l'axe  $MZ$ , de la normale  $Mz$ , de deux droites  $MY$ ,  $My$  perpendiculaires, l'une à  $MZ$ , l'autre à  $Mz$  et toutes deux situées dans le plan  $MZz$ , et enfin d'une droite  $Mx$  perpendiculaire à ce plan et servant d'axe des  $x$  commun aux deux systèmes. On passera de l'un à l'autre au moyen des équations

$$y = Y \cos \theta - Z \sin \theta, \quad z = Y \sin \theta + Z \cos \theta.$$

L'équation de la sphère, en coordonnées  $(\lambda, \mu, z)$ , est

$$z = \frac{\lambda^2}{D}.$$

D'autre part, en introduisant la variable auxiliaire  $G$ , projection de la distance  $\lambda$  sur le plan  $xY$ , on a

$$x = G \cos \mu, \quad Y = G \sin \mu, \quad G^2 = \lambda^2 - Z^2.$$

Il suffirait, pour obtenir l'équation de la sphère en coordonnées  $(\lambda, \mu, Z)$ , d'éliminer, entre ces six équations, les cinq variables  $x, y, z, Y, G$ . Mais il est préférable de recourir aux systèmes  $(x, y, z)$   $(\lambda, \mu, z)$  et d'employer la formule générale du n° 8, en y faisant  $\frac{dz}{d\mu} = 0$ , ce qui donne

$$d\sigma = \sqrt{\left(\frac{dx}{d\lambda} \frac{dy}{d\mu} - \frac{dy}{d\lambda} \frac{dx}{d\mu}\right)^2 + \left(\frac{dz}{d\lambda}\right)^2 \left[\left(\frac{dx}{d\mu}\right)^2 + \left(\frac{dy}{d\mu}\right)^2\right]} d\lambda d\mu.$$

Il faut maintenant, à l'aide des équations posées plus haut, exprimer  $x$  et  $y$  en fonctions de  $\lambda$  et de  $\mu$ . En éliminant  $Z$  et  $G$ , on obtient tout d'abord

$$(7) \quad y \cos \theta + z \sin \theta = Y, \quad x \sin \mu - Y \cos \mu = 0, \\ \lambda^2 = x^2 + y^2 + z^2.$$

On a ensuite, en éliminant  $Y$  et  $z$ ,

$$\left\{ \begin{aligned} x \sin \mu - y \cos \theta \cos \mu &= \frac{\lambda^2}{D} \sin \theta \cos \mu \\ x^2 + y^2 &= \lambda^2 - \frac{\lambda^4}{D^2} \end{aligned} \right.$$

De ces équations on déduit sans difficulté les paramètres différentiels  $\frac{dx}{d\lambda}, \frac{dx}{d\mu}, \frac{dy}{d\lambda}, \frac{dy}{d\mu}$ ; on a, d'autre part,  $\frac{dz}{d\lambda} = \frac{2\lambda}{D}$ ; de là, toutes réductions faites, l'expression suivante de  $d\sigma$ ,

$$d\sigma = \left[ \cos \theta + \frac{\lambda \sin \theta \sin \mu}{D \sqrt{1 - \sin^2 \theta \cos^2 \mu - \frac{\lambda^2}{D^2}}} \right] \frac{\lambda d\lambda d\mu}{1 - \sin^2 \theta \cos^2 \mu}.$$

Cette formule donne, lorsque  $\theta$  s'évanouit,  $d\sigma = \lambda d\lambda d\mu$ ;  
pour  $\theta = \frac{\pi}{2}$ , on a

$$d\sigma = \frac{\lambda^2 d\lambda d\mu}{D \sin^2 \mu \sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{D^2 \sin^2 \mu}}}.$$

L'emploi des formules précédentes comporte certaines restrictions; en effet, s'il arrive, par la nature de la question à traiter, que l'on doive faire varier  $\lambda$  entre les limites 0 et D, afin d'embrasser la totalité de la sphère, l'angle  $\mu$  (si  $\theta$  n'est pas nul) devra, pour que  $d\sigma$  ne devienne pas imaginaire, varier entre des limites qui dépendront à la fois de  $\lambda$  et de  $\theta$ ; or, pour chacune des valeurs extrêmes de l'angle  $\mu$ ,  $d\sigma$  sera infini, et cette circonstance peut, dans certains cas, mettre en défaut les équations du problème.

11. *Élément superficiel du cylindre en coordonnées planisphériques.* — 1° Considérons un cylindre de rayon  $a$ , et supposons d'abord que l'axe  $Mz$  du système planisphérique coïncide avec la normale. L'équation du cylindre en coordonnées  $(x, y, z)$ , en prenant pour plan des  $xz$  la section normale qui contient  $Mz$ , est

$$z^2 - 2az + x^2 = 0;$$

on en déduit, en remplaçant  $x$  par  $\sqrt{\lambda^2 - z^2} \cos \mu$ ,

$$z^2 \sin^2 \mu - 2az + \lambda^2 \cos^2 \mu = 0.$$

De là

$$\frac{dz}{d\lambda} = \frac{\lambda \cos^2 \mu}{a - z \sin^2 \mu}, \quad \frac{dz}{d\mu} = -\frac{(\lambda^2 - z^2) \sin \mu \cos \mu}{a - z \sin^2 \mu}.$$

Au moyen de ces valeurs, l'équation (5) devient

$$d\sigma = \frac{a\lambda d\lambda d\mu}{a - z \sin^2 \mu}$$

D'autre part, l'équation de la surface donne

$$z = a \frac{1 - \sqrt{1 - \frac{\lambda^2 \sin^2 \mu \cos^2 \mu}{a^2}}}{\sin^2 \mu}.$$

on a donc, en définitive,

$$d\sigma = \frac{\lambda d\lambda d\mu}{\sqrt{1 - \frac{\lambda^2 \sin^2 \mu \cos^2 \mu}{a^2}}}.$$

2° Faisons maintenant coïncider l'axe  $Mz$  du système planisphérique avec l'une des arêtes du cylindre. En prenant pour axe des  $y$  la normale  $My$ , l'équation du cylindre sera

$$y^2 - 2ay + x^2 = 0.$$

Si l'on remplace, dans cette équation,  $x$  par  $\sqrt{\lambda^2 - z^2} \cos \mu$  et  $y$  par  $\sqrt{\lambda^2 - z^2} \sin \mu$ , on aura

$$\lambda^2 - z^2 = 2a \sqrt{\lambda^2 - z^2} \sin \mu,$$

d'où, en supprimant le facteur  $\sqrt{\lambda^2 - z^2}$  commun aux deux membres et élevant ensuite au carré

$$\lambda^2 - z^2 = 4a^2 \sin^2 \mu.$$

De là on tire

$$\frac{dz}{d\lambda} = \frac{\lambda}{z}, \quad \frac{dz}{d\mu} = -\frac{4a^2 \sin \mu \cos \mu}{z};$$

par suite, l'équation (5) deviendra

$$d\sigma = \frac{2a\lambda d\lambda d\mu}{z}.$$

Cette formule peut s'obtenir presque sans calcul en observant que l'élément superficiel  $d\sigma$  a pour projection sur le plan  $xy$  un élément linéaire dont la mesure est  $2ad\mu$ ; donc  $d\sigma = 2a \frac{dz}{d\lambda} d\lambda d\mu$ ; il est clair, d'ailleurs, que  $\lambda^2 - z^2$

ne dépend que de  $\mu$ , et nullement de  $\lambda$ ; on a donc  $z \frac{dz}{d\lambda} = \lambda$ ; d'où la valeur de  $d\sigma$ . En éliminant  $z$ , on aura

$$d\sigma = \frac{2a d\lambda d\mu}{\sqrt{1 - \frac{4a^2 \sin^2 \mu}{\lambda^2}}}$$

3° Supposons enfin que l'axe MZ du système fasse avec la normale à l'origine un angle  $\theta$  différent de 0 et de  $\frac{\pi}{2}$ . Nous nous servirons encore ici des systèmes auxiliaires  $(x, y, z)$   $(x, Y, Z)$  définis dans le numéro précédent et des formules de transformation (7), qu'on peut, en éliminant Y, écrire ainsi :

$$\begin{cases} x \sin \mu = y \cos \theta \cos \mu + z \sin \theta \cos \mu, \\ x^2 + y^2 + z^2 = \lambda^2. \end{cases}$$

En combinant ces équations avec l'équation de la surface en coordonnées  $(x, y, z)$  on obtiendra les paramètres différentiels  $\frac{dx}{d\lambda}, \frac{dx}{d\mu}, \frac{dy}{d\lambda}, \frac{dy}{d\mu}, \frac{dz}{d\lambda}, \frac{dz}{d\mu}$ ; la formule fondamentale du n° 8 fournira ensuite l'expression suivante de  $d\sigma$

$$d\sigma = \frac{ax\lambda d\lambda d\mu}{y(a-z)\sin\mu\cos\mu + (a\cos\theta - y\sin\theta)\cos^2\mu}$$

Dans cette équation,  $x, y, z$  sont des fonctions de  $\lambda$  et de  $\mu$  qu'il serait aisé de déterminer au moyen de l'équation de la surface et des formules de transformation données plus haut. Il suffit, du reste, de faire alternativement  $\theta = 0$  et  $\theta = \frac{\pi}{2}$  pour retrouver les deux formules qu'on a obtenues tout à l'heure en traitant directement ces deux cas particuliers.

12. *Équation d'une surface en coordonnées planisphériques.* — L'équation d'une surface, en coordonnées  $(x, y, z)$ ,

l'origine étant sur la surface même, peut généralement s'écrire ainsi :

$$z = \frac{dz}{dx} x + \frac{dz}{dy} y + \frac{d^2z}{dx^2} \frac{x^2}{2} + \frac{d^2z}{dx dy} xy + \frac{d^2z}{dy^2} \frac{y^2}{2} + \frac{d^3z}{dx^3} \frac{x^3}{6} + \frac{d^3z}{dx^2 dy} \frac{x^2 y}{2} + \frac{d^3z}{dx dy^2} \frac{xy^2}{2} + \frac{d^3z}{dy^3} \frac{y^3}{6} + \Omega,$$

$\Omega$  ne renfermant que des termes d'ordre supérieur au troisième. Les constantes  $\frac{dz}{dx} \dots$  peuvent s'évanouir; nous admettons qu'aucune n'est infinie; dans ce cas, la surface est *continue* autour de l'origine, et possède un plan tangent ayant pour équation

$$z = \frac{dz}{dx} x + \frac{dz}{dy} y.$$

Si l'on fait coïncider l'axe Mz avec la normale à ce plan, et si, de plus, on oriente les deux autres axes de manière à faire disparaître le rectangle  $xy$ , l'équation de la surface, abstraction faite des termes du quatrième ordre ou d'un ordre supérieur, prendra cette forme :

$$z = \frac{x^2}{2A} + \frac{y^2}{2B} + \frac{1}{6} (Cx^3 + 3Dx^2y + 3Exy^2 + Fy^3).$$

On passera du système  $(x, y, z)$  au système  $(\lambda, \mu, z)$  au moyen des formules du n° 6, et l'on obtiendra ainsi

$$(8) \quad z = \frac{\lambda^2}{2\gamma} + \zeta\lambda^3,$$

en posant

$$\frac{1}{\gamma} = \frac{\cos^2\mu}{A} + \frac{\sin^2\mu}{B}$$

$$\zeta = \frac{1}{6} (G \cos^3\mu + 3D \cos^2\mu \sin\mu + 3E \cos\mu \sin^2\mu + F \sin^3\mu).$$

La section normale dont l'orientation est  $\mu$  a pour rayon de courbure  $\gamma$ . Lorsque les constantes A et B sont l'une et l'autre positives,  $\gamma$  est toujours positif et compris entre A

et B; si A et B ont des signes contraires, ces deux constantes expriment, en grandeur absolue, les deux valeurs *maxima* que  $\gamma$  puisse prendre. C'est en raison de ces propriétés que les paramètres A et B sont appelés les rayons de courbure *principaux* de la surface; et c'est pour les mêmes motifs qu'on désigne sous le nom de *lignes de courbure* les lignes dont la courbure, comparée à celle des autres sections normales est, en chaque point, un *maximum* ou un *minimum*.

Recherchons maintenant la signification géométrique de la fonction  $\zeta$ .

On sait que les rayons de courbure principaux sont liés aux paramètres  $\frac{dz}{dx}$ ,  $\frac{dz}{dy}$  ..... par une équation du second degré qui équivaut aux deux équations suivantes :

$$\frac{1}{A} + \frac{1}{B} = \frac{\left[1 + \left(\frac{dz}{dy}\right)^2\right] \frac{d^2z}{dx^2} - 2 \frac{dz}{dx} \frac{dz}{dy} \frac{d^2z}{dx dy} + \left[1 + \left(\frac{dz}{dx}\right)^2\right] \frac{d^2z}{dy^2}}{\left[1 + \left(\frac{dz}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dy}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}}$$

$$\frac{1}{AB} = \frac{\frac{d^2z}{dx^2} \frac{d^2z}{dy^2} - \left(\frac{d^2z}{dx dy}\right)^2}{\left[1 + \left(\frac{dz}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dy}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}}$$

En différentiant chacune de ces équations par rapport à  $x$ , et en faisant ensuite évanouir  $\frac{dz}{dx}$ ,  $\frac{dz}{dy}$  et  $\frac{d^2z}{dx dy}$  afin de rentrer dans le système de coordonnées déterminé par les lignes de courbure et la normale, on aura

$$\frac{d \frac{1}{A}}{dx} + \frac{d \frac{1}{B}}{dx} = C + E$$

$$\frac{1}{B} \frac{d \frac{1}{A}}{dx} + \frac{1}{A} \frac{d \frac{1}{B}}{dx} = \frac{C}{B} + \frac{E}{A}$$

De ces équations on déduit, lorsque A est différent de B,

$$C = \frac{d \frac{1}{A}}{dx}, \quad E = \frac{d \frac{1}{B}}{dx}.$$

On verrait de même que l'on a, toujours dans l'hypothèse  $B \geq A$ ,

$$D = \frac{d \frac{1}{A}}{dy}, \quad F = \frac{d \frac{1}{B}}{dy};$$

de là :

$$\zeta = \frac{1}{6} \left( \frac{d \frac{1}{A}}{dx} \cos^3 \mu + 3 \frac{d \frac{1}{A}}{dy} \cos^2 \mu \sin \mu + 3 \frac{d \frac{1}{B}}{dx} \cos \mu \sin^2 \mu + \frac{d \frac{1}{B}}{dy} \sin^3 \mu \right).$$

Sur la sphère,  $\zeta$  s'évanouit en même temps que les para-

mètres différentiels  $\frac{d \frac{1}{A}}{dx}$ ,  $\frac{d \frac{1}{B}}{dx}$ ,  $\frac{d \frac{1}{A}}{dy}$ ,  $\frac{d \frac{1}{B}}{dy}$ , quelle que soit l'orientation des sections normales  $Mx$ ,  $My$ . D'autre part, la sphère est, comme on sait, la seule surface parmi celles dont l'aire n'est pas nulle, pour laquelle, en chaque point, les rayons de courbure des diverses sections normales soient identiques. Il résulte de là que l'équation (8) est applicable à une surface continue quelconque, et qu'elle ne peut être en défaut que pour les *ombilics*, lorsqu'il en existe sur une surface, c'est-à-dire pour les points singuliers où les rayons de courbure principaux deviennent identiques.

13. *Élément superficiel d'une surface quelconque en coordonnées planisphériques.* — Reprenons l'équation

$$d\sigma = \lambda \sqrt{1 + \left(\frac{dz}{d\lambda}\right)^2 - 2 \frac{z}{\lambda} \frac{dz}{d\lambda} + \frac{\left(\frac{dz}{d\mu}\right)^2}{\lambda^2 - z^2}} d\lambda d\mu.$$

L'équation (8) nous donne, en négligeant les quantités du troisième ordre,

$$\frac{dz}{d\lambda} = \frac{\lambda}{\gamma}, \quad \frac{dz}{d\mu} = \frac{\lambda^2}{2} \frac{d\frac{1}{\gamma}}{d\mu},$$

et, par suite,

$$d\sigma = \lambda \left[ 1 + \frac{\lambda^2}{8} \left( \frac{d\frac{1}{\gamma}}{d\mu} \right)^2 \right] d\lambda d\mu.$$

Faisons subir maintenant à  $z$  une variation  $dz = \zeta \lambda^3$ ; il en résultera pour  $\frac{dz}{d\lambda}$  et  $\frac{dz}{d\mu}$ , les variations suivantes :

$$\delta \frac{dz}{d\lambda} = 3\zeta \lambda^2; \quad \delta \frac{dz}{d\mu} = \lambda^3 \frac{d\zeta}{d\mu}$$

et l'on aura, en tenant compte seulement des termes de l'ordre le moins élevé,

$$\delta d\sigma = \lambda \left( \frac{dz}{d\lambda} 3\zeta \lambda^2 - \frac{z}{\lambda} 3\zeta \lambda^2 - \frac{dz}{d\lambda} \zeta \lambda^2 + \frac{dz}{d\mu} \lambda \frac{d\zeta}{d\mu} \right) d\lambda d\mu;$$

d'où l'expression suivante, exacte jusqu'aux quantités du quatrième ordre inclusivement,

$$(9) \quad d\sigma = \lambda \left[ 1 + \frac{\lambda^2}{8} \left( \frac{d\frac{1}{\gamma}}{d\mu} \right)^2 + \frac{\lambda^3}{2} \left( \frac{\zeta}{\gamma} + \frac{d\frac{1}{\gamma}}{d\mu} \frac{d\zeta}{d\mu} \right) \right] d\lambda d\mu.$$

#### 14. Éléments superficiels en coordonnées curvilignes.

**Théorème de Gauss.** — Imaginons qu'en un point M d'une surface on mène un plan normal, et qu'à partir de ce point on mesure, sur la section normale, un arc d'une longueur  $l$ . La variable  $l$ , combinée avec l'orientation  $\mu$  du plan normal, fournira, pour la surface dont il s'agit, un système de coordonnées à deux dimensions qu'on peut désigner sous

le nom de *curvilinaire*, puisqu'il n'est que l'extension aux surfaces courbes du système polaire propre au plan. Les latitudes et les longitudes sur la sphère rentrent évidemment dans ce système, quoique les latitudes soient comptées à partir de l'équateur.

Si l'on conçoit en M le système  $(x, y, z)$  déterminé par la normale et les lignes de courbure, l'élément linéaire  $dl$  sera donné par l'équation différentielle

$$\frac{dl}{d\lambda} = \sqrt{\left( \frac{dx}{d\lambda} \right)^2 + \left( \frac{dy}{d\lambda} \right)^2 + \left( \frac{dz}{d\lambda} \right)^2};$$

de là, en ayant égard aux formules de transformation du n° 6,

$$dl = \sqrt{\left( \frac{dG}{d\lambda} \right)^2 + \left( \frac{dz}{d\lambda} \right)^2} d\lambda = \sqrt{\frac{1 - 2 \frac{z}{\lambda} \frac{dz}{d\lambda} + \left( \frac{dz}{d\lambda} \right)^2}{1 - \left( \frac{z}{\lambda} \right)^2}} d\lambda.$$

Si l'on néglige les quantités du quatrième ordre, on aura, en vertu de l'équation (8),

$$dl = \sqrt{1 + \left( \frac{z}{\lambda} - \frac{dz}{d\lambda} \right)^2} d\lambda = \left( 1 + \frac{\lambda^2}{8\gamma^2} + \frac{\zeta \lambda^3}{\gamma} \right) d\lambda,$$

et en intégrant

$$l = \lambda + \frac{\lambda^3}{24\gamma^2} + \frac{\zeta \lambda^4}{4\gamma}.$$

Inversement, on a

$$\lambda = l - \frac{l^3}{24\gamma^2} - \frac{\zeta l^4}{4\gamma},$$

et, par suite,

$$G = \lambda \left( 1 - \frac{z^2}{2\lambda^2} \right) = \lambda - \frac{\lambda^3}{8\gamma^2} - \frac{\zeta \lambda^4}{2\gamma} = l - \frac{l^3}{6\gamma^2} - \frac{3\zeta l^4}{4\gamma}.$$

On pourra, d'après cela, passer du système curvipolaire  $(l, \mu)$  au système  $(x, y, z)$  au moyen des équations

$$x = G \cos \mu, \quad y = G \sin \mu, \quad z = \frac{l^2}{2\gamma} + \zeta l^3,$$

dans lesquelles  $G$  est une fonction de  $l$  et de  $\mu$ .

L'élément superficiel  $d\sigma$  se déduirait sans difficulté de la formule générale donnée au n° 8; mais il est plus simple de prendre pour point de départ l'équation (9) relative aux coordonnées planisphériques. Par l'élimination de  $\lambda$  et de  $d\lambda$ , cette formule devient

$$d\sigma = l \left[ 1 - \frac{l^2}{6\gamma^2} + \frac{l^2}{8} \left( \frac{d\frac{1}{\gamma}}{d\mu} \right)^2 + \frac{l^2}{4} \left( 2 \frac{d\frac{1}{\gamma}}{d\mu} \frac{d\zeta}{d\mu} - 3 \frac{\zeta}{\gamma} \right) \right] dld\mu.$$

Si l'on prend des arcs  $l$  égaux et très-petits sur chaque section normale, les points extrêmes de ces arcs déterminent sur la surface une courbe fermée dont l'aire  $S$  est donnée par l'équation

$$S = \int_0^l \int_0^{2\pi} \frac{d\sigma}{dld\mu} dld\mu.$$

Il est facile de voir que les termes qui dépendent de  $\zeta$  et de  $\frac{d\zeta}{d\mu}$  s'évanouissent et que l'on a

$$S = \pi l^2 - \frac{\pi l^4}{12AB}.$$

Cette équation, exacte jusqu'aux termes du cinquième ordre inclusivement, démontre un théorème très-remarquable dû à Gauss et qu'on peut énoncer ainsi : « Si une surface continue et inextensible vient à être déformée d'une manière arbitraire, le produit des rayons de courbure principaux en un point quelconque demeure invariable. » En effet, la surface étant, par hypothèse, inextensible, l'aire infini-

tésimale  $S$  ne peut changer, si  $l$  est assez petit pour qu'on puisse confondre la section normale  $\mu$  avec l'une des lignes géodésiques de la surface. Réciproquement, si le produit  $AB$  est identique en deux points  $M$  et  $M'$  de deux surfaces, et si une telle correspondance a lieu dans toute l'étendue de ces surfaces, on peut évidemment les considérer comme étant *applicables* l'une sur l'autre. C'est, comme on voit, une extension de la notion des surfaces *développables*, c'est-à-dire applicables sur un plan.

15. *Surfaces d'égal attraction.* — Il existe, dans la nature, un très-grand nombre de forces dont l'intensité ne dépend que de la distance des points matériels entre lesquels elles s'exercent. Telle est la gravitation universelle, et telles paraissent être aussi les attractions moléculaires. On peut, à ce point de vue, désigner sous le nom de *surfaces d'égal attraction* les sphères concentriques dont l'équation commune est  $\lambda = \text{const.}$ ; l'attraction qu'un élément superficiel de l'une de ces sphères exerce sur le centre, ou subit réciproquement de la part de celui-ci, est indépendante de la position particulière que l'élément occupe sur la surface.

Dans l'étude des questions qui se rattachent aux actions moléculaires, les surfaces d'égal attraction jouent un rôle analogue à celui des surfaces isothermes dans la théorie de la chaleur. Dans l'un et l'autre cas, il est, pour ainsi dire, indispensable d'introduire, comme variable indépendante, l'intensité  $i$  de la force dont on veut apprécier les effets, ou mieux un paramètre dont cette force dépende, suivant une loi connue ou inconnue; ce qui permet de découper l'espace en une infinité d'éléments au moyen de trois séries de surfaces choisies de telle manière que, sur toute l'étendue des surfaces appartenant à l'une des trois séries, l'intensité demeure invariable.

16. *Lignes d'égal attraction; sur le plan; sur la sphère; sur le cylindre.* — Lorsqu'une série de surfaces d'égal at-

traction rencontre une surface donnée, elle y détermine une série de *lignes d'égale attraction*.

Sur le plan et sur la sphère, les lignes d'égale attraction consistent en une infinité de cercles ayant, dans le premier cas, pour centre commun, dans le second cas, pour pôle commun la projection du point attractif sur la surface elle-même.

Supposons qu'il s'agisse d'un cylindre à base circulaire, et plaçons le point attractif M sur la circonférence de la base. Si la distance  $\lambda$  est extrêmement petite par rapport au diamètre D du cylindre, il est clair que la ligne  $\lambda = \text{const.}$  différera très-peu d'un cercle tracé dans le plan tangent; si, au contraire, le rapport  $\frac{\lambda}{D}$  devient extrêmement grand, cette ligne se confondra sensiblement avec un cercle parallèle à la base. Entre ces deux cas extrêmes, les lignes d'égale attraction présentent une série de formes intermédiaires; la plus remarquable de ces formes est celle qui correspond à la valeur particulière  $\lambda = D$ ; il est facile de voir que les équations de cette courbe en coordonnées  $(\lambda, \mu, z)$  sont, en prenant pour axe Mz, la normale au cylindre

$$\lambda = D, \quad z = D \cotang^2 \mu.$$

Les équations qui expriment, dans deux systèmes planisphériques différents, l'élément superficiel du cylindre (n° 11), peuvent, en y remplaçant  $2a$  par D, s'écrire ainsi :

$$d\sigma = \frac{\lambda d\lambda d\mu}{\sqrt{1 - \frac{4\lambda^2 \sin^2 \mu \cos^2 \mu}{D^2}}}, \quad d\sigma = \frac{D d\lambda d\mu}{\sqrt{1 - \frac{D^2 \sin^2 \mu}{\lambda^2}}}.$$

La première équation donne, pour  $d\sigma$ , des valeurs toujours réelles, quel que soit  $\mu$ , pourvu que  $\lambda$  soit compris entre 0 et D; il en est de même de la seconde, lorsque  $\lambda$  est su-

périeur à D. Ainsi, la ligne d'égale attraction  $\lambda = D$  sépare, sur le cylindre, deux régions distinctes; dans chacune de ces régions, l'une ou l'autre des formules ci-dessus peut être employée avec sécurité; l'angle  $\mu$  doit d'ailleurs, si l'on veut embrasser successivement l'étendue de chaque région, varier entre les limites 0 et  $\pi$ .

17. *Attraction d'une portion de surface sur un élément de cette surface. Cas général.* — Sans aborder encore les phénomènes capillaires proprement dits, nous demanderons aux formules qui viennent d'être établies la solution de quelques questions d'un ordre plus général, où nous introduirons des forces attractives d'une nature quelconque, variables avec la distance suivant une loi arbitraire. Ces forces pourraient d'ailleurs être répulsives sans qu'il en résultât aucun changement analytique essentiel.

S'il s'agit de forces purement superficielles, c'est-à-dire échangées entre des éléments appartenant à des surfaces considérées comme des solides dont une dimension est censée s'évanouir, l'action exercée par un élément  $d\sigma_1$  sur un élément  $d\sigma_2$  s'exprimera par une fonction  $\Pi(\lambda) d\sigma_1 d\sigma_2$ . S'il s'agit de forces échangées entre des éléments de volume, l'action d'un élément  $dU_1$  sur un élément  $dU_2$  sera  $F(\lambda) dU_1 dU_2$ . Nous laissons de côté les actions qui n'intéresseraient que des éléments linéaires (courants électriques, etc.).

Recherchons, en premier lieu, la résultante des attractions exercées par une portion de surface sur un élément M, en limitant cette portion de surface par une sphère d'un rayon  $\lambda_1$ , ayant le point M pour centre.

Si l'on attribue à l'élément M une étendue égale à l'unité, chaque élément superficiel  $d\sigma$  donnera lieu à une force  $\Pi(\lambda) d\sigma$ , qui pourra être décomposée en trois autres, parallèles aux trois directions Mx, My, Mz et ayant respectivement pour valeurs :  $\Pi(\lambda) \frac{x}{\lambda} d\sigma$ ,  $\Pi(\lambda) \frac{y}{\lambda} d\sigma$ ,  $\Pi(\lambda) \frac{z}{\lambda} d\sigma$ .

L'ensemble de ces forces produira trois composantes : l'une normale, les deux autres tangentielles à la surface et aux lignes de courbure, et ces trois composantes, en posant  $d\sigma = \omega d\lambda d\mu$ , s'exprimeront ainsi qu'il suit :

$$R = \int_0^{\lambda_1} \int_0^{2\pi} \Pi(\lambda) \frac{z}{\lambda} \omega d\lambda d\mu, \quad T_x = \int_0^{\lambda_1} \int_0^{2\pi} \Pi(\lambda) \frac{x}{\lambda} \omega d\lambda d\mu, \quad T_y = \dots$$

Afin d'obtenir tout d'abord des résultats indépendants de la nature de la surface, nous commencerons par supposer que  $\lambda_1$  est assez petit pour qu'il soit permis, dans l'équation de la surface en coordonnées  $(\lambda, \mu, z)$ , de négliger les termes du quatrième ordre. On aura ainsi

$$z = \frac{\lambda^2}{2\gamma} + \zeta\lambda^3, \quad x = \sqrt{\lambda^2 - z^2} \cos \mu = \lambda \left( 1 - \frac{\lambda^2}{8\gamma^2} - \frac{\zeta\lambda^3}{2\gamma} \right) \cos \mu.$$

On peut, dans le calcul de R, prendre  $\omega = \lambda$ ; car le second terme de  $\omega$  produirait des termes du même ordre que ceux qui résulteraient des termes du quatrième ordre que l'on néglige dans la valeur de  $z$ ; on obtiendra ainsi

$$R = \int_0^{\lambda_1} \int_0^{2\pi} \Pi(\lambda) \left( \frac{\lambda^2}{2\gamma} + \zeta\lambda^3 \right) d\lambda d\mu,$$

et en intégrant par rapport à  $\mu$ ,

$$R = \frac{\pi}{2} \left( \frac{1}{\Lambda} + \frac{1}{B} \right) \int_0^{\lambda_1} \Pi(\lambda) \lambda^2 d\lambda.$$

On a ensuite

$$T_x = \int_0^{\lambda_1} \int_0^{2\pi} \Pi(\lambda) \lambda \left( 1 - \frac{\lambda^2}{8\gamma^2} - \frac{\zeta\lambda^3}{2\gamma} \right) \left[ 1 + \frac{\lambda^2}{8} \left( \frac{d\frac{1}{\gamma}}{d\mu} \right)^2 + \frac{\lambda^3}{2} \left( \frac{\zeta}{\gamma} + \frac{d\frac{1}{\gamma} d\zeta}{d\mu d\mu} \right) \right] \cos \mu d\lambda d\mu.$$

Il est évident que les termes qui ne dépendent ni de  $\zeta$  ni de

$\frac{d\zeta}{d\mu}$  n'influent pas sur la valeur de  $T_x$ ; on aura donc

$$\begin{aligned} T_x &= \frac{1}{2} \int_0^{\lambda_1} \int_0^{2\pi} \Pi(\lambda) \lambda^4 \frac{d\frac{1}{\gamma} d\zeta}{d\mu d\mu} \cos \mu d\lambda d\mu = \\ &= \frac{1}{2} \left( \frac{1}{B} - \frac{1}{\Lambda} \right) \int_0^{\lambda_1} \Pi(\lambda) \lambda^4 d\lambda \int_0^{2\pi} \sin \mu \cos^2 \mu \\ &\quad \left[ \frac{d\frac{1}{\Lambda}}{dy} \cos^3 \mu - \frac{d\frac{1}{B}}{dx} \sin^3 \mu + \left( 2 \frac{d\frac{1}{B}}{dx} - \frac{d\frac{1}{\Lambda}}{dx} \right) \cos^2 \mu \sin \mu + \right. \\ &\quad \left. + \left( \frac{d\frac{1}{B}}{dy} - 2 \frac{d\frac{1}{\Lambda}}{dy} \right) \cos \mu \sin^2 \mu \right] d\mu. \end{aligned}$$

L'intégration par rapport à  $\mu$  ne fournit que deux termes, qui correspondent, le premier au facteur  $\cos^4 \mu \sin^2 \mu$ , le second, au facteur  $\sin^4 \mu \cos^2 \mu$ ; on a d'ailleurs

$$\int_0^{2\pi} \cos^4 \mu \sin^2 \mu d\mu = \int_0^{2\pi} \sin^4 \mu \cos^2 \mu d\mu = \frac{1}{8} \int_0^{2\pi} \sin^2 2\mu d\mu = \frac{\pi}{8}.$$

De là on déduit

$$T_x = \frac{\pi}{52} \frac{d \left( \frac{1}{B} - \frac{1}{\Lambda} \right)^2}{dx} \int_0^{\lambda_1} \Pi(\lambda) \lambda^4 d\lambda.$$

On obtiendrait de même

$$T_y = \frac{\pi}{52} \frac{d \left( \frac{1}{B} - \frac{1}{\Lambda} \right)^2}{dy} \int_0^{\lambda_1} \Pi(\lambda) \lambda^4 d\lambda.$$

18. *Cas de la sphère.* — Dans le cas de la sphère, les deux composantes tangentielles s'évanouissent, en vertu de la symétrie; la résultante R, dirigée suivant la normale, est donnée par la formule suivante

$$R = \int_0^{\lambda_1} \int_0^{2\pi} \Pi(\lambda) \frac{z}{\lambda} \lambda d\lambda d\mu.$$

Si D est le diamètre de la sphère, on obtiendra, en remplaçant z par  $\frac{\lambda^2}{D}$  et en intégrant ensuite par rapport à  $\mu$ ,

$$R = \frac{2\pi}{D} \int_0^{\lambda_1} \Pi(\lambda) \lambda^2 d\lambda.$$

19. *Cas du cylindre.* — S'il s'agit d'un cylindre de rayon a, l'ordonnée normale z sera donnée, en fonction de  $\lambda$  et de  $\mu$ , par l'équation

$$z = a \frac{1 - \sqrt{1 - \frac{\lambda^2 \sin^2 \mu \cos^2 \mu}{a^2}}}{\sin^2 \mu}.$$

La résultante est encore ici normale à la surface et s'exprime ainsi qu'il suit, en supposant  $\lambda_1 < 2a$ ,

$$R = a \int_0^{\lambda_1} \int_0^{2\pi} \frac{\Pi(\lambda)}{\sin^2 \mu} \frac{1 - \sqrt{1 - \frac{\lambda^2 \sin^2 \mu \cos^2 \mu}{a^2}}}{\sqrt{1 - \frac{\lambda^2 \sin^2 \mu \cos^2 \mu}{a^2}}} d\lambda d\mu.$$

Pour effectuer l'intégration par rapport à  $\mu$ , nous développerons tout d'abord, suivant les puissances croissantes de  $\lambda^2$ , la fonction

$$V = \frac{1}{\sin^2 \mu} \frac{1 - \sqrt{1 - \frac{\lambda^2 \sin^2 \mu \cos^2 \mu}{a^2}}}{\sqrt{1 - \frac{\lambda^2 \sin^2 \mu \cos^2 \mu}{a^2}}}$$

ce qui donne

$$V = \frac{1}{\sin^2 \mu} \left[ \left( 1 - \frac{\lambda^2 \sin^2 \mu \cos^2 \mu}{a^2} \right)^{-\frac{1}{2}} - 1 \right] = \sum_1^{\infty} \frac{1}{2} \frac{3}{2} \dots \frac{2n-1}{2} \frac{1}{1 \cdot 2 \dots n} \sin^{2n-2} \mu \cos^{2n} \mu \left( \frac{\lambda}{a} \right)^{2n}.$$

Nous abrègerons les notations en introduisant ici la fonction  $\Gamma(n)$ , qui généralement désigne l'intégrale eulérienne  $\int_0^{\infty} x^{n-1} e^{-x} dx$  et se réduit au produit  $1 \cdot 2 \cdot 3 \dots (n-1)$  lorsque n est entier et positif, et à l'unité lorsque  $n=1$ ; nous aurons ainsi

$$V = \sum_0^{\infty} \frac{\Gamma(2n+3)}{2^{2n+2} \Gamma^2(n+2)} \sin^{2n} \mu \cos^{2n+2} \mu \left( \frac{\lambda}{a} \right)^{2n+2}.$$

Cela posé, de la formule bien connue

$$2^{2n-1} \cos^{2n} \mu = \cos 2n\mu + \frac{2n}{1} \cos(2n-2)\mu + \frac{2n(2n-1)}{1 \cdot 2} \cos(2n-4)\mu + \dots + \frac{1}{2} \frac{2n(2n-1) \dots (n+1)}{1 \cdot 2 \dots n},$$

on déduit

$$\int_0^{2\pi} \cos^{2n} \mu d\mu = \frac{\pi}{2^{2n-1}} \frac{\Gamma(2n+1)}{\Gamma^2(n+1)},$$

et, par suite,

$$\int_0^{2\pi} \sin^{2n} \mu \cos^{2n+2} \mu d\mu = \int_0^{2\pi} \cos^{2n} \mu \sin^{2n+2} \mu d\mu = \frac{1}{2^{2n+1}} \int_0^{2\pi} \sin^{2n} \mu d\mu = \frac{\pi}{2^{2n}} \frac{\Gamma(2n+1)}{\Gamma^2(n+1)}.$$

En conséquence, la résultante R s'exprimera de la manière suivante

$$R = \pi \sum_0^{\infty} \frac{2n+1}{n+1} \frac{\Gamma^2(2n+1)}{\Gamma^2(n+1)} \frac{1}{2^{6n+1} a^{2n+1}} \int_0^{\lambda_1} \Pi(\lambda) \lambda^{2n+2} d\lambda.$$

20. *Action réciproque de deux portions d'une surface cylindrique séparées par un plan normal à l'axe.* — Considérons deux portions d'une surface cylindrique  $S_1$  et  $S_2$ , séparées par un plan P perpendiculaire à l'axe du cylindre, et supposons que les éléments de ces deux portions de surface s'attirent mutuellement. Si on limite les surfaces  $S_1$ ,

$S_2$  au moyen de deux plans parallèles au plan P, les actions attractives produiront deux résultantes  $R_1$  et  $R_2$  dirigées l'une et l'autre selon l'axe même du cylindre, que nous supposons vertical et invariablement lié aux surfaces  $S_1$ ,  $S_2$ . En raison de la symétrie, toute autre composante doit évidemment disparaître; les résultantes  $R_1$ ,  $R_2$  sont d'ailleurs identiques, au signe près, si l'on admet, comme nous le ferons, que les actions et les réactions soient constamment égales. Aucune de ces conclusions ne sera modifiée si l'on a affaire à deux surfaces cylindriques indéfinies quant à leur étendue de part et d'autre de leur base commune, pourvu que la distance  $\lambda_1$  à laquelle les actions attractives cessent de s'exercer soit définie; c'est ce dernier cas que nous allons soumettre à l'analyse.

Soient  $m$  et  $n$  les centres de deux éléments superficiels appartenant respectivement aux surfaces  $S_1$  et  $S_2$ , M et N les projections de ces points sur la ligne de contact ou de séparation des deux surfaces. Menons, dans le plan MmNn, Mm' et Nm' parallèle à mn. Concevons, d'autre part, au point M trois axes Mx, My, Mz; le premier, tangentiel à la ligne de contact; le second, vertical, et le troisième, normal aux deux autres et par suite aux surfaces  $S_1$  et  $S_2$ . L'action réciproque des éléments  $m$  et  $n$  donnera lieu à une composante verticale F dont la valeur peut s'exprimer ainsi qu'il suit

$$F = \Pi(\lambda) \frac{Y}{\lambda} d\sigma dx dy,$$

en désignant par  $(x, y)$  les coordonnées du point  $m$ , par  $\lambda$  la distance  $mn = Mm' = Nm'$ , par Y l'ordonnée  $Mm' = Nn'$  et par  $d\sigma$  l'étendue de l'un ou l'autre des éléments superficiels  $n, n'$ .

Si l'on donne aux points  $m$  et  $n$  toutes les positions possibles sur les lignes Mm', Nn', mais de telle manière que  $\lambda$  demeure invariable, on aura toujours une composante ver-

ticale identique. Une première intégration, par rapport à  $y$ , permet de réunir toutes ces composantes en une seule dont la valeur est

$$F_1 = \Pi(\lambda) \frac{Y^2}{\lambda} d\sigma dx.$$

Tous les éléments linéaires tels que  $dx$  donneraient lieu à une composante identique; de là, pour l'étendue entière  $\pi D$  de la ligne de contact un ensemble de forces qui s'ajoutent et produisent une résultante unique exprimée par l'équation

$$F_2 = \pi D \Pi(\lambda) \frac{Y^2}{\lambda} d\sigma.$$

Nous sommes ainsi ramené, après deux intégrations, au cas déjà traité de l'action d'une portion de surface sur un élément, avec cette seule différence qu'il faudrait attribuer aux divers éléments  $d\sigma$  une densité proportionnelle à leur distance Y à la ligne de contact. Supposons d'abord que le rayon d'activité  $\lambda_1$  des forces attractives soit tout au plus égal à D; nous aurons, en désignant par R le rapport  $\frac{R_1}{\pi D}$ , c'est-à-dire la résultante rapportée à l'unité linéaire, et en introduisant le système  $(\lambda, \mu, z)$ ,

$$R = \int_0^{\lambda_1} \int_0^{\pi} \Pi(\lambda) \frac{(\lambda^2 - z^2) \sin^2 \mu}{\sqrt{1 - \frac{4\lambda^2 \sin^2 \mu \cos^2 \mu}{D^2}}} d\lambda d\mu.$$

Cela posé, on a successivement

$$\begin{aligned} & \frac{(\lambda^2 - z^2) \sin^2 \mu}{\sqrt{1 - \frac{4\lambda^2 \sin^2 \mu \cos^2 \mu}{D^2}}} = \frac{\sin^2 \mu}{\sqrt{1 - \frac{4\lambda^2 \sin^2 \mu \cos^2 \mu}{D^2}}} \\ & \left[ \lambda^2 - \frac{D^2}{2\sin^4 \mu} \left( 1 - \frac{2\lambda^2 \sin^2 \mu \cos^2 \mu}{D^2} - \sqrt{1 - \frac{4\lambda^2 \sin^2 \mu \cos^2 \mu}{D^2}} \right) \right] = \\ & = \frac{D^2}{2\sin^2 \mu} \left( 1 - \frac{2\lambda^2 \sin^2 \mu}{D^2} - \sqrt{1 - \frac{4\lambda^2 \sin^2 \mu \cos^2 \mu}{D^2}} \right) = \\ & = \frac{D^2}{2\sin^2 \mu} \left\{ 1 - \left( 1 - \frac{2\lambda^2 \sin^2 \mu}{D^2} \right) \right. \\ & \quad \left. \left[ 1 + \sum_{\nu}^{\infty} \frac{\Gamma(2\nu + 3)}{\Gamma^2(\nu + 2)} \sin^{2\nu+2} \mu \cos^{2\nu+2} \mu \left( \frac{\lambda}{D} \right)^{2\nu+2} \right] \right\} = \\ & = \frac{D^2}{2\sin^2 \mu} \left[ \frac{2\lambda^2 \sin^2 \mu}{D^2} - \frac{2\lambda^2 \sin^2 \mu \cos^2 \mu}{D^2} - \right. \\ & \quad \left. - \sum_{\nu}^{\infty} \frac{\Gamma(2\nu + 3)}{\Gamma^2(\nu + 2)} \sin^{2\nu+2} \mu \cos^{2\nu+2} \mu \left( \frac{\lambda}{D} \right)^{2\nu+2} + \right. \\ & \quad \left. + 2 \sum_{\nu}^{\infty} \frac{\Gamma(2\nu + 1)}{\Gamma^2(\nu + 1)} \sin^{2\nu+2} \mu \cos^{2\nu} \mu \left( \frac{\lambda}{D} \right)^{2\nu+2} \right] = \\ & = \lambda^2 \sin^2 \mu + 2 \sum_{\nu}^{\infty} \frac{\Gamma(2\nu + 1)}{\Gamma^2(\nu + 1)} \left( 1 - \frac{2\nu + 1}{\nu + 1} \cos^2 \mu \right) \\ & \quad \sin^{2\nu+2} \mu \cos^{2\nu} \mu \left( \frac{\lambda}{D} \right)^{2\nu+2}. \end{aligned}$$

L'intégration par rapport à  $\mu$  peut maintenant s'effectuer sans difficulté; on obtient ainsi, après quelques réductions,

$$(10) \quad R = \frac{\pi}{2} \sum_0^{\infty} \frac{\Gamma^2(2n+1)}{(n+1)\Gamma^4(n+1)2^{2n}D^{2n}} \int_0^{\lambda_1} \Pi(\lambda) \lambda^{2n+2} d\lambda.$$

Si le diamètre  $D$  devient infini, le cylindre est remplacé par un plan. La résultante  $R$  se réduit alors à un seul terme, et l'on a

$$(11) \quad R = \frac{\pi}{2} \int_0^{\lambda_1} \Pi(\lambda) \lambda^2 d\lambda.$$

Supposons maintenant que le rayon d'attraction  $\lambda_1$  soit supérieur au diamètre  $D$ . Les éléments superficiels séparés par une distance inférieure ou tout au plus égale à  $D$  donneront lieu tout d'abord à une résultante dont la valeur se déduira de l'équation (10) en substituant  $D$  à  $\lambda_1$ . Quant aux autres éléments, si l'on introduit un système de coordonnées planisphériques ( $Y, \lambda, \mu$ ) dont l'axe  $Y$  coïncide avec l'arête du cylindre, les forces attractives qu'ils développent donneront lieu, pour chaque unité linéaire, à une résultante  $R'$  qui peut s'exprimer comme il suit, en ayant égard aux formules du n° 11 (§ 2),

$$R' = D \int_D^{\lambda_1} \int_0^{\pi} \Pi(\lambda) \sqrt{1 - \frac{D^2 \sin^2 \mu}{\lambda^2}} \lambda d\lambda d\mu.$$

En remplaçant, dans cette équation,  $\sqrt{1 - \frac{D^2 \sin^2 \mu}{\lambda^2}}$  par  $1 - \sum_{\nu}^{\infty} \frac{\Gamma(2\nu-1)}{n\Gamma^2(\nu)} \frac{\sin^{2\nu} \mu}{2^{2\nu-1}} \left( \frac{D}{\lambda} \right)^{2\nu}$  et intégrant, on aura

$$R' = -\pi D \sum_0^{\infty} \frac{\Gamma^2(2n+1)}{(2n-1)\Gamma^4(n+1)2^{2n}} \int_D^{\lambda_1} \frac{\Pi(\lambda)}{\lambda^{2n-1}} d\lambda.$$

En définitive, la question est ramenée à une série de quadratures qui dépendent uniquement de la loi d'attraction. Il n'est pas sans intérêt de rechercher à quels résultats on est conduit lorsqu'on suppose que cette loi est celle de la raison inverse du carré des distances, qui trouve un si grand nombre d'applications dans la nature, aussi bien pour les attractions réciproques des éléments de volume (ou des masses) que pour les actions attractives ou répulsives qui s'exercent entre des éléments linéaires (lois d'Ampère). Soit  $\Pi(\lambda) = \frac{i}{\lambda^2}$ ,  $i$  étant une constante arbitraire; l'équation qui donne la résultante  $R$  deviendra, si  $\lambda_1$  est  $< D$ ,

$$R = i \sum_0^{\infty} f_n \left( \frac{\lambda_1}{D} \right)^{2n},$$

en posant

$$f = \frac{\pi\lambda_1 i}{2}, \quad f_n = \frac{\Gamma^2(2n+1)}{(n+1)(2n+1)\Gamma^4(n+1)2^{4n}}.$$

Si  $\lambda_1$  est  $> D$ , on aura, en désignant par  $f_n$  le coefficient  $\frac{(n+1)(2n+1)}{n(2n-1)} f_n$ ,

$$R + R' = f \left\{ 1 + \sum_1^\infty f_n + \frac{2D}{\lambda_1} \log. \text{hyp.} \frac{\lambda_1}{D} - \frac{D}{\lambda_1} \sum_1^\infty f_n \left[ 1 - \left( \frac{D}{\lambda_1} \right)^{2n} \right] \right\}.$$

Les deux séries qui ont respectivement pour terme général  $f_n$  et  $f'_n$  sont l'une et l'autre convergentes. En effet, on a

$$(1-1)^{\frac{1}{2}} = 1 - \sum_1^\infty \frac{\Gamma(2n-1)}{n\Gamma^2(n)2^{2n-1}},$$

et, par suite,

$$\sum_1^\infty \frac{\Gamma(2n+1)}{(2n-1)\Gamma^2(n+1)2^{2n-1}} = 2.$$

Si l'on élève au carré chacun des termes de cette dernière série, on obtiendra une nouvelle série plus rapidement convergente, dont la sommation donnera un résultat inférieur à 2; or le terme général  $F_n$  de cette nouvelle série est lié à  $f_n$  et à  $f'_n$  par les équations suivantes

$$F_n = \frac{4(n+1)(2n+1)}{(2n-1)^2} f_n, \quad F'_n = \frac{4n}{2n-1} f'_n.$$

On a donc, lorsque  $n$  est égal ou supérieur à l'unité,

$$F_n > 2f_n, \quad F'_n > 2f'_n.$$

Par là on voit que  $\sum_1^\infty f_n$  et  $\sum_1^\infty f'_n$  sont deux quantités finies et nécessairement inférieures à l'unité.

Lorsque le rapport  $\frac{\lambda_1}{D}$  devient infini,  $R'$  est négligeable vis-à-vis de  $R$ , et l'on a simplement

$$R = f \sum_0^\infty f_n.$$

21. *Action réciproque de deux portions d'une surface cylindrique séparées par un plan parallèle à l'axe.* — Supposons maintenant que les deux portions d'une surface cylindrique dont on veut évaluer les attractions réciproques soient situées de part et d'autre d'un plan sécant  $P$  parallèle à l'axe du cylindre. Supposons, pour fixer les idées, que cet axe soit horizontal, et concevons, par un point  $M$  de l'une des arêtes, trois axes rectangulaires  $Mx$ ,  $My$ ,  $Mz$ , le premier, parallèle à l'axe du cylindre, le second, vertical; il suffira, pour que le troisième soit normal à la surface, de placer l'origine  $M$  dans le plan horizontal qui contient l'axe du cylindre. La position d'un point quelconque  $n$  du cylindre peut se définir, soit au moyen des coordonnées  $(x, y, z)$ , soit par l'abscisse  $x$  et l'arc  $MN = \varphi$  qui sépare de l'origine  $M$  la projection  $N$  du point  $n$  sur le plan  $Myz$ . Le point  $n$  peut être regardé comme le centre d'un élément superficiel dont l'étendue, en coordonnées  $(\varphi, x)$ , est  $ad\varphi dx$ . L'action de deux éléments analogues  $n$  et  $n'$  situés de part et d'autre du plan  $P$  produira trois composantes parallèles aux trois axes; la composante verticale est seule à considérer ici, à cause de la symétrie, qui annule en fin de compte l'ensemble des composantes horizontales, et cette composante verticale est donnée par l'équation

$$F = a^3 \Pi(\lambda) \frac{\sin \varphi - \sin \varphi'}{\lambda} d\varphi d\varphi' dx dx'.$$

Nous pouvons, puisque la position de l'origine est arbitraire, supposer que le plan  $Myz$  contienne le point  $n'$ ; par

suite, il est facile de voir que la distance  $nn'$  ou  $\lambda$  satisfait à l'équation

$$\lambda^2 = x^2 + 4a^2 \sin^2 \frac{\varphi - \varphi'}{2}.$$

Il résulte de là que, si  $\lambda$  et  $x$  sont constants, il en sera de même de  $\varphi - \varphi'$ . Donc si l'on pose

$$\varphi = u + v, \quad \varphi' = u - v,$$

on pourra tout d'abord considérer  $v$  comme constant, et l'on aura

$$d\varphi = d\varphi' = du,$$

$$F = 2a^3 \frac{\Pi(\lambda)}{\lambda} \sin v \cos u \, du \, d\varphi \, dx \, dx'.$$

Nous définirons la position de l'arête de contact au moyen de l'arc  $\theta$  qui s'étend entre le point où elle rencontre le plan  $Myz$  et l'origine  $M$ . Cela posé, deux intégrations successives, l'une par rapport à  $u$ , entre les limites  $\theta - v$  et  $\theta + v$  qui correspondent aux deux valeurs  $\varphi' = 0$ ,  $\varphi = \theta$ , l'autre, par rapport à  $x'$ , entre les limites 0 et 1, donneront une résultante partielle  $F_1$ , dont la valeur est

$$F_1 = 2a^3 \frac{\Pi(\lambda)}{\lambda} \sin v [\sin(\theta + v) - \sin(\theta - v)] \, d\varphi \, dx.$$

Nous pouvons maintenant, en laissant  $x$  constant, faire à la fois  $\lambda$  et  $v$ . Si  $v$  est pris, pour un moment, pour variable indépendante,  $dv$  et  $\frac{d\varphi}{2}$  seront des quantités équivalentes, car l'équation  $v = \frac{\varphi - \varphi'}{2}$  se réduit, lorsque  $\varphi'$  s'annule, à  $v = \frac{\varphi}{2}$ ; on aura, d'après cela,

$$F_1 = 8a^3 \frac{\Pi(\lambda)}{\lambda} \cos \theta \sin^2 v \, dv \, dx.$$

D'autre part, on a

$$\sin^2 v = \frac{\lambda^2 - x^2}{4a^2};$$

de là, si  $x$  est constant,

$$\sin v \cos v \, dv = \frac{\lambda}{4a^2} \, d\lambda.$$

On peut donc, en considérant désormais  $\lambda$  comme variable indépendante, écrire  $F_1$  sous cette forme

$$F_1 = 2a\Pi(\lambda) \cos \theta \operatorname{tang} v \, d\lambda \, dx.$$

Posons maintenant

$$x = -\lambda \cos \psi;$$

nous aurons, en laissant  $\lambda$  constant,

$$dx = \lambda \sin \psi \, d\psi,$$

et, par suite,

$$F_1 = \Pi(\lambda) \lambda^2 \cos \theta \frac{\sin^2 \psi}{\sqrt{1 - \frac{\lambda^2 \sin^2 \psi}{4a^2}}} \, d\lambda \, d\psi.$$

Nous admettrons que le rayon d'activité  $\lambda$ , est toujours inférieur à  $2a$ ;  $\psi$  devra, dans ce cas, prendre, quel que soit  $\lambda$ , toutes les valeurs comprises entre 0 et  $\pi$ . En intégrant par rapport à  $\psi$ , après avoir remplacé

$$\frac{\sin^2 \psi}{\sqrt{1 - \frac{\lambda^2 \sin^2 \psi}{4a^2}}} \quad \text{par} \quad \sum_0^\infty \frac{\Gamma(2n+1)}{\Gamma^2(n+1)} \frac{\sin^{2n+2} \psi}{2^{2n}} \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^{2n},$$

on obtiendra la résultante définitive  $R$  sous cette forme

$$R = \frac{\pi \cos \theta}{2} \sum_0^\infty \frac{2n+1}{n+1} \frac{\Gamma^2(2n+1)}{\Gamma^2(n+1)} \frac{1}{2^{2n} a^{2n}} \int_0^{\lambda_1} \Pi(\lambda) \lambda^{2n+2} \, d\lambda.$$

On peut arriver à ce résultat par une autre voie, en employant d'autres systèmes de coordonnées.

Par l'un des points de l'arête horizontale qui sépare les deux parties du cylindre, menons trois axes rectangulaires  $Mx$ ,  $My$ ,  $Mz$ , dont le premier coïncide avec cette arête, le second avec la direction de la ligne de plus grande pente, le troisième avec la normale au cylindre. Soit  $MM'M''$ .... un arc de la ligne de plus grande pente, au-dessous de  $Mx$ ;  $n$  le centre d'un élément superficiel appartenant à l'autre partie de la surface. Si l'on transporte en  $M$  un élément superficiel  $M'M''$ , l'inclinaison de la tangente à la ligne de plus grande pente subira une variation  $\varphi$  proportionnelle à l'arc  $MM'$ . L'attraction exercée par l'élément  $n$  sur  $M'M''$  ne sera pas modifiée dans son intensité si, en même temps qu'on ramène  $M'M''$  en  $M$ , on fait subir à l'élément  $n$ , sur la ligne de plus grande pente qui contient le centre de cet élément, un déplacement  $nn'$  d'égale étendue; la direction de la force attractive sera seule changée. Dans sa nouvelle direction, cette force attractive donnerait une composante verticale (la seule dont on ait à tenir compte) exprimée par  $\Pi(\lambda) \left( \frac{y}{\lambda} \cos \theta + \frac{z}{\lambda} \sin \theta \right) d\sigma.MM'.dx'$ , en désignant par  $(x, y, z)$  les coordonnées du point  $n'$ , par  $\lambda$  la distance  $n'M = nM'$ , par  $\theta$  l'angle que l'axe  $My$  fait avec la verticale, par  $d\sigma$  l'étendue de l'élément superficiel  $n'$  et par  $dx'$  un élément de l'arête  $Mx$ . Pour restituer à la force attractive  $F$  sa véritable direction, il suffira, en raison de la symétrie de la figure, de substituer, dans l'expression précédente,  $\theta + \varphi$  à  $\theta$ ; on peut, en même temps, remplacer  $MM'$  par  $a d\varphi$  et faire  $dx' = 1$  (ce qui équivaut à une première intégration, entre les limites  $x' = 0$ ,  $x' = 1$ ); on aura ainsi

$$F = a\Pi(\lambda) \left[ \frac{y}{\lambda} \cos(\theta + \varphi) + \frac{z}{\lambda} \sin(\theta + \varphi) \right] d\sigma d\varphi.$$

Tous les éléments de l'arc  $MM'M''$ .... donneront lieu à une composante identique, à la valeur près de l'angle  $\varphi$ ,

lequel doit varier entre zéro et la limite  $\varphi_1$  déterminée par l'équation

$$y = a \sin \varphi_1.$$

D'après cela, la résultante qui correspond à l'unité linéaire s'exprimera comme il suit, en introduisant les coordonnées planisphériques  $(\lambda, \mu, z)$ ,

$$R = a \int_0^{\lambda_1} \int_0^\pi \int_0^{\varphi_1} \frac{\Pi(\lambda)}{\lambda \sqrt{1 - \frac{\lambda^2 \sin^2 \mu \cos^2 \mu}{a^2}}} [y \cos(\theta + \varphi) + z \sin(\theta + \varphi)] d\lambda d\mu d\varphi.$$

En intégrant tout d'abord par rapport à  $\varphi$ , on obtient

$$R = a \int_0^{\lambda_1} \int_0^\pi \frac{\Pi(\lambda)}{\lambda \sqrt{1 - \frac{\lambda^2 \sin^2 \mu \cos^2 \mu}{a^2}}} \{ [y \sin \varphi_1 + z(1 - \cos \varphi_1)] \cos \theta - [y(1 - \cos \varphi_1) - z \sin \varphi_1] \sin \theta \} d\lambda d\mu.$$

De là, en remplaçant  $\sin \varphi_1$  par  $\frac{y}{a}$ ,  $\cos \varphi_1$  par  $1 - \frac{z}{a}$  et  $y$  par  $\sqrt{\lambda^2 - z^2} \sin \mu$ , on déduit

$$R = 2a \cos \theta \int_0^{\lambda_1} \int_0^\pi \frac{\Pi(\lambda) z d\lambda d\mu}{\sqrt{1 - \frac{\lambda^2 \sin^2 \mu \cos^2 \mu}{a^2}}}.$$

Après avoir substitué à  $z$  sa valeur  $a \frac{1 - \sqrt{1 - \frac{\lambda^2 \sin^2 \mu \cos^2 \mu}{a^2}}}{\sin^2 \mu}$ ,

l'intégration par rapport à  $\mu$  s'effectue sans difficulté et l'on retrouve la résultante  $R$  obtenue tout à l'heure.

22. *Attraction réciproque de deux parties d'une surface sphérique.* — Considérons deux parties d'une sphère séparées par un plan sécant que nous supposons horizontal. En un point quelconque du parallèle commun, concevons

trois axes rectangulaires  $Mx$ ,  $My$ ,  $Mz$ , les deux premiers, tangents respectivement à ce parallèle et à la ligne de plus grande pente, le troisième, normal à la surface et passant en conséquence par le centre  $C$  de la sphère. Soient  $a$  le rayon de la sphère,  $D$  le diamètre du parallèle,  $\theta$  l'angle que la normale fait avec le plan de ce parallèle, on aura

$$D = 2a \cos \theta.$$

La position d'un point  $N$  de la sphère peut se définir, soit par les coordonnées  $(x, y, z)$ , soit par deux angles  $\psi$  et  $\varphi$ ; le premier désignant la longitude de ce point par rapport au méridien  $Myz$ , le second, sa latitude par rapport à l'équateur  $CMx$ . Les formules de transformation relatives à ces deux systèmes sont les suivantes

$$x = a \sin \psi \cos \varphi, \quad y = a \sin \psi \sin \varphi, \quad z = a(1 - \cos \psi \cos \varphi).$$

Les lignes  $\varphi = \text{const.}$   $\psi = \text{const.}$  décomposent la sphère en éléments superficiels dont l'étendue  $d\sigma$ , déduite de l'équation (2), est

$$d\sigma = a^2 \cos \varphi d\psi d\varphi.$$

Si l'on considère un point  $M'$  situé sur la ligne de plus grande pente  $MM'M''$ ... on aura semblablement

$$x' = 0, \quad y' = a \sin \varphi', \quad z' = a(1 - \cos \varphi'), \quad d\sigma' = a^2 \cos \varphi' d\varphi' d\psi'.$$

La distance  $M'N$  ou  $\lambda$  est donnée par l'équation

$$\lambda^2 = (x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2,$$

d'où

$$\frac{\lambda^2}{2a^2} = 1 - \sin \varphi \sin \varphi' - \cos \psi \cos \varphi \cos \varphi'.$$

Cette équation peut s'écrire ainsi :

$$\frac{\lambda^2}{2a^2} = 1 - \varphi\varphi' - \left(1 - \frac{\psi^2}{2}\right) \left(1 - \frac{\varphi^2}{2}\right) \left(1 - \frac{\varphi'^2}{2}\right)$$

en négligeant seulement des quantités du quatrième ordre; on en déduit

$$\varphi - \varphi' = \sqrt{\frac{\lambda^2}{a^2} - \psi^2}.$$

Il résulte de là que, si l'on fait varier  $\varphi$  et  $\varphi'$  en laissant  $\lambda$  et  $\psi$  constants, le rapport  $\frac{d\varphi'}{d\varphi}$  ne différera de l'unité que par des quantités du second ordre. Dans ces limites d'approximation, on pourra, sans faire varier ni  $\lambda$  ni  $\psi$ , considérer  $d\varphi$  et  $d\varphi'$  comme des quantités constantes; c'est à cette condition que les valeurs de  $d\sigma$  et de  $d\sigma'$  données plus haut sont applicables.

Si les deux parties de la sphère s'attirent mutuellement, les éléments  $d\sigma$  et  $d\sigma'$  donneront lieu à une composante verticale  $F$  qui s'exprimera de la manière suivante

$$F = \Pi(\lambda) \left( \frac{y - y'}{\lambda} \cos \theta + \frac{z - z'}{\lambda} \sin \theta \right) d\sigma d\sigma';$$

en raison de la symétrie, il est clair qu'on n'a pas à tenir compte des composantes horizontales.

Après avoir remplacé  $y - y'$  par  $a(\sin \varphi - \sin \varphi')$ ,  $z - z'$  par  $a(\cos \varphi' - \cos \psi \cos \varphi)$ ,  $d\sigma$  par  $a^2 \cos \varphi d\varphi d\psi$  et  $d\sigma'$  par  $a^2 \cos \varphi' d\varphi' d\psi'$ , une première intégration pourra s'effectuer, par rapport à  $\psi'$ ; la composante  $F$ , relative à l'élément linéaire  $ad\psi'$  doit évidemment être comptée autant de fois qu'il existe d'éléments de cette nature dans le périmètre  $\pi D$ . Au lieu d'étendre l'intégration au périmètre total, on peut se borner à une certaine fraction de ce périmètre d'une étendue égale à l'unité linéaire; on obtiendra ainsi une première résultante partielle  $F_1$  dont la valeur est

$$F_1 = a^2 \frac{\Pi(\lambda)}{\lambda} [(\sin \varphi - \sin \varphi') \cos \theta + (\cos \varphi' - \cos \psi \cos \varphi) \sin \theta] \cos \varphi \cos \varphi' d\varphi d\varphi' d\psi.$$

Dans les limites d'approximation indiquées tout à l'heure, cette équation peut s'écrire ainsi :

$$F_1 = a^3 \frac{\Pi(\lambda)}{\lambda} \left[ L \cos \theta + \left( L\varphi - \frac{L^2 - a^2\psi^2}{2a} \right) \sin \theta \right] d\varphi^2 d\psi,$$

en désignant par  $\frac{L}{a}$  la différence constante  $\varphi - \varphi'$ .

On peut maintenant intégrer par rapport à  $\varphi$ ; les limites  $\Phi$  et  $\Phi'$  de cette intégration sont faciles à déterminer; la première, qui doit annuler  $\varphi'$ , est évidemment  $\frac{L}{a}$ ; la seconde s'obtiendra en observant qu'elle doit correspondre au point d'intersection du méridien  $\psi$  et du plan sécant dont l'équation, en coordonnées rectangulaires, est

$$y \cos \theta + z \sin \theta = 0,$$

équation qui équivaut à celle-ci

$$\sin \Phi' \cos \theta + (1 - \cos \psi \cos \Phi') \sin \theta = 0;$$

on en déduit, en négligeant les quantités du troisième ordre,

$$\Phi' = -\frac{\psi^2}{2} \operatorname{tang} \varphi.$$

De là une deuxième résultante partielle qui peut, toutes réductions faites, s'écrire ainsi

$$F_2 = a^3 \frac{\Pi(\lambda)}{\lambda} L \left( \frac{L}{a} \cos \theta + \psi^2 \sin \theta \right) d\varphi d\psi.$$

Pour une autre valeur de  $\lambda$ , on obtiendrait une équation analogue; la variation  $d\varphi$ , identique à  $d\Phi$ , est d'ailleurs liée à  $d\lambda$  par l'équation suivante

$$d\varphi = \frac{dL}{a} = \frac{\lambda d\lambda}{aL};$$

on a donc, en introduisant  $\lambda$  à titre de variable indépendante,

$$F_2 = a^2 \Pi(\lambda) \left( \frac{L}{a} \cos \theta + \psi^2 \sin \theta \right) d\lambda d\psi.$$

On peut, en supposant  $\lambda$  constant, intégrer tout d'abord par rapport à  $\psi$ , entre les limites  $\pm \frac{\lambda}{a}$ ; à cet effet, on posera

$$\psi = \frac{\lambda \cos \mu}{a}$$

et l'on aura

$$\int_{-\frac{\lambda}{a}}^{\frac{\lambda}{a}} \left( \frac{L}{a} \cos \theta + \psi^2 \sin \theta \right) d\psi = \int_0^\pi \left( \frac{\lambda^2}{a^2} \sin^2 \mu \cos \theta + \right. \\ \left. + \frac{\lambda^3}{a^3} \cos^2 \mu \sin \mu \sin \theta \right) d\mu = \frac{\pi \lambda^2}{2 a^2} \cos \theta + \frac{2\lambda^3}{3a^3} \sin \theta.$$

On conclut de là que la résultante définitive s'exprime ainsi :

$$R = \frac{\pi}{2} \cos \theta \int_0^{\lambda_1} \Pi(\lambda) \lambda^2 d\lambda + \frac{2 \sin \theta}{3a} \int_0^{\lambda_1} \Pi(\lambda) \lambda^3 d\lambda.$$

Le premier terme de cette valeur reproduit le premier terme de la résultante des attractions qui s'exercent entre deux parties d'une surface cylindrique situées de part et d'autre d'un plan parallèle à l'axe; c'est que, dans les deux cas, lorsqu'on se réduit à un seul terme, la résultante est identique à celle qu'on obtiendrait en remplaçant les surfaces en présence par leurs plans tangents.

25. *Attraction réciproque de deux surfaces de révolution.*

— On peut considérer une surface de révolution comme engendrée par le mouvement d'une circonférence de cercle d'un rayon variable, qui se déplace de telle manière que son centre soit toujours sur une même ligne droite, et son plan toujours normal à cette droite, nommée *axe de révolution*. S'il arrive que, dans deux positions successives, le rayon du cercle demeure constant, le cercle devient un *équateur* de la surface.

Imaginons deux surfaces de révolution  $S$  et  $S'$  ayant le même axe et un équateur commun, et analysons les attractions qui s'exercent entre ces surfaces, de part et d'autre de l'équateur, qu'on peut se représenter comme horizontal. En vertu de la symétrie, toutes ces actions donneront lieu, pour chaque surface, à une résultante verticale, appliquée en un point quelconque de l'axe commun. Cette résultante dépend évidemment de la nature particulière des surfaces  $S$ ,  $S'$ ; toutefois, si le rayon d'activité des forces attractives est assez petit pour qu'on puisse remplacer une section méridienne quelconque par son cercle osculateur, elle ne dépendra plus que de trois paramètres, savoir : le rayon  $a$  de l'équateur et les rayons de courbure  $b$  et  $b'$  des deux méridiennes qui viennent se rencontrer en chaque point de l'équateur. C'est ce cas restreint que nous allons traiter ici, au moyen d'un système particulier de coordonnées.

En un point  $M$  de l'équateur, imaginons trois axes rectangulaires  $Mx$ ,  $My$ ,  $Mz$ , le premier, tangent à l'équateur, le second, vertical et le troisième, normal aux deux surfaces. La position d'un point  $n$  de la surface  $S$  pourra être définie par sa *latitude* et sa *longitude*, c'est-à-dire par sa distance  $l$  à l'équateur, mesurée sur la méridienne  $nN$ , et par l'arc  $L$  qui correspond, sur l'équateur, à l'angle des deux méridiens  $nN$  et  $My$ . Si, par le point  $N$ , intersection du méridien  $nN$  et de l'équateur, on conçoit trois axes rectangulaires  $(x', y', z')$  placés, par rapport à cette nouvelle origine, comme le sont les trois axes  $(x, y, z)$  par rapport à l'origine  $M$ , les deux systèmes de coordonnées seront liés par les équations suivantes :

$$\begin{cases} x = a \sin \frac{L}{a} + x' \cos \frac{L}{a} - z' \sin \frac{L}{a}, \\ y = y', \\ z = a \left( 1 - \cos \frac{L}{a} \right) + x' \sin \frac{L}{a} + z' \cos \frac{L}{a}. \end{cases}$$

D'autre part on a, en identifiant la méridienne  $Nn$  avec son cercle osculateur,

$$x' = 0, \quad y' = l - \frac{l^3}{6b^2}, \quad z' = \frac{l^2}{2b}.$$

Il suffit d'éliminer  $x', y', z'$  entre ces six équations pour obtenir les formules de transformation relatives aux deux systèmes  $(x, y, z)$   $(L, l)$ . Nous écrirons ces formules ainsi qu'il suit :

$$\begin{cases} x = L - \frac{L^3}{6a^2} - \frac{Ll^2}{2ab}, \\ y = l - \frac{l^3}{6b^2}, \\ z = \frac{L^2}{2a} + \frac{l^2}{2b}. \end{cases}$$

Les lignes  $L = \text{const.}$ ,  $l = \text{const.}$  décomposent la surface  $S$  en éléments superficiels dont l'étendue, déduite de l'équation (2), est

$$d\sigma = \left( 1 - \frac{l^2}{2ab} \right) dl dL.$$

Si, au lieu de la latitude  $l$ , on introduit, à titre de variable indépendante, une fonction quelconque  $w$  de cette latitude, on aura

$$d\sigma = \left( 1 - \frac{l^2}{2ab} \right) \frac{dl}{dw} dw dL.$$

Lorsque  $w$  se confond avec la hauteur  $y$ , on a

$$d\sigma = \left( 1 + \frac{y^2}{2bc} \right) dy dL,$$

en désignant par  $\frac{1}{c}$  la différence  $\frac{1}{b} - \frac{1}{a}$ .

Nous définirons d'une manière analogue la situation

d'un point  $m$  pris sur la surface  $S'$  et dans le plan  $Myz$ . La distance  $mn$  ou  $\lambda$  est donnée par l'équation

$$\lambda^2 = (x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2.$$

L'élimination des variables  $x$ ,  $x'$ ,  $z$  et  $z'$  permet d'écrire cette équation sous la forme suivante

$$y - y' = Y + \frac{v}{2Y},$$

en posant

$$Y = \sqrt{\lambda^2 - L^2 + \frac{L^4}{12a^2}},$$

$$v = \frac{L^2 y^2}{2ab} + \frac{L^2 y'^2}{2ab'} - \frac{y^4}{4b^2} - \frac{y'^4}{4b'^2} + \frac{y^2 y'^2}{2bb'}.$$

L'attraction mutuelle des éléments  $d\sigma$ ,  $d\sigma'$  donne lieu, pour chaque élément, à une composante verticale  $F$  qui peut s'exprimer ainsi

$$F = \Pi(\lambda) \frac{y - y'}{\lambda} d\sigma d\sigma'.$$

Lorsque  $v$  s'évanouit, c'est-à-dire lorsque les deux surfaces  $S$ ,  $S'$  sont remplacées par un cylindre (n° 20), la différence  $y - y'$  ne dépend que de  $\lambda$  et de  $L$ . On peut alors, en maintenant  $\lambda$  et  $L$  constants, effectuer une première intégration par rapport à  $L$  entre des limites arbitraires, par exemple entre 0 et 1, puis une seconde, par rapport à  $y$ , entre les limites 0 et  $Y$ , après avoir substitué  $y - Y$  à  $y'$ . On obtient ainsi une première résultante partielle  $F_1$  dont la valeur est

$$F_1 = \frac{\Pi(\lambda) Y^2}{\lambda} dY dL.$$

Mais, en laissant  $L$  constant, on a

$$\lambda d\lambda = Y dY;$$

de là

$$F_1 = \Pi(\lambda) \sqrt{\lambda^2 - L^2 + \frac{L^4}{12a^2}} d\lambda dL.$$

L'ordre des intégrations qui doivent fournir la résultante  $R$  est arbitraire; en conséquence, nous intégrerons d'abord par rapport à  $L$ , entre les limites  $\pm \lambda \left(1 + \frac{\lambda^2}{24a^2}\right)$ , qui annulent  $F_1$ . A cet effet, nous poserons

$$L = -\lambda \left(1 + \frac{\lambda^2}{24a^2}\right) \cos \varphi,$$

d'où

$$dL = \lambda \left(1 + \frac{\lambda^2}{24a^2}\right) \sin \varphi d\varphi,$$

et nous ferons varier l'angle  $\varphi$  entre les limites 0 et  $\pi$ . Nous aurons ainsi

$$F_1 = \Pi(\lambda) \sin^2 \varphi \left(1 + \frac{\lambda^2 \sin^2 \varphi}{24a^2}\right) d\lambda d\varphi,$$

et, par suite,

$$R = \frac{\pi}{2} \int_0^{\lambda_1} \Pi(\lambda) \lambda^2 d\lambda + \frac{\pi}{64a^2} \int_0^{\lambda_1} \Pi(\lambda) \lambda^4 d\lambda.$$

Revenons maintenant aux surfaces  $S$ ,  $S'$ . A chaque point  $m$  de l'une de ces surfaces correspond, sur le cylindre circonscrit, un point  $m'$  ayant même longitude et même hauteur. En désignant désormais par  $\lambda$  la distance  $m'n'$ ,  $mn$  ne différera de  $\lambda$  que par une quantité du troisième ordre, dont la valeur est  $-\frac{v}{2\lambda}$ ; on a d'ailleurs

$$v = \frac{L^2 y^2}{2ab} + \frac{L^2 (Y - y)^2}{2ab'} - \frac{y^4}{4b^2} - \frac{(Y - y)^4}{4b'^2} + \frac{y^2 (Y - y)^2}{2bb'}.$$

Cela posé, la composante  $F$  s'exprimera de la manière suivante, en faisant  $dL' = 1$ ,

$$F = \frac{\Pi(\lambda + \varepsilon) Y}{\lambda + \varepsilon} \left[ 1 + \frac{y^2}{2bc} + \frac{(Y - y)^2}{2b'c'} \right] dy dY dL.$$

On peut, bien que la fonction  $\Pi(\lambda)$  soit indéterminée, développer le rapport  $\frac{\Pi(\lambda + \varepsilon)}{\lambda + \varepsilon}$  en une série ordonnée selon les puissances croissantes de  $\varepsilon$ ; en ne considérant que les deux premiers termes de cette série, on aura

$$\frac{\Pi(\lambda + \varepsilon)}{\lambda + \varepsilon} = \frac{\Pi(\lambda)}{\lambda} + \frac{\lambda \Pi'(\lambda) - \Pi(\lambda)}{\lambda^2} \varepsilon,$$

et, par suite,

$$F = \frac{\Pi(\lambda)Y}{\lambda} \left[ 1 + \frac{\Pi(\lambda) - \lambda \Pi'(\lambda)}{2\lambda^2 \Pi(\lambda)} v + \frac{y^2}{2bc} + \frac{(Y-y)^2}{2b'c'} \right] dy dY dL.$$

De là, en intégrant par rapport à  $y$  entre les limites 0 et  $Y$ ,

$$F_1 = \frac{\Pi(\lambda)Y^3}{\lambda} \left[ 1 + \frac{\Pi(\lambda) - \lambda \Pi'(\lambda)}{2\lambda^2 \Pi(\lambda)} \left( \frac{L^2 Y^3}{6ab} + \frac{L^2 Y^2}{6ab'} - \frac{Y^4}{2ob^2} - \frac{Y^4}{2ob'^2} + \frac{Y^4}{6obb'} \right) + \frac{Y^2}{6bc} + \frac{Y^2}{6b'c'} \right] dY dL.$$

Remplaçons, dans cette équation,  $dY$  par  $\frac{\lambda d\lambda}{Y}$  et  $Y$  par

$\sqrt{\lambda^2 - L^2 + \frac{L^4}{12a^2}}$ ; introduisons ensuite l'angle  $\varphi$ , nous aurons

$$F_1 = \Pi(\lambda) \lambda^2 \sin^2 \varphi \left\{ 1 + \frac{\lambda^2 \sin^2 \varphi}{24a^2} + \frac{\lambda^2 \sin^2 \varphi}{6} \left( \frac{1}{bc} + \frac{1}{b'c'} \right) + \left[ 1 - \frac{\lambda \Pi'(\lambda)}{\Pi(\lambda)} \right] \left[ \frac{\lambda^2 \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi}{12a} \left( \frac{1}{b} + \frac{1}{b'} \right) - \frac{\lambda^2 \sin^4 \varphi}{4o} \left( \frac{1}{b^2} + \frac{1}{b'^2} - \frac{1}{5bb'} \right) \right] \right\} d\lambda d\varphi.$$

Il reste à intégrer par rapport à  $\lambda$  et à  $\varphi$ . Si  $\lambda_1$  est la distance extrême à laquelle les attractions s'évanouissent, cette limite doit être modifiée lorsqu'on mesure les distances  $\lambda$  entre deux points du cylindre circonscrit aux surfaces  $S$ ,  $S'$ . Désignons par  $R + \delta R$  la résultante que l'on obtient lorsqu'on conserve sans modification la li-

mite  $\lambda_1$ ; l'équation ci-dessus nous donnera, en intégrant entre 0 et  $\pi$ ,

$$(12) R + \delta R = \frac{\pi}{2} \int_0^{\lambda_1} \Pi(\lambda) \lambda^2 d\lambda + \frac{\pi}{16} \left( \frac{1}{4a^2} + \frac{1}{bc} + \frac{1}{b'c'} \right) \int_0^{\lambda_1} \Pi(\lambda) \lambda^4 d\lambda - \frac{\pi}{64} \left[ \frac{1}{3a} \left( \frac{1}{b} + \frac{1}{b'} \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{1}{b^2} + \frac{1}{b'^2} - \frac{1}{5bb'} \right) \right] \int_0^{\lambda_1} [\Pi'(\lambda) \lambda^5 - \Pi(\lambda) \lambda^4] d\lambda.$$

Évaluons maintenant l'erreur  $\delta R$  provenant de la substitution de la limite uniforme  $\lambda_1$  à la véritable limite, variable elle-même avec les diverses valeurs de  $L$ .

A chaque élément  $d\sigma$  pris sur le méridien  $L$  et sur la surface  $S$  correspond une erreur mesurée par l'expression  $\Pi(\lambda_1) \frac{Y_1 dY_1}{\lambda_1 d\lambda_1} \varepsilon_1 d\sigma$ , en désignant par  $Y_1$  la valeur de  $Y$  pour  $\lambda = \lambda_1$  et par  $\varepsilon_1$  l'écart qui existe entre la limite véritable et la limite  $\lambda_1$ ; cet écart est déterminé par la formule

$$\varepsilon_1 = -\frac{v_1}{2\lambda_1} = -\frac{1}{2\lambda_1} \left[ \frac{L^2 y^2}{2ab} + \frac{L^2 (Y_1 - y)^2}{2ab'} - \frac{y^4}{4b^2} - \frac{(Y_1 - y)^4}{4b'^2} + \frac{y^2 (Y_1 - y)^2}{2bb'} \right].$$

On peut remplacer ici  $d\sigma$  par  $dy dL$ ; on a, d'autre part,

$$\frac{dY_1}{d\lambda_1} = \frac{\lambda_1}{Y_1}.$$

Cela posé, l'ensemble des erreurs *en moins* relatives au méridien  $L$  est donné par l'intégrale suivante

$$\frac{\Pi(\lambda_1)}{2\lambda_1} dL \int_0^{Y_1} v_1 dy = \frac{\Pi(\lambda_1) Y_1}{2\lambda_1} \left( \frac{L^2 Y_1^2}{6ab} + \frac{L^2 Y_1^2}{6ab'} - \frac{Y_1^4}{2ob^2} - \frac{Y_1^4}{2ob'^2} + \frac{Y_1^4}{6obb'} \right) dL.$$

Si l'on remplace, dans cette équation,  $L$  par  $-\lambda_1 \cos \varphi$ ,  $Y_1$  par  $\lambda_1 \sin \varphi$ , et  $dL$  par  $\lambda_1 \sin \varphi d\varphi$ , il suffira, pour obtenir

l'erreur totale —  $\delta R$ , d'intégrer par rapport à  $\varphi$  de 0 à  $\pi$ ; on a ainsi

$$\delta R = -\frac{\pi}{64} \left[ \frac{1}{3a} \left( \frac{1}{b} + \frac{1}{b'} \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{1}{b^2} + \frac{1}{b'^2} - \frac{1}{3bb'} \right) \right] \Pi(\lambda_1) \lambda_1^5.$$

Introduisons cette valeur de  $\delta R$  dans l'équation (12); d'autre part, observons que l'on a

$$\int [\Pi'(\lambda) \lambda^5 - \Pi(\lambda) \lambda^4] d\lambda = \Pi(\lambda) \lambda^5 - 6 \int \Pi(\lambda) \lambda^4 d\lambda.$$

Nous obtiendrons, en admettant que  $\Pi(\lambda) \lambda^5$  s'annule pour  $\lambda = 0$  (condition qui est remplie notamment lorsque

$\Pi(\lambda) = \frac{2}{\lambda^2}$ ) l'expression suivante de la résultante R

$$(15) \left\{ \begin{aligned} R &= \frac{\pi}{2} \int_0^{\lambda_1} \Pi(\lambda) \lambda^2 d\lambda + \\ &+ \frac{\pi}{64} \left( \frac{1}{a^2} - \frac{2}{ab} - \frac{2}{ab'} + \frac{1}{b^2} + \frac{1}{b'^2} + \frac{1}{bb'} \right) \int_0^{\lambda_1} \Pi(\lambda) \lambda^4 d\lambda. \end{aligned} \right.$$

Lorsque les deux surfaces se réduisent l'une et l'autre à un plan, le second terme de la résultante s'évanouit et l'on retrouve la formule (11) du n° 19.

Ce terme s'évanouit encore lorsque les trois rayons de courbure  $a$ ,  $b$ ,  $b'$  deviennent égaux, c'est-à-dire lorsqu'il s'agit d'une sphère coupée par un plan qui passe par son centre.

La résultante R se réduit aussi à un seul terme lorsque la courbure  $\frac{1}{b}$  s'évanouit seule, si en même temps  $a$  et  $b$  deviennent identiques; les deux surfaces en présence se réduisent alors, l'une à une sphère, l'autre à un cylindre circonscrit à cette sphère.

Si les courbures  $\frac{1}{b}$ ,  $\frac{1}{b'}$  sont nulles, les deux surfaces sont remplacées par un cylindre de rayon  $a$ . L'expression de la

résultante reproduit alors les deux premiers termes de la formule générale (10) du n° 19.

Supposons enfin que les courbures  $\frac{1}{a}$ ,  $\frac{1}{b}$  s'évanouissent;

R mesure, dans ce cas, l'action réciproque d'une surface cylindrique et d'un plan tangentiel à cette surface, et l'on a

$$R = \frac{\pi}{2} \int_0^{\lambda_1} \Pi(\lambda) \lambda^2 d\lambda + \frac{\pi}{64b^2} \int_0^{\lambda_1} \Pi(\lambda) \lambda^4 d\lambda.$$

24. *Action exercée sur un point matériel par les éléments de volume situés de part et d'autre d'un plan passant par ce point.* — Occupons-nous maintenant des actions exercées par des éléments de volume. En premier lieu, nous considérerons un point M, situé sur un plan P, comme étant le centre d'un élément de volume; nous supposerons que cet élément soit attiré par tous les éléments de volume situés d'un même côté du plan P, et nous rechercherons la résultante de toutes ces attractions, en admettant, comme précédemment, que l'intensité des forces attractives ne dépend que de la distance  $\lambda$  des éléments en présence, et que le rayon d'activité de ces forces est une quantité finie  $\lambda_1$ .

Un élément de volume  $dU$  s'exprime, en coordonnées planisphériques  $(\lambda, \mu, z)$ , par la formule suivante (n° 7)

$$dU = \lambda d\lambda d\mu dz.$$

En conséquence, si l'on prend pour unité de volume le volume de l'élément M, la résultante R des forces attractives qui s'exercent sur cet élément, résultante nécessairement normale au plan P en vertu de la symétrie, sera donnée par l'équation

$$R = \int_0^{\lambda_1} \int_0^{2\pi} \int_0^z \Psi(\lambda) \frac{z}{\lambda} \cdot \lambda d\lambda d\mu dz,$$

dans laquelle la fonction  $\Psi(\lambda)$  représente la loi d'attraction. Une double intégration donne immédiatement

$$R = \pi \int_0^{\lambda_1} \Psi(\lambda) \lambda^2 d\lambda.$$

Si le milieu attractif, au lieu d'être homogène, possédait en chaque point une densité inversement proportionnelle à la distance de ce point au plan P, la résultante R s'exprimerait comme il suit :

$$R = \int_0^{\lambda_1} \int_0^{2\pi} \int_0^{\lambda} \Psi(\lambda) d\lambda d\mu dz.$$

Lorsqu'on remplace  $\Psi(\lambda)$  par  $\lambda$ , la formule précédente représente le demi-volume de la sphère dont le rayon est  $\lambda_1$ ; et l'on trouve, en effet, en intégrant trois fois,

$$R = \int_0^{\lambda_1} \int_0^{2\pi} \lambda^2 d\lambda d\mu = 2\pi \int_0^{\lambda_1} \lambda^2 d\lambda = \frac{2\pi\lambda_1^3}{3}.$$

25. *Action exercée sur un point d'une surface par les éléments de volume situés de part et d'autre de cette surface.* — Plaçons actuellement l'élément de volume M sur une surface quelconque S, en un point où les rayons de courbure principaux soient de même signe, et recherchons la résultante des attractions exercées sur l'élément M par les éléments de volume situés de part et d'autre de cette surface. Il suffit évidemment de s'occuper de la portion de l'espace interceptée entre la surface et son plan tangent en M, puisque l'action d'un espace limité par un plan se ramène à une force normale dont on vient d'évaluer l'intensité. Nous supposerons d'ailleurs que le rayon d'activité  $\lambda_1$  est assez petit pour que la surface S puisse être exactement représentée en coordonnées  $(\lambda, \mu, z)$ , au moyen de l'équation (8) du n° 12,

$$z_1 = \frac{\lambda^2}{2\gamma} + \zeta\lambda^3.$$

Les attractions exercées par un élément  $dU$  sur le point matériel M donnent lieu à trois composantes, l'une normale à la surface S et les deux autres tangentielles aux lignes de courbure; la première de ces composantes s'exprime par l'équation suivante

$$R = \int_0^{\lambda_1} \int_0^{2\pi} \int_0^{z_1} \Psi(\lambda) z d\lambda d\mu dz;$$

les deux autres composantes  $T_x, T_y$  se déduisent de celle-là en substituant alternativement  $x$  et  $y$  à  $z$ .

La composante R devient, après qu'on a intégré par rapport à  $z$ ,

$$R = \frac{1}{2} \int_0^{\lambda_1} \int_0^{2\pi} \Psi(\lambda) \left( \frac{\lambda^2}{2\gamma} + \zeta\lambda^3 \right)^2 d\lambda d\mu.$$

Si  $\zeta$  s'évanouit, on aura simplement

$$R = \frac{1}{8} \int_0^{\lambda_1} \Psi(\lambda) \lambda^4 d\lambda \int_0^{2\pi} \frac{d\mu}{\gamma^2} = \frac{3\pi}{52} \left( \frac{1}{A^2} + \frac{2}{3AB} + \frac{1}{B^2} \right) \int_0^{\lambda_1} \Psi(\lambda) \lambda^4 d\lambda.$$

Cette équation subsiste encore lorsque  $\zeta$  n'est pas nul, car on a (n° 12)

$$\zeta = \frac{1}{6} \left( \frac{d \frac{1}{A}}{dx} \cos^3 \mu + 3 \frac{d \frac{1}{A}}{dy} \cos^2 \mu \sin \mu + \frac{d \frac{1}{B}}{dx} \cos \mu \sin^3 \mu + \frac{d \frac{1}{B}}{dy} \sin^3 \mu \right),$$

et il est facile de voir que l'intégration de 0 à  $2\pi$  élimine tous les termes provenant de  $\zeta$ .

Évaluons maintenant les composantes tangentielles. On a d'abord

$$T_x = \int_0^{\lambda_1} \int_0^{2\pi} \int_0^{z_1} \Psi(\lambda) \sqrt{\lambda^2 - z^2} \cos \mu d\lambda d\mu dz.$$

Si l'on remplace  $z$ , par  $\frac{\lambda^2}{2\gamma} + \zeta\lambda^3$ , il est clair que les termes

indépendants de  $\zeta$  s'évanouiront par l'intégration de 0 à  $2\pi$ . On a donc, en se bornant aux termes de l'ordre le moins élevé,

$$T_x = \int_0^{\lambda_1} \int_0^{2\pi} \Psi(\lambda) \lambda^4 \zeta \cos \mu = \frac{\pi}{8} \frac{d\left(\frac{1}{A} + \frac{1}{B}\right)}{dx} \int_0^{\lambda_1} \Psi(\lambda) \lambda^4 d\lambda.$$

On obtiendrait de même

$$T_y = \frac{\pi}{8} \frac{d\left(\frac{1}{A} + \frac{1}{B}\right)}{dy} \int_0^{\lambda_1} \Psi(\lambda) \lambda^4 d\lambda.$$

26. *Action exercée par une sphère sur un point placé à sa surface.* — Considérons une sphère d'un diamètre  $D$  supérieur au rayon d'activité des forces moléculaires; la résultante  $R$  des attractions que les éléments de volume de cette sphère exercent sur un point quelconque de la surface sera dirigée suivant la normale, et il est facile de voir que cette résultante est donnée par l'équation

$$R = \int_0^D \int_0^{2\pi} \int_{\frac{D}{2}}^{\lambda} \Psi(\lambda) z d\lambda d\mu dz,$$

d'où, en intégrant deux fois,

$$R = \pi \int_0^D \Psi(\lambda) \lambda^2 d\lambda - \frac{\pi}{D^2} \int_0^D \Psi(\lambda) \lambda^4 d\lambda.$$

Si la loi d'attraction  $\Psi(\lambda)$  se confond avec celle de la gravitation, c'est-à-dire si l'on a, en désignant par  $i$  une constante arbitraire,

$$\Psi(\lambda) = \frac{i}{\lambda^2},$$

on trouve

$$R = \frac{2\pi i}{3} D.$$

C'est précisément la valeur qu'on obtiendrait si l'on sup-

posait que la masse de la sphère est réunie à son centre; résultat bien connu, qui se déduit, comme on vient de le voir, presque sans calcul de la formule fondamentale par laquelle s'exprime l'élément de volume en coordonnées planisphériques.

27. *Action exercée sur une file de molécules normale à un plan par les molécules voisines.* — Considérons maintenant une série continue d'éléments de volume dont les centres seraient placés sur une même ligne droite normale à un plan  $P$ , et recherchons la résultante des attractions que ces éléments, que nous supposons invariablement liés entre eux, subissent de la part des éléments de volume qui les entourent, le milieu attractif étant limité par le plan  $P$ .

Soit  $M$  le point de rencontre de ce plan avec la normale  $Mz$ ; du point  $N$ , centre d'un élément de volume placé en dehors de la normale, abaissons sur  $Mz$  une perpendiculaire  $NQ$  et prenons  $QM' = MQ$ . En vertu de la symétrie, les attractions exercées par l'élément  $N$  sur les éléments de volume dont les centres appartiennent à la ligne  $MM'$  n'influent en rien sur la valeur de la résultante, laquelle est nécessairement normale à la surface. Désignons par  $\lambda$  la distance  $MN = M'N$ , par  $l$  la distance qui sépare le point  $N$  d'un point  $m$  arbitrairement choisi sur la normale  $Mz$ , au delà de la région  $MM'$ , par  $\omega$  l'ordonnée  $Mm$ . Le volume de l'élément dont  $m$  est le centre peut être représenté par  $\omega d\omega$ , en désignant par  $\omega$  la projection commune de tous les éléments  $M, M', m, \dots$  sur le plan  $P$ , ou simplement par  $d\omega$ , en prenant  $\omega = 1$ . D'autre part, le volume de l'élément  $N$  est donné, en coordonnées planisphériques, par la formule

$$dU = z d\lambda d\mu dz.$$

L'attraction exercée par l'élément  $dU$  sur l'élément  $m$  produit une composante normale qui peut s'exprimer ainsi :

$$F = f(l) \frac{\omega - z}{l} d\omega dU,$$

en représentant par  $f(l)$  la loi d'attraction. Cela posé, on a

$$\overline{NQ}^2 = l^2 - (w - z)^2;$$

la distance  $NQ$  demeure constante lorsqu'on fait agir successivement l'élément  $dU$  sur tous les éléments tels que  $m$ ; on doit donc avoir

$$l dl = (w - z) dw,$$

et, par suite,

$$F = f(l) dl dU.$$

De là une première résultante partielle dont l'expression est

$$F_1 = dU \int_{\lambda}^{\lambda_1} f(l) dl.$$

Supposons que l'intégrale indéfinie  $\int f(l) dl$  ait pour valeur  $f_1(l)$ ; on aura

$$F_1 = [f_1(\lambda_1) - f(\lambda)] dU.$$

Les choses se passent donc comme si tous les éléments  $M', M'' \dots m \dots$  étaient ramenés à l'origine  $M$ , avec une modification, indifférente au point de vue analytique, de la fonction par laquelle doit s'exprimer la loi d'attraction; mais, en même temps, tous les éléments tels que  $n$  devront être ramenés sur le prolongement de la normale  $Mz$ , sans que leur distance  $\lambda$  à l'origine  $M$  soit altérée. En désignant, pour abrégé, par  $\varphi(\lambda)$  la loi d'attraction modifiée, la résultante des attractions du milieu sera donnée par la formule

$$R = \int_0^{\lambda_1} \int_0^{2\pi} \int_0^{\lambda} \varphi(\lambda) \lambda d\lambda d\mu dz;$$

de là, en intégrant deux fois,

$$R = 2\pi \int_0^{\lambda_1} \varphi(\lambda) \lambda^2 d\lambda.$$

28. Action exercée sur une file de molécules normale à une

surface par les molécules voisines. — Remplaçons le plan  $P$  par une surface quelconque  $S$ , et considérons une série d'éléments de volume dont les centres appartiendraient à une même droite  $MM'M'' \dots$  normale à cette surface. Si ces éléments de volume subissent, de la part du milieu ambiant, des actions attractives, il suffira évidemment, pour obtenir la résultante de ces actions, de s'occuper des éléments compris entre la surface elle-même, que nous supposons convexe dans tous les sens, et le plan tangent à l'origine  $M$ . Cette résultante sera nécessairement normale à la surface, si l'on admet, comme nous le ferons, que le rayon d'activité des forces moléculaires est assez faible pour qu'il soit permis de donner à l'équation de la surface en coordonnées planisphériques la forme suivante :

$$z = \frac{\lambda^2}{2\gamma}.$$

Tout d'abord, il est clair que, si la surface devenait concave en conservant ses deux courbures principales simplement changées de signe, la résultante ne serait pas modifiée; car si l'on considère deux éléments  $m$  et  $m'$  symétriquement placés par rapport au plan  $P$ , et si l'on construit le parallélogramme  $m'mMM'$ , les actions de l'élément  $m'$  sur tous les éléments compris dans l'étendue  $MM'$  se détruiront en vertu de la symétrie; de sorte qu'on pourra substituer  $m'$  à  $m$ , c'est-à-dire remplacer en définitive la section normale convexe par une section normale concave, symétrique par rapport au plan tangent.

Cela posé, les considérations développées dans le numéro précédent s'appliquent encore ici; l'une des limites de l'intégration qu'on doit effectuer par rapport à la variable  $z$  est seule changée, et l'on a

$$R = \int_0^{\lambda_1} \int_0^{2\pi} \int_0^z \varphi(\lambda) \lambda d\lambda d\mu dz;$$

d'où l'on déduit, en intégrant deux fois.

$$R = \frac{\pi}{2} \left( \frac{1}{A} + \frac{1}{B} \right) \int_0^{\lambda_1} \varphi(\lambda) \lambda^3 d\lambda.$$

De même que lorsqu'il s'agit d'attractions purement superficielles (n° 17), la résultante R est, comme on voit, proportionnelle à la courbure moyenne  $\frac{1}{2} \left( \frac{1}{A} + \frac{1}{B} \right)$ .

Le problème que nous venons de traiter a été résolu pour la première fois par Laplace (\*). Mais la méthode d'analyse suivie par ce géomètre est sujette à des objections graves, qui ont été exposées, à des points de vue différents, par Gauss (\*\*) et Poisson (\*\*\*). On échappe à ces objections, et l'on évite en même temps de très-longues complications analytiques, lorsqu'on a recours, comme nous l'avons fait, aux formules générales que fournit la théorie des coordonnées curvilignes obliques.

(\*) Méc. Cél., T. IV (Théorie de l'action capillaire).

(\*\*) Mémoires de Göttingue, T. VII (1830).

(\*\*\*) Nouvelle théorie de l'action capillaire (1831).

NOTE

SUR

## LES PROCÉDÉS D'EXTRACTION DES MINÉRAIS DANS LES MINES

Par M. WORMS DE ROMILLY, ingénieur des mines.

Les procédés employés pour extraire les minerais ont dû se modifier à mesure que la production des mines augmentait et que les exploitations devenaient plus profondes. Aux treuils manœuvrés à bras d'hommes ont succédé les barillets mus par des chevaux ; plus tard, on a établi des appareils à vapeur.

*Extraction par câbles.* — Les bennes ou cages sont suspendues à l'extrémité d'un câble dont la section doit croître assez rapidement avec la profondeur du puits ; le poids de la partie du câble qui s'étend des molettes à la recette inférieure augmente en raison de sa longueur et de sa section ; il est donc évident qu'il y a une limite de profondeur à partir de laquelle le câble romprait sous son propre poids. Cette limite est dépassée dans beaucoup d'exploitations, et avant même qu'elle ne soit atteinte, le procédé d'extraction par câble de section uniforme devient impraticable.

*Câbles à section constante.* — Soient :

$\Omega$  la section totale du câble exprimée en centimètres carrés,

$\omega$  la section de l'un des fils exprimée en centimètres carrés,

$n$  le nombre des fils,

$P$  la charge exprimée en kilogrammes, que l'on ne doit pas dépasser par centimètre carré de section du câble,

$C$  la charge maximum suspendue à l'extrémité du câble,

$L$  la profondeur du puits,

$p$  le poids du mètre courant de câble,  
 $\delta$  la densité de la matière qui constitue les fils,  
 $k$  une fraction qui représente le rapport du poids des en-  
 duits dont les fils sont recouverts à celui de ces mêmes fils,  
 $a$  un coefficient destiné à tenir compte de l'augmentation  
 de poids du mètre courant de câble, résultant des ligatures  
 et de l'enroulement des fils les uns autour des autres.

On a la relation

$$p = a\delta(1+k)\omega.$$

On doit d'ailleurs satisfaire à la condition

$$\Omega P \geq Lp + C,$$

et le câble ne pourra supporter aucune charge si

$$L = \frac{P\Omega}{p} = \frac{P}{a\delta(1+k)}$$

Pour les câbles en fer, on trouve une longueur-limite de  
 600 mètres en prenant

$$p = 0,76 \Omega, \quad P = 456.$$

Avec les câbles en aloès, la longueur-limite serait de  
 687 mètres en prenant

$$p = 0,096 \Omega, \quad P = 65,95.$$

On peut dépasser cette limite et parvenir théoriquement  
 à toutes les profondeurs en employant des câbles à sections  
 variables.

*Câbles à sections variables d'une manière continue.* —  
 Adoptons les mêmes notations, en désignant cependant  
 par  $\Omega$  la section à la distance quelconque  $L$  de l'extrémité  
 du câble, et  $\Omega_0$  la section à cette extrémité, et faisons pour  
 abréger l'écriture

$$p' = \frac{p}{\Omega}.$$

Les relations suivantes exprimeront la constance de la  
 charge supportée par l'unité de section du câble, en tous  
 ses points.

$$Pd\Omega = \Omega p'dL, \quad P\Omega_0 = C,$$

d'où l'on tire

$$\Omega = \Omega_0 e^{\frac{p'L}{P}},$$

et le poids du câble de longueur  $L$  sera

$$C \left( e^{\frac{p'L}{P}} - 1 \right).$$

Dans le cas d'un câble en aloès, on aura

$$\frac{p'}{P} = \frac{1}{687},$$

et un câble de 1.000 mètres de long aura un poids égal à  
 3,29  $C$ , sa section maxima sera 4,29  $\Omega_0 = 0,065 C$ .

*Câbles à section variable d'une manière discontinue.* —  
 En pratique, on sera conduit à des sections beaucoup plus  
 fortes, parce que la section ne peut varier d'une manière  
 continue.

Supposons le câble partagé en segments de longueur  $l$ ;  
 les sections  $\omega_1, \omega_2, \dots$  de chaque segment seront déterminées  
 par les relations

$$P\omega_1 = C + p'\omega_1 l$$

$$P\omega_2 = C + p'\omega_1 l + p'\omega_2 l$$

$$\dots \dots \dots$$

On a donc pour l'expression de  $\omega_n$  la valeur

$$\omega_n = \frac{C}{P - p'l} \left( \frac{P}{P - p'l} \right)^{n-1},$$

et pour le poids du câble de longueur  $nl$ , la valeur

$$C \left( \frac{P}{P - p'l} \right)^n - C.$$

Faisons l'application de ces formules au cas d'un câble en aloès, nous trouvons que la section extrême sera égale à 0,105 C., et que le poids total sera égal à 5,92 C.

Si nous comparons ces résultats à ceux que nous avons obtenus précédemment, nous trouvons pour les sections et les poids des câbles les rapports

$$\frac{0,105}{0,065} = 1,61, \quad \frac{5,92}{5,29} = 1,80.$$

Quel que soit le système employé, le poids des câbles augmente toujours très-rapidement avec la profondeur.

*Influence du rayon des bobines.* — On atténue les inconvénients de cette surcharge en installant sur la même machine deux câbles enroulés en sens contraire, de manière à ce que l'un des câbles soit déroulé quand l'autre est complètement enroulé. Si, pour un même puits, on fait varier le diamètre du noyau de la bobine sur laquelle se fait l'enroulement des câbles, les conditions de la résistance varieront en même temps, et il y a lieu de chercher la valeur de ce diamètre, pour laquelle le travail à effectuer par la machine sera minimum.

Le résultat est toujours l'élévation sur toute la hauteur du puits de la charge de minerai. Si l'on suppose une bobine de très-grand diamètre, de manière à ce que la distance du point où le câble se détache de la bobine à l'axe de celle-ci puisse être regardée comme constante, les moments pris par rapport à cet axe aux deux extrémités de la course seront, en appelant

- Q le poids de la charge,
- q le poids de la benne vide,
- Θ le poids du câble,
- ρ le rayon de la bobine,

$$\rho(Q + \Theta), \quad \rho(Q - \Theta),$$

de sorte que pendant la première partie de la manœuvre la machine devra développer un grand effort pour remonter la cage pleine, et pendant la seconde partie de la manœuvre, elle devra agir comme frein pour retenir la cage vide qui tend à entraîner de plus en plus énergiquement l'autre cage.

Avec un très-petit rayon initial de la bobine, on aurait un effet opposé; la machine devrait agir comme frein au départ de la cage chargée du bas du puits et comme moteur à l'arrivée de cette cage à l'orifice supérieur.

La solution la plus favorable doit évidemment satisfaire aux deux conditions suivantes :

- 1° La machine ne doit jamais agir comme frein ;
- 2° Le travail à produire doit varier le moins possible, en admettant une vitesse uniforme de la machine motrice.

Nous nous proposons de chercher le moyen de réaliser ces conditions dans le cas des câbles à sections variables.

*Câbles à section constante.* — M. Combes a donné dans son *Cours d'exploitation des mines*, la solution de ce problème pour des câbles de section constante.

Rappelons les principes sur lesquels il s'est appuyé.

Supposons les deux cages placées dans le puits à leur point de rencontre; soit alors  $\rho$  le bras du levier à l'extrémité duquel agissent les poids des deux cages et des câbles : Désignons par :

- Q le poids de la charge,
- q le poids de la cage et des wagons vides.

L la longueur du câble ou plutôt la distance des recettes extrêmes,

$p$  le poids du câble par mètre courant,

$\epsilon$  son épaisseur,

$\sigma$  la différence des moments correspondant aux deux cages à un instant quelconque où l'arbre des bobines a fait  $m$  tours, en prenant pour point de départ le moment de la rencontre des deux bennes.

On a la relation suivante applicable à une position quelconque des cages.

$$(1) \quad \mathcal{M} - Q\rho = \pm \left[ (Q + 2q + pL)m\varepsilon + \frac{pL^2}{8\pi\rho^2} m\varepsilon^2 - 4\pi p m \rho^2 - 2\pi p m^3 \varepsilon^2 \right].$$

Dans le premier membre, le terme  $\mathcal{M}$  varie seul. Traçons la courbe dont  $\mathcal{M} - Q\rho$  serait l'ordonnée et  $m$  l'abscisse. Les signes  $\pm$  correspondent aux deux périodes de l'élévation de la cage pleine; l'un comprend l'élévation de cette cage depuis le fond du puits jusqu'au point de rencontre des deux cages, l'autre l'élévation de la même cage depuis ce point jusqu'à l'orifice du puits. On peut supprimer le double signe en attribuant successivement à  $m$  des valeurs positives et négatives.

Nous voyons que la courbe passe par l'origine et est symétrique par rapport à ce point; elle coupe l'axe des  $x$  en deux autres points; car pour  $m$  très-grand, le second membre de l'équation (1) est négatif, et pour  $m$  très-petit, on peut faire en sorte qu'il soit positif.

Il suffit pour cela que  $\rho$  soit assez petit. On peut même s'arranger de manière à ce que la valeur de  $m$  correspondant à  $x=0$  soit plus petite que  $\frac{L}{4\pi\rho}$ , c'est-à-dire de manière à ce que cette valeur de  $m$  soit plus petite que le nombre de tours nécessaire à l'élévation de la cage jusqu'à l'orifice du puits.

La courbe aura donc la forme de la fig. 1, Pl III, où AC est supposé égal à  $\frac{L}{4\pi\rho}$ ; la tangente au point, dont l'abscisse est D, est parallèle à l'axe des  $x$ ; le cas le plus favorable sera celui où DH = CK, puisque la courbe ne peut couper

qu'une fois l'axe des  $x$  positifs; l'expression de  $\rho$  qui donne cette solution est

$$\rho = \sqrt{\frac{(Q + 2q + pL)\varepsilon}{8\pi p} + \sqrt{\frac{(Q + 2q + pL)^2 \varepsilon^2}{64\pi^2 p^2} + 0,00781 \frac{L^2 \varepsilon^2}{\pi^2}},$$

les rayons extrêmes des bobines seront

$$r = \rho - \frac{L\varepsilon}{4\pi\rho}, \quad R = \rho + \frac{L\varepsilon}{4\pi\rho},$$

et le nombre total de tours de l'arbre dans une manœuvre complète est  $\frac{L}{2\pi\rho}$ .

Le maximum de différence entre le moment de la résistance et le moment moyen est égal à

$$(Q + q + pL)r - qR - Q\rho,$$

de sorte que la valeur du rapport

$$\frac{(Q + q + pL)r - qR - Q\rho}{Q\rho}$$

exprime en quelque sorte le degré de perfection que l'on peut obtenir.

*Câble de section variable et d'épaisseur constante.* — Supposons maintenant le câble d'épaisseur constante et de section variable.

Nous avons vu que si  $p'$  est le poids de l'unité de section de câble par mètre courant,  $\Omega_0$  la section initiale,  $\Omega_x$  la section à la distance  $x$  de l'extrémité du câble,  $\Theta_x$  le poids de la longueur  $x$  du câble compté à partir de l'extrémité, on a :

$$\Omega = \Omega_0 e^{\frac{p'x}{P}},$$

$$P\Omega_0 = Q + q, \quad \Theta_x = (Q + q) \left( e^{\frac{p'x}{P}} - 1 \right).$$

Les moments des forces agissant sur l'arbre des bobines après  $m$  révolutions seront

$$(\rho + m\varepsilon)(Q + q)e^{\frac{p'}{P}x_1}, \quad (\rho - m\varepsilon)\left[(Q + q)e^{\frac{p'}{P}x_2} - Q\right]$$

avec les conditions

$$x_1 = \frac{L}{2} + \frac{L^2\varepsilon}{16\pi\rho^2} - 2\pi\left(m\rho + \frac{m^2\varepsilon}{2}\right),$$

$$x_2 = \frac{L}{2} + \frac{L^2\varepsilon}{16\pi\rho^2} + 2\pi\left(m\rho - \frac{m^2\varepsilon}{2}\right),$$

la différence des moments aura pour valeur

$$\begin{aligned} \mathcal{M} - Q\rho &= \rho(Q + q)e^{\frac{p'}{P}\left(\frac{L}{2} + \frac{L^2\varepsilon}{16\pi\rho^2}\right)} - \frac{p'\pi m^2\varepsilon}{P}\left(e^{-\frac{2p'\pi m\rho}{P}} - e^{\frac{2p'\pi m\rho}{P}}\right) + \\ &+ m\varepsilon(Q + q)e^{\frac{p'}{P}\left(\frac{L}{2} + \frac{L^2\varepsilon}{16\pi\rho^2}\right)} - \frac{p'\pi m^2\varepsilon}{P}\left(e^{-\frac{2p'\pi m\rho}{P}} + e^{\frac{2p'\pi m\rho}{P}}\right) - m\varepsilon Q. \end{aligned}$$

Si l'on développe en série l'exponentielle  $e^{\frac{p'}{P}x}$ , et que l'on attribue à  $P$  des valeurs indéfiniment croissantes, on retrouve l'équation (1) comme on pouvait le prévoir, puisque l'hypothèse d'une valeur infinie attribuée à  $P$  revient à considérer la section comme constante.

Pour abrégé, posons

$$B = (Q + q)e^{\frac{p'}{P}\left(\frac{L}{2} + \frac{L^2\varepsilon}{16\pi\rho^2}\right)} b = \frac{p'\pi}{P},$$

l'équation des moments devient :

$$\begin{aligned} \mathcal{M} - Q\rho &= \rho B e^{-bm^2\varepsilon}(e^{-2b\rho m} - e^{2b\rho m}) + \\ &+ m\varepsilon B e^{-bm^2\varepsilon}(e^{-2b\rho m} + e^{2b\rho m}) - m\varepsilon Q. \end{aligned}$$

Dans le cas d'un câble en aloès, on aurait

$$p' = 0,1, \quad P = 70, \quad \varepsilon = 0,03, \quad 400 < L < 1100.$$

Le terme  $2b\rho m$  sera donc à peu près égal à 0,20\rho et  $m$  sera plus petit que  $\frac{L}{4\pi\rho}$  qui restera lui-même compris entre les limites  $\frac{44}{\rho}$  et  $\frac{16}{\rho}$ , et comme \rho sera au moins égal à 0,80 dans le premier cas et à 2 dans le second, ces limites sont à peu près égales à 20 dans les deux cas; par conséquent  $bm^2\varepsilon$  sera toujours inférieur à 0,063 et  $2b\rho m$  sera plus petit que 0,84 en admettant pour \rho la valeur limite évidemment exagérée de 4.

Il résulte de là que dans le développement

$$e^{bm^2\varepsilon} = 1 + \frac{bm^2\varepsilon}{1} + \frac{(bm^2\varepsilon)^2}{2} + \dots$$

On peut négliger le quatrième terme.

Dans le développement de  $e^{2b\rho m}$ , on ne pourra au contraire négliger que le septième terme.

En remplaçant les exponentielles par leurs développements, réduits aux termes que nous venons d'indiquer et effectuant les calculs, nous aurons la relation

$$\mathcal{M} - Q\rho = Vm^9 + Tm^7 + Hm^5 + Mm^3 + Nm,$$

ou

$$\frac{V}{B} = \frac{4b^7\rho^6\varepsilon^2}{15} + \frac{2}{3}b^6\rho^4\varepsilon.$$

$$\frac{T}{B} = \frac{16}{5}b^6\rho^6\varepsilon - \frac{8}{5}b^5\varepsilon^2\rho^4 + 2b^4\rho^2\varepsilon^3,$$

$$\frac{H}{B} = -\frac{8}{15}b^5\rho^6 + 4b^4\rho^4\varepsilon - 6b^3\rho^2\varepsilon^2 + b^2\varepsilon^3$$

$$\frac{M}{B} = -\frac{8}{3}b^3\rho^4 + 8b^2\rho^2\varepsilon - 2b\varepsilon^2,$$

$$\frac{N}{B} = -4b\rho^2 + 2\varepsilon - \frac{Q}{B}\varepsilon.$$

Pour que la courbe des moments ait la forme que nous

avons reconnue être la meilleure, il faut que le second membre de l'équation pour la valeur  $m'$  de  $m$ , qui rend ce second membre maximum, ait une valeur égale et de signe contraire à celle qu'il prend en mettant à la place de  $m$  sa valeur maximum  $n$ , correspondant à l'arrivée des cages à leurs positions extrêmes; c'est-à-dire que nous devons chercher à obtenir l'égalité (voir *fig. 1*)

$$HD = CK,$$

Les points C et D étant tels que

$$AD = m', \quad AC = n,$$

et la tangente au point H étant horizontale; enfin  $n$  est le nombre de tours de la bobine, depuis le moment de la rencontre des cages jusqu'à l'arrivée de la cage pleine à l'orifice du puits.

Les équations qui exprimeront ces conditions seront :

$$(2) \begin{cases} 9Vm'^8 + 7Tm'^6 + 5Hm'^4 + 3Mm'^2 + N = 0, \\ Vm'^9 + Tm'^7 + Hm'^5 + Mm'^3 + Nm' + F = 0, \end{cases}$$

où F représente l'expression suivante :

$$F = Vn^9 + Tn^7 + Hn^5 + Mn^3 + Nn.$$

Il serait difficile de tirer de ces relations la valeur de  $m'$ ; mais nous profiterons de ce que les termes de degré élevé ont des coefficients très-faibles (\*) qui les rendent négligeables quand il s'agit de déterminer l'instant où la fonction passe

(\*) Il est facile de s'assurer que l'erreur commise en négligeant les termes  $Vm'^9 + Tm'^7 + Hm'^5$  est très-faible; en effet, le terme dont la valeur est la plus grande dans le développement de cette expression est  $Bb^2\epsilon^3m'^3$ , et en prenant les données de l'application numérique que nous faisons plus loin, on trouve que ce terme est à peu près égal aux 0,015 de  $Bm'^3$ .

par un maximum, et que le but à atteindre est de connaître la valeur de ce maximum; les fonctions varient peu au moment de leur passage par un maximum, et par conséquent une petite erreur sur la valeur de  $m'$  en donnera une très-faible sur la valeur de la fonction au moment de son maximum.

Nous admettrons donc qu'on doit satisfaire aux équations suivantes :

$$Mm'^3 + Nm' + F = 0, \quad F = Mn^3 + Nn, \\ 3Mm'^2 + N = 0,$$

qui donnent

$$27MF^2 + 4N^3 = 0,$$

ou en remplaçant F par sa valeur

$$(3) \quad \frac{2}{3^{\frac{3}{2}}} \left( \frac{-N}{Mn^2} \right)^{\frac{3}{2}} - \frac{N}{Mn^2} - 1 = 0.$$

Or il est évident que le rapport  $\frac{N}{M}$  est négatif; si donc  $z$  est un nombre positif, nous pouvons poser

$$z = -\frac{N}{Mn^2},$$

et l'équation (3) devient

$$\frac{2}{3^{\frac{3}{2}}} z^{\frac{3}{2}} + z - 1 = 0,$$

dont la racine est égale à 0,745.

On déduit de là pour  $m'$  la valeur

$$m' = n \sqrt{\frac{0,745}{5}} = \frac{n}{2}.$$

Nous déterminerons  $\rho$  au moyen de la seconde des équations

tions (2) qui devient, en effectuant les calculs,

$$(4) \quad CB\rho^6 - DB\rho^4 + E\rho^4 + GB\rho^2 - IB = 0,$$

en posant :

$$C = -0,014041 b^5 L^4 + 12,094 b^3 L^2 + 3819,7 b,$$

$$D = 0,000521575 b^6 L^6 \varepsilon + 0,105509 b^4 L^4 \varepsilon + 36,285 b^2 L^2 \varepsilon + 1909,85 \varepsilon,$$

$$E = 954,92 Q \varepsilon,$$

$$G = -0,0000027555 b^7 L^8 \varepsilon^2 + 0,00045448 b^5 L^6 \varepsilon^2 + 0,157965 b^3 L^4 \varepsilon^2 + 9,070 b L^2 \varepsilon^2,$$

$$I = 0,000006858 b^6 L^8 \varepsilon^3 + 0,00052586 b^4 L^6 \varepsilon^3 + 0,026327 b^2 L^4 \varepsilon^3.$$

Enfin si l'on pose

$$B' = (Q + g)e^{\frac{p'l}{2P}}, \quad \mu = \frac{p'L^2\varepsilon}{16\pi P},$$

on peut remplacer B par l'expression

$$B = B' \left( 1 + \frac{\mu}{\rho^2} + \frac{\mu^2}{1.2.\rho^4} + \frac{\mu^3}{1.2.3.\rho^6} \right)$$

qui, substituée dans l'équation (4), nous donne une équation du 12<sup>e</sup> degré en  $\rho$ .

$$(5) \quad \left\{ \begin{aligned} & C\rho^{12} + \left( C\mu - D + \frac{E}{B'} \right) \rho^{10} + \left( \frac{C\mu^2}{1.2} - D\mu + G \right) \rho^8 + \\ & + \left( \frac{C\mu^3}{1.2.3} - \frac{D\mu^2}{1.2} + G\mu - I \right) \rho^6 + \left( -\frac{D\mu^3}{1.2.3} + \frac{G\mu^2}{1.2} - I\mu \right) \rho^4 + \\ & + \left( \frac{G\mu^3}{1.2.3} - \frac{I\mu^2}{1.2} \right) \rho^2 - \frac{I\mu^3}{1.2.3} = 0. \end{aligned} \right.$$

On aura du reste une assez grande approximation en ne conservant que les trois premiers termes, comme on le verra plus loin dans l'application que nous ferons de ces formules à un cas particulier; et l'on n'a alors à résoudre

qu'une équation bicarrée qui donne immédiatement la valeur de  $\rho$ .

*Câble de section variable et d'épaisseur variable d'une manière continue.* — Nous avons supposé jusqu'ici l'épaisseur du câble constante. Admettons maintenant que cette épaisseur constante croît d'une manière continue et proportionnellement à la longueur.

Appelons S la longueur du câble dont les deux extrémités auraient des épaisseurs doubles l'une de l'autre,  $\varepsilon_0$  l'épaisseur à l'extrémité libre à laquelle la cage est suspendue,  $\varepsilon_1$  l'épaisseur au point du câble situé à une distance  $l_1$  de cette extrémité.

Dans l'hypothèse que nous venons de faire, on aura

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_0 + \varepsilon_0 \frac{l_1}{S}.$$

Considérons une bobine dont l'axe est en O (fig. 2); le câble est enroulé de A en B. La surface de la section de la bobine, couverte par le câble, est sensiblement égale à

$$\pi(R^2 - r^2).$$

En R, r sont les rayons OA, OB comptés depuis l'axe O jusqu'au milieu de l'épaisseur du câble en A et en B.

Si nous déroulons le câble sur une surface plane, il formera une sorte de long trapèze B'A' (fig. 3), dont les côtés parallèles B'B'', A'A'' seront égaux aux épaisseurs extrêmes du câble; au point E' situé à une distance l de l'extrémité B', l'épaisseur E'E'' du câble sera

$$\varepsilon_0 + \frac{\varepsilon_0 l}{S},$$

de sorte que la surface du trapèze aura pour expression

$$\int_0^L \varepsilon_0 \left( 1 + \frac{l}{S} \right) dl,$$

et l'on a par conséquent l'égalité

$$\pi(R^2 - r^2) = \int_0^L \varepsilon_0 \left(1 + \frac{l}{S}\right) dl = \varepsilon_0 \left(L + \frac{L^2}{2S}\right).$$

Soit  $\rho$  le rayon d'enroulement au moment où une longueur  $L_1$  du câble est déjà déroulée, nous aurons les relations

$$(6) \quad \begin{cases} \pi(R^2 - \rho^2) = \varepsilon_0 \left(L_1 + \frac{L_1^2}{2S}\right), \\ \pi(\rho^2 - r^2) = \varepsilon_0 \left(L - L_1 + \frac{L^2 - L_1^2}{2S}\right), \end{cases}$$

en négligeant dans la seconde un terme très-faible et sans influence sur le résultat.

Si le rayon  $\rho$  correspond précisément à l'instant où les deux cages se rencontrent dans le puits, on doit avoir les relations

$$L_1 = \pi n(R + \rho), \quad L - L_1 = \pi n(\rho + r),$$

et par suite

$$(7) \quad L = \pi n(R + 2\rho + r).$$

Ces valeurs, substituées dans les équations (6), donnent

$$R - \rho = n\varepsilon_0 \left(1 + \frac{L_1}{2S}\right), \quad \rho - r = n\varepsilon_0 \left(1 + \frac{L + L_1}{2S}\right),$$

et ces équations peuvent se mettre, en remplaçant  $L_1$  par sa valeur, sous la forme

$$(8) \quad \begin{cases} R - 2\rho + r = -\frac{n\varepsilon_0 L}{2S}, \\ R - r = 2n\varepsilon_0 + \frac{n\varepsilon_0 L}{S} + \frac{n^2\varepsilon_0\pi(R + \rho)}{S}. \end{cases}$$

On tire de ces relations et de l'équation (7) les expressions de  $R$ ,  $r$ ,  $n$  en fonction de  $\rho$  :

$$n = \frac{4\rho S}{L\varepsilon_0} \left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{L^2\varepsilon_0}{8\pi\rho^2 S}}\right),$$

$$R = \frac{\rho + n\varepsilon_0 + \frac{n^2\pi\rho\varepsilon_0}{2S}}{1 - \frac{n^2\pi\varepsilon_0}{2S}},$$

$$(9) \quad r = 2\rho - \frac{nL\varepsilon_0}{2S} - \frac{\rho + n\varepsilon_0 + \frac{n^2\pi\rho\varepsilon_0}{2S}}{1 - \frac{n^2\pi\varepsilon_0}{2S}}.$$

En négligeant des quantités très-petites et remplaçant  $n$  par sa valeur en fonction de  $L$  et de  $\rho$ , on arrive facilement aux expressions plus commodes pour la suite du calcul :

$$(10) \quad n = \frac{L}{4\pi\rho} \left(1 + \frac{L^2\varepsilon_0}{32\pi\rho^2 S}\right),$$

$$R = \rho + \psi - \theta - \varphi, \quad r = \rho - \psi - \xi - 3\theta + \varphi,$$

dans lesquelles

$$\theta = \frac{L^2\varepsilon_0}{1024\pi^2\rho^3 S^2}, \quad \psi = \frac{L\varepsilon_0}{4\pi\rho}, \quad \xi = \frac{L^2\varepsilon_0}{8\pi\rho S},$$

$$\varphi = \left(3 + \frac{L}{2}\right) \frac{L^3\varepsilon_0^3}{4096\pi^3\rho^3 S^2}.$$

Supposons maintenant que nous remplaçons  $\rho$  par  $\rho + \delta$ , il vient

$$(11) \quad \begin{cases} R' = \rho + \psi - \theta - \varphi + \delta \left(1 - \frac{\psi}{\rho} + \frac{3\theta}{\rho} + \frac{5\varphi}{\rho}\right), \\ r' = \rho - \psi - \xi - 3\theta + \varphi + \delta \left(1 + \frac{\psi}{\rho} + \frac{\xi}{\rho} + \frac{9\theta}{\rho} - \frac{5\varphi}{\rho}\right). \end{cases}$$

Dans le cas d'un câble d'épaisseur constante, le moment moyen a pour valeur  $Q\rho$ , et la différence entre le moment

extrême et le moment moyen est

$$\mathfrak{M} - Q\rho = (\rho + n\varepsilon_0)(Q + q) - (\rho - n\varepsilon_0)(\Theta + q) - Q\rho,$$

où  $\Theta$  représente le poids total du câble.

Les quantités correspondantes dans le cas du câble à épaisseur variable seront

$$\mathfrak{M}' - Q(\rho + \delta) = R'(Q + q) - r'(\Theta + q) - Q(\rho + \delta).$$

Nous pensons que l'on peut admettre que l'on sera dans les conditions les plus favorables si l'on a la relation

$$\frac{\mathfrak{M} - Q\rho}{Q\rho} = \frac{\mathfrak{M}' - Q(\rho + \delta)}{Q(\rho + \delta)},$$

ce qui conduit à l'équation

$$(12) \frac{\delta}{\rho} = \frac{(\Theta + q)\xi + (3\Theta + 2q - Q)\theta + (\Theta - Q)\varphi}{\rho(Q - \Theta) + (\Theta + q)\xi + (3\Theta + 6q - 3Q)\theta + (\Theta + 2q + Q)(2\psi - 5\varphi)}$$

Nous déduirons de là la valeur  $\delta$  et par suite celle du rayon moyen  $\rho_1$ ,

$$\rho_1 = \rho + \delta.$$

Nous tirerons alors de l'équation (10) le nombre  $n$  de tours en mettant pour  $\rho$  la valeur  $\rho_1$ , et l'une des équations (9), (11) nous donnera le rayon  $r$  de la bobine.

En pratique, il est impossible de fabriquer des câbles dans les conditions théoriques que nous venons d'étudier. On fait une série de câbles partiels ayant chacun une certaine section constante; nous avons vu que le poids d'un tel câble serait

$$C \left( \frac{P}{P - p'l} \right)^{\frac{L}{l}} - C$$

au lieu de

$$C e^{\frac{p''L}{P}} - C;$$

mais nous pouvons attribuer à  $p''$  une valeur telle que ces poids soient égaux. Il faut pour cela que

$$(13) p'' = -\frac{P}{l} \log \operatorname{nep} \left( 1 - \frac{p'l}{P} \right) = p' + \frac{p'^2 l}{2P} + \frac{p'^3 l^2}{3P^2} \dots$$

$p'$  est le poids réel du mètre courant de câble de section égale à l'unité,  $p''$  le poids théorique d'un câble à section continuellement décroissante qui aurait pour une même longueur le même poids total que le précédent. Remarquons que  $p''$  est indépendant de  $L$  et que, par conséquent, l'égalité de poids aura lieu pour une valeur donnée de  $p'$  et une valeur trouvée de  $p''$ , quelle que soit la longueur  $L$  du câble, et à la fin de chacun des tronçons de longueur  $l$ .

De même en pratique, l'épaisseur ne varie pas d'une manière continue, mais seulement de distance en distance; appelons  $\alpha$  l'accroissement d'épaisseur de chacune des parties successives du câble de longueur  $l$ ; nous avons vu que si l'on supposait le câble enroulé sur la bobine et que si l'on faisait une section perpendiculaire à l'axe, la surface totale de la section occupée par le câble était égale à

$$\pi(R^2 - r^2) = \varepsilon_0 L + \frac{\varepsilon_0 L^2}{2S}.$$

Si l'on a  $n$  tronçons successifs de câble d'épaisseurs

$$\varepsilon_0, \quad \varepsilon_0 + \alpha, \quad \dots, \quad \varepsilon_0 + (n-1)\alpha,$$

et de longueur  $l$ , la surface de la section faite dans les mêmes conditions sera égale à

$$\pi(R^2 - r^2) = \varepsilon_0 n l + \frac{n(n-1)}{2} \alpha l.$$

Nous devons chercher un câble à section d'épaisseur variable d'une manière continue, tel que, enroulé, il occupe dans la section de la bobine la même surface que le câble

discontinu que l'on emploie réellement; c'est-à-dire qu'il faut chercher à satisfaire aux conditions

$$R_1 = R, \quad r_1 = r, \quad nl_1 = L,$$

ce qui aura lieu si

$$\frac{\varepsilon_0 L^2}{2S} = \frac{\alpha n(n-1)}{2} l_1,$$

d'où l'on tire

$$(14) \quad S = \frac{\varepsilon_0 L}{\alpha} \frac{l_1}{L - l_1}.$$

Cette relation donnera S; ainsi l'on connaîtra P, p', L, l, l<sub>1</sub>, qui sont les données; on en déduira S et p''; on calculera le rayon moyen ρ le plus favorable pour le câble dont les données seraient

$$P, \quad p = p'', \quad Q, \quad q, \quad \theta.$$

On calculera ensuite δ en prenant pour S la valeur que fournit l'équation (14), et le rayon ρ + δ sera le rayon moyen, ou le bras de levier à l'extrémité duquel devront agir les cages au moment de leur rencontre.

*Application.* — Nous allons appliquer les résultats auxquels nous sommes parvenus à un câble plat en fil d'acier; nous admettrons qu'un fil de cette nature de 1 centimètre carré de section peut supporter une charge de travail de 1.525 kilogrammes correspondant à une charge minimum de rupture de 8.400 kilogrammes, en admettant pour la charge de travail le  $\frac{1}{6}$  de la charge de rupture et considérant comme utiles les 95 p. 100 seulement de la section des fils.

Nous admettrons, en outre, que le poids du câble est de 1<sup>k</sup>,015 par centimètre carré de section de fil et par mètre, et que la section du câble est égale à 3,65 fois la section des fils.

Ces données sont celles des câbles en acier manganésé de la corderie de Hornu en Belgique.

Supposons une cage vide du poids de . . . . .	kilog.	1.900
et contenant quatre wagons du poids de 210 kil. . . . .		840
Nous aurons pour q la valeur. . . . .		2.740
la charge des wagons étant de 450 kil., on a pour Q		1.800

En outre

$$P = 1.525 \text{ kil.}, \quad p' = 1.015, \quad l = 200, \quad L = 1.000 \text{ mètres.}$$

Dans ces conditions le poids du câble formé de tronçons de 200 mètres sera de 5.887 kilogrammes.

La relation (13) donne

$$p'' = 1.101,$$

et le poids du câble à section variable d'une manière continue sera de 5.884 mètres; la formule que nous avons adoptée est donc suffisamment approchée. Nous admettrons enfin que l'épaisseur varie de 0,017 à 0,021, soit de 1 millimètre par 200 mètres, ce qui revient à supposer, en vertu de la relation (14),

$$S = 4.250.$$

Nous chercherons d'abord la valeur de ρ pour le câble d'épaisseur constante de 17 millimètres.

On trouve

$$b = 0,0026105, \quad \mu = 0,28105, \quad B' = 6.878,10,$$

et l'équation (5) devient

$$10,185\rho^{12} - 29,645\rho^{10} - 2.256\rho^8 \dots = 0;$$

d'où l'on tire

$$\rho = 1,7276.$$

On déduit de là

$$n = 46,061, \quad m' = 23,0305,$$

et les rayons de la bobine après  $0, m', n, n + m', 2n$  tours sont égaux à

$$2,5106; \quad 2,1191; \quad 1,7276; \quad 1,3361; \quad 0,9446;$$

les longueurs de câble déroulé sur l'une des bobines après  $0; m', n, n + m', 2n$  tours seront

$$0; \quad 334^m,98; \quad 613^m,51; \quad 854^m,98; \quad 1.000^m,$$

et les poids correspondants à  $0, m', n + m', 2n$  tours seront

$$0; \quad 1.457^k,34; \quad 4.544^k,54; \quad 5.884^k;$$

les différences des moments après  $0, m', n$  tours auront pour valeur

$$2.966,41 = 5.109,68 - 143,27,$$

$$5.243,69 = 5.109,68 + 134,01,$$

$$5.109,68.$$

Le rapport de l'écart maximum au moment moyen est donc de  $0,045$ ; ceci nous montre que les câbles à section variable permettent d'équilibrer la résistance beaucoup mieux que les câbles à section constante; nous prendrons comme terme de comparaison le cas traité par M. Combes dans son *Traité d'exploitation des mines* (tome III, p. 200). Pour un puits de 400 mètres de profondeur, desservi par un câble plat à section constante, l'écart est de  $145,50$  pour un moment moyen de  $1.260$ , et le rapport de ces quantités est de  $0,115$  environ.

Dans le cas où l'épaisseur du câble varierait et augmenterait, par exemple de 1 millimètre par 200 mètres, on aurait

$$S = 4.259, \quad \xi = 0,092122, \quad \psi = 0,78504, \quad \varphi = 0,069991, \\ \theta = 0,00030701, \quad \delta = 0,049, \quad \rho = 0,084.$$

Pour calculer  $\delta$  on peut, dans la relation (12), négliger

le second terme du numérateur et le troisième du dénominateur, à cause de la valeur très-faible du coefficient  $\theta$ .

Nous pouvons maintenant déterminer le rayon moyen de la bobine le plus favorable,

$$\rho = 1,7276 + 0,084 = 1,812,$$

dans le cas d'un câble à section et à épaisseur variable d'une manière discontinue. L'équation (10) nous donnera, au moyen de cette valeur de  $\rho$ , le nombre de tours de la bobine

$$n = 44,45,$$

et le moment moyen  $3461,6$ .

*Emploi de l'air comprimé comme moteur.* — On peut employer pour élever une charge deux moyens autres que celui que nous venons d'étudier: l'un consiste à refouler de l'air comprimé sous la cage, renfermée dans un tube où elle agit comme piston; l'autre à faire le vide au-dessus de la cage placée dans les mêmes conditions. Examinons d'abord le premier moyen.

Un tube vertical (Voir *fig. 4*) AB de hauteur L et de rayon R contient la cage piston F; il communique par sa partie inférieure avec un second tube vertical de même hauteur et de rayon r; celui-ci est relié à la machine soufflante M, qui puise l'air dans un réservoir étanche N.

Soient en outre :

V le volume en mètres cubes du réservoir N;

p la pression de l'air dans le réservoir, la pression atmosphérique étant prise pour unité;

P la pression à l'orifice du puits;

Q le poids en kilogrammes de la charge utile de la cage;

q le poids en kilogrammes de la cage et des wagons vides;

K un coefficient plus petit ou plus grand que l'unité sui-

vant le sens du mouvement de la cage, et dépendant du frottement de la cage contre les parois du tube ;

$p_0$  la pression dans le réservoir, lorsque la cage est au bas du tube, au commencement d'une manœuvre ;

$X$  la pression de l'air à l'extrémité inférieure du tube AB lorsque la cage est déjà élevée jusqu'à une hauteur  $x$ , comptée à partir de cette extrémité.

Si dans un tube vertical la pression de l'air est  $y$  en un certain point, en un autre point situé à une distance  $l$  au-dessous du premier, la pression sera

$$y_1 = ye^{al}$$

où

$$a = \frac{1}{770 \times 10,33},$$

et le volume d'air contenu dans l'intervalle compris entre les deux points, ramené à la pression égale à l'unité, sera

$$\frac{\pi R^2 y}{a} (e^{al} - 1).$$

Pour que la cage, parvenue à une hauteur  $x$ , continue son mouvement ascensionnel, il faut que la contrepression sous la cage soit égale à la quantité :

$$Pe^{a(L-x)} + bK \frac{Q+q}{\pi R^2},$$

dans laquelle

$$K = 1,1, \quad b = \frac{1}{10,350},$$

le coefficient  $b$  provient de ce que  $R$  est exprimé en mètres,  $Q, q$  en kilogrammes, et de ce que la pression est représentée par son rapport à la pression atmosphérique prise pour unité.

La pression au bas du tube AB sera au même instant

$$Pe^{aL} + bK \frac{Q+q}{\pi R^2} e^{ax}.$$

Le volume d'air contenu dans la partie BF du tube, et mesuré à la pression égale à l'unité sera

$$(15) \quad \frac{\pi R^2 P}{a} e^{aL} (1 - e^{-ax}) + \frac{bK(Q+q)}{a} (e^{ax} - 1).$$

Au même instant, l'air à la partie supérieure du petit tube CD aura une pression

$$(16) \quad P + bK \frac{Q+q}{\pi R^2} e^{a(x-L)},$$

et le volume d'air contenu dans ce tube CD sera

$$\frac{\pi r^2 P}{a} (e^{aL} - 1) \times \frac{bK(Q+q)r^2}{aR^2} e^{ax} (1 - e^{-aL}).$$

La machine soufflante devra donc puiser l'air à la pression  $p$  dans le réservoir N, et le refouler sous la pression (16), ce qui, en désignant par  $v$  le volume d'air aspiré, exprimé en mètres cubes et par  $k$  le coefficient de rendement de la machine, exige un travail de

$$(17) \quad dT_x = 10.000 k v p \log. \text{ nep. } \frac{\pi R^2 P + bK(Q+q)e^{a(x-L)}}{\pi R^2 P}.$$

Le volume d'air du réservoir, qui était  $Vp$ , ne sera plus que  $(V - v)p$  ; d'autre part la cage sera soulevée par l'air qu'on vient de lancer dans le tube DCF, et l'on a la relation

$$v p = \pi R^2 P e^{a(L-x)} dx + bK(Q+q) \left( 1 + \frac{r^2}{R^2} - \frac{r^2}{R^2} e^{-aL} \right) e^{ax} dx.$$

Au commencement de la manœuvre, la pression était  $p_0$ , dans le réservoir et dans le tube CD ; ce dernier contenait donc un volume d'air

$$\frac{\pi r^2 p_0}{a} (e^{aL} - 1),$$

La quantité d'air contenu dans le réservoir et dans les tubes au-dessous de la cage ne varie pas pendant toute une opération, de sorte que l'on a pour déterminer  $p$  la relation

$$Vp_0 + \frac{\pi r^2 \rho_0}{a} (e^{aL} - 1) = Vp + \frac{\pi R^2 P}{a} (1 - e^{-ax}) e^{aL} + \frac{\pi r^2 P}{a} (e^{aL} - 1) + \frac{bK(Q+q)}{a} \left( e^{ax} - 1 + \frac{r^2}{R^2} e^{ax} - \frac{r^2}{R^2} e^{a(x-L)} \right).$$

En mettant la valeur de  $p$  tirée de cette équation dans le second membre de (17), nous aurons enfin l'expression définitive du travail correspondant à une élévation de la cage :

$$(18) \quad dT_x = (Me^{-ax} + Ne^{ax}) \log nep \frac{P + He^{ax}}{S - Le^{ax} + Fe^{ax} - Ge^{ax}} dx,$$

en posant,

$$M = 10.000 k\pi R^2 P e^{aL},$$

$$N = 10.000 kbK(Q+q) \left( 1 + \frac{r^2}{R^2} + \frac{r^2}{R^2} e^{-aL} \right),$$

$$H = \frac{bK(Q+q)}{\pi R^2} e^{-aL},$$

$$G = \frac{bK(Q+q)}{aV} \quad F = \frac{\pi R^2 P}{aV} e^{aL} \quad L = G \frac{r^2}{R^2} (1 - e^{-aL}),$$

$$S = p_0 - F + G + \frac{\pi r^2}{aV} (e^{aL} - 1) (p_0 - P).$$

Pour que le réservoir puisse être utile, il devrait avoir une très-grande capacité. Soit en effet  $p_1$  la pression dans le réservoir, quand la cage est arrivée à l'orifice du puits, mettons en communication directe le réservoir et le tube DCBF, l'air comprimé se répandra dans le réservoir, puis la cage descendra en refoulant l'air dans le réservoir, et comme son poids est  $q$ , la contre-pression sera  $\frac{Kbq}{\pi r^2}$ ; la pres-

sion dans le réservoir ne pourra donc pas dépasser

$$1 + \frac{Kbq}{\pi r^2}.$$

D'autre part le tube BF contenait un volume d'air mesuré à la pression un égal à

$$\pi \frac{R^2}{a} (e^{aL} - 1) \left( P + \frac{bK(Q+q)}{\pi R^2} \right),$$

V devra donc satisfaire à l'inégalité

$$Vp_1 + \frac{\pi R^2}{a} (e^{aL} - 1) \left( P + \frac{bK(Q+q)}{\pi R^2} \right) < V \left( 1 + \frac{Kbq}{\pi r^2} \right),$$

ou en prenant une valeur approchée,

$$V > \frac{\pi R^2 L \left( P + \frac{bK(Q+q)}{\pi R^2} \right)}{1 + \frac{bKq}{\pi R^2} - p_1}.$$

Si  $p_1$  est égal à l'unité, et que l'on attribue à  $\frac{bKq}{\pi R^2}$  la valeur très-exagérée  $\frac{1}{2}$ , le réservoir devra avoir un volume supérieur au double de celui du tube AB.

En pratique, l'emploi d'un réservoir qui, sous d'aussi grandes dimensions, devra être étanche, présente des difficultés à peu près insurmontables.

On sera donc forcé de puiser l'air dans l'atmosphère, ce qui revient à supposer V infini; dans ces conditions l'équation (18) devient

$$dT_x = (Me^{-ax} + Ne^{ax}) \log. nep. \frac{P + He^{ax}}{p_0} dx,$$

dont l'intégrale est

$$(19) T_x = \frac{1}{a} (Ne^{ax} - Me^{-ax}) \log \text{nep} \frac{P}{p_0} + \frac{MH}{P} x + \frac{Pe^{-ax}}{aH} - \frac{NP}{aH} \left( 1 + \frac{H}{P} e^{ax} \right) - \left( 1 + \frac{H}{P} e^{ax} \right) \left( Ne^{ax} - \frac{MP}{H} \right) \log \text{nep} \left( 1 + \frac{H}{P} e^{ax} \right)$$

qu'on prendra entre les limites L et 0.

*Application.* — Plaçons-nous dans les mêmes conditions que précédemment, au point de vue du poids utile élevé à chaque opération. La cage qui devra porter quatre wagons devant en même temps servir d'obturateur sera nécessairement assez lourde. Admettons qu'elle pèse 2.800 kilogrammes. Nous aurons alors, en négligeant dans le calcul l'influence du petit tube de conduite d'air CD,

$$P = p_0 = 1 \quad Q = 1.800^k \quad g = 5.640^k \quad L = 1.000^m,$$

$$R = 0^m,70 \quad K = 1,1 \quad k = 1,4 \quad b = \frac{1}{10.350},$$

$$a = 0,0001266,$$

ce qui nous donne

$$T_x = 9.460.000^{\text{km}}$$

L'équation (15) nous permet de calculer le volume total d'air qui doit être lancé sous la cage; il est de 2.258 mètres cubes; si l'on veut tenir compte du petit tube CD, il faut multiplier ce nombre par la quantité,

$$1 + \frac{r^2}{R^2},$$

et si l'on suppose que  $r$  est le 0,1 de  $R$ , le volume d'air nécessaire augmentera de 0,01. Pour une durée de l'ascension de cinq minutes, on aurait un débit de  $7^{\text{m}^3},526$  par seconde, ce qui exigerait une section totale de  $7^{\text{m}^2},53$  pour les cylindres. Nous avons admis pour  $k$  la valeur peut-être un peu faible de 1,40 qui comprend à la fois les coeffi-

cients correspondant à la machine motrice et aux cylindres soufflants; mais ceux-ci devant fonctionner dans des conditions presque toujours identiques de pression et de contre-pression, on peut espérer d'obtenir un rendement très-favorable.

*Système atmosphérique.* — Examinons maintenant le système atmosphérique (fig. 5) qui consiste à faire un vide partiel au-dessus de la cage et qui a été proposé pour un puits du bassin d'Épinac. Un tube en tôle de 1<sup>m</sup>,60 de diamètre et de 7 à 8 millimètres d'épaisseur occupe toute la hauteur du puits; un piston double F, dont les deux plateaux sont distants de 3 à 4 mètres, est disposé de manière à recevoir un certain nombre de wagons étagés les uns au-dessus des autres dans la partie comprise entre les deux plateaux. On fait le vide au-dessus du piston; tout le système est entraîné jusqu'à la recette supérieure; là, on substitue aux wagons pleins des wagons vides et le piston redescend en vertu de son poids; on modère la vitesse en limitant la rentrée de l'air.

Nous n'entrerons pas dans le détail des appareils destinés à produire les manœuvres aux recettes; ces détails ne peuvent, malgré leur importance, offrir des difficultés sérieuses, et d'ailleurs une expérience faite à Épinac d'abord, puis à Lyon, a prouvé que les dispositions imaginées par M. Blanchet donnaient des résultats satisfaisants.

M. Blanchet paraît s'être proposé d'obtenir par le même appareil l'extraction du charbon et l'aérage de la mine; nous venons de voir comment on atteint le premier but; quand le piston s'élève, de l'air est aspiré au-dessous de lui et vient remplir le tube; un second tube de plus petit diamètre CD est placé à côté du premier et ne communique avec lui que pendant la descente du piston; durant cette période, la communication entre le grand tube et la mine est fermée; l'air refoulé par le piston dans sa chute, et qui avait été aspiré dans la mine pendant l'ascension précé-

dente, est donc obligé de s'écouler par le petit tube qui le déverse dans l'atmosphère.

Cette manière d'opérer présente un inconvénient, l'intermittence de l'aspiration et par suite de l'aérage; si l'on installait dans le puits deux appareils qui marcheraient alternativement, cet inconvénient disparaîtrait en partie; mais il serait bien difficile de régler les manœuvres de façon que jamais l'aspiration ne fût suspendue; et toute intermittence serait dangereuse dans les mines à grisou à cause des changements brusques de pression qui en seraient la suite. D'ailleurs, l'extraction ne pouvant continuer sans interruption, il faudrait une machine auxiliaire pour assurer l'aérage pendant les arrêts de l'extraction.

Laisant de côté ces considérations, nous allons étudier les conditions de l'emploi du système atmosphérique. La première question à examiner est celle de la résistance du tube; si tout son poids reposait sur le fond du puits, les dernières viroles seraient écrasées. M. Blanchet a adopté, paraît-il, une disposition qui rend le tube indépendant des petits mouvements des parois du puits et qui fait supporter par des madriers établis à quelques mètres de distance verticale les uns des autres le poids des tubes situés dans l'intervalle qui les sépare.

La contraction du tube sous l'action de la pression extérieure est négligeable, et ne sera pas de nature à gêner le mouvement du piston, dont le jeu doit nécessairement être assez étendu dans ses parties non élastiques.

Supposons le piston au bas du tube. Les wagons chargés sont mis en place; on fait marcher la machine aspirante. Il y a deux périodes à distinguer: la première dure jusqu'au moment où la pression dans le tube est descendue assez bas pour que le mouvement ascensionnel puisse avoir lieu; la seconde période finit à l'arrivée du piston à l'orifice supérieur du puits. Pendant la première, la pression varie beaucoup; pendant la seconde, elle change peu.

*Première période.* — Soit :

$p_2$  la pression au-dessous du piston à la fin de la première période;

$p_1$  la pression au-dessus du piston au même instant;

$C$  le poids total de la cage égal à  $Q + q$ ;

$K$  le coefficient relatif au frottement.

On a entre ces quantités la relation

$$bKC = \pi R^2 (p_2 - p_1),$$

où  $b$  est le coefficient dont nous avons déterminé la valeur dans le cas de l'extraction par l'air comprimé:  $p_1$  et  $p_2$  sont toujours exprimées par le rapport de la pression considérée à la pression atmosphérique prise pour unité.

$P$  est la pression à l'orifice du puits,  $L$  la profondeur du puits, et dans ces conditions,

$$p_2 = P e^{aL} - \alpha$$

Le coefficient  $a$  est égal, comme nous l'avons vu, à 0,00012658,  $\alpha$  est la diminution de pression qui résulte au bas du puits du mouvement de l'air aspiré pour l'aérage. Mais nous pouvons négliger ce terme et mettre  $p_2$  sous la forme plus commode

$$p_2 = 1 + \beta,$$

où  $\beta$  aura sensiblement la valeur

$$\beta = 0,0001266L;$$

la valeur de  $p_1$  devient donc

$$(20) \quad p_1 = 1 + \beta - \frac{bKC}{\pi R^2}.$$

A un instant quelconque la pression étant  $x$  dans le tube immédiatement au-dessus du piston, sera dans le même tube à l'orifice du puits

$$x_1 = (1 - \beta)x.$$

Appelons  $v$  le volume du cylindre de l'aspirateur; ce cylindre se remplira d'air à la pression  $x_1$ , et quand le piston décrira le mouvement inverse, cet air sera comprimé à la pression  $X$ , puis s'écoulera dans l'atmosphère; cette extraction d'un volume

$$mvx(1-\beta).$$

d'air nécessitera une production de travail

$$(21) \quad dT = 10.000kvx(1-\beta) \log. \text{ nep. } \frac{X}{(1-\beta)x}.$$

Le facteur  $m$  est introduit pour tenir compte des espaces nuisibles et du retard qu'éprouvent les mouvements des soupapes;  $k$  est le coefficient de rendement de la machine. Le volume d'air contenu dans le tube a diminué; la pression moyenne était  $x\left(1-\frac{\beta}{2}\right)$ , elle est devenue

$$(x-dx)\left(1-\frac{\beta}{2}\right);$$

mais on peut aussi la représenter par

$$x\left(1-\frac{\beta}{2}\right) - \frac{mvx(1-\beta)}{\pi R^2 L}.$$

En égalant ces deux quantités, nous en déduisons  $dx$

$$dx = \frac{v(1-\beta)x}{\mu}, \quad \mu = \frac{\pi R^2 L \left(1-\frac{\beta}{2}\right)}{m}.$$

Mettons à la place de  $v$  sa valeur en fonction de  $dx$  dans l'équation (21), il vient

$$dT = 10.000k\mu \left( \log. \text{ nep. } \frac{X}{(1-\beta)x} \right) dx,$$

dont l'intégrale

$$(22) \quad T_1 = 10.000k\mu x \left[ \log. \text{ nep. } \frac{X}{(1-\beta)x} + 1 \right]$$

sera prise entre les limites

$$(23) \quad x = 1 + \beta, \quad x = p_1,$$

dont nous avons déjà donné les valeurs.

*Deuxième période.* — Pendant la seconde période, la pression variera peu, ce qui nous permet de substituer aux formules exactes des formules approchées.

Le volume total d'air à extraire est

$$\pi R^2 L p_1 \left( 1 - \frac{\beta}{2} \right),$$

les valeurs extrêmes de la contre-pression sous le piston seront

$$p_2 = 1 + \beta - \alpha' - \alpha, \quad p'_2 = 1 - \alpha'' - \alpha.$$

$\alpha'$  et  $\alpha''$  dépendront de la vitesse d'ascension, du diamètre du tube, du frottement de l'air contre les parois et à l'entrée. Si la vitesse est faible, on peut les négliger de même que  $\alpha$ , et les contre-pressions extrêmes deviennent  $1 + \beta, 1$ . Les pressions extrêmes sur le piston devront donc être égales à

$$1 + \beta - \frac{bKC}{\pi R^2}, \quad 1 - \frac{bKC}{\pi R^2},$$

dont la moyenne est

$$(24) \quad p = 1 + \frac{\beta}{2} - \frac{bKC}{\pi R^2}.$$

Les pressions dans le tube à l'orifice du puits aux deux moments extrêmes de la deuxième période seront donc

$$\left( 1 + \beta - \frac{bKC}{\pi R^2} \right) (1-\beta), \quad 1 - \frac{bKC}{\pi R^2},$$

dont la moyenne est

$$p_3 = 1 - \frac{bKc}{\pi R^2} \left(1 - \frac{\beta}{2}\right).$$

D'autre part, le travail élémentaire

$$dT = 10.000 kvy \log. nep. \frac{X}{p_3}$$

correspond à la sortie du tube d'un volume d'air égal à  $mvp_3$ .  
Pour extraire le volume

$$\pi R^2 L p_1 \left(1 - \frac{\beta}{2}\right) = m \mu p_1.$$

il faudra donc un travail

$$T_2 = 10.000 k \mu p_1 \log. nep. \frac{X}{p_3}.$$

*Descente du piston.* — Voyons maintenant dans quelles conditions s'effectuera la descente du piston. Si elle a lieu avec une vitesse  $z$ , l'air s'échappera par l'orifice du petit tube de rayon  $r$ , avec une vitesse  $\frac{zR^2}{r^2}$ , et la pression à l'extrémité supérieure de ce tube sera

$$1 + \frac{R^2 az}{r^2 g};$$

Nous n'avons d'intérêt à connaître la pression sur la surface supérieure du piston qu'à l'arrivée du piston au bas du puits; nous ne tiendrons donc pas compte des pertes de charge dues au frottement, à l'étranglement des tuyaux de communication, aux changements de direction, etc. Si nous désignons par  $\alpha_1$  ces pertes de charges, par  $p'_2$  la contre-pression sous le piston, lorsque celui-ci est à une hauteur  $h$  au-dessus du fond du puits, nous aurons

$$p'_2 = \left[ \left(1 + \frac{R^2 az}{r^2 2g}\right) (1 + \beta) + \alpha_1 \right] \left(1 - \frac{\beta h}{L}\right).$$

A la descente, le poids du piston est  $q$ , le frottement agit en sens contraire de la pesanteur, de sorte que si  $K'$  est un coefficient plus petit que l'unité, et  $x$  la pression à la surface supérieure du piston, on aura

$$bK'q = \pi R^2 (p'_2 - x).$$

A la fin de la descente, il faudra supprimer la rentrée de l'air dans le grand tube pour détruire la vitesse du piston avant son arrivée à la recette inférieure; par conséquent, au dernier moment  $p'_2$  différera peu de  $1 + \beta$ , ce qui nous donnera pour la valeur correspondante  $p'_1$  de  $x$

$$(26) \quad p'_1 = 1 + \beta - \frac{bK'q}{\pi R^2}.$$

A la manœuvre suivante, le vide sera donc déjà fait en partie dans le grand tube, et l'intégrale qui exprime le travail dépensé dans la première période ne devra plus être prise qu'entre les limites

$$(27) \quad x_1 = p'_1, \quad x = p_1.$$

*Influence des fuites du tube.* — Nous avons supposé jusqu'ici qu'il n'y avait pas de fuite dans le tube et que celui-ci restait complètement étanche avec une différence de pression de l'extérieur à l'intérieur qui peut s'élever à  $\frac{2}{3}$  d'atmosphère. Or il est évident qu'on ne peut compter sur un résultat aussi parfait.

La quantité d'air qui pénétrera dans le tube dépendra de la différence des pressions de chaque côté du tube, différence dont la valeur moyenne est

$$\left(1 - \frac{\beta}{2}\right) (1 - x).$$

Désignons par  $\omega$  la section réduite des fuites sur toute la

longueur du tube, c'est-à-dire la fraction de la section totale réelle des fuites qui, multipliée par la vitesse théorique du gaz, donnera la quantité d'air entrant dans le tube pendant chaque seconde. Ce volume d'air sera égal à

$$\Lambda \omega \sqrt{1-x}$$

en posant

$$\Lambda = \sqrt{\frac{(2+\beta)g}{a}}$$

Nous savons que la pression baisse pendant une oscillation simple du piston de

$$(28) \quad dx = \frac{v(1-\beta)x}{\mu}$$

Dans le même temps, que nous désignerons par  $i$ , on extrait un volume d'air

$$mvx(1-\beta);$$

mais dans la nouvelle hypothèse, l'air extrait est remplacé en partie par celui qui passe par les fuites, de sorte qu'en réalité la quantité d'air contenue dans le tube n'aura diminué, par une oscillation simple de la machine, que de

$$mvx(1-\beta) - \Lambda \omega i \sqrt{1-x},$$

et par conséquent  $dx$  aura une valeur plus faible que (28)

$$dx = \frac{1}{m\mu} [mvx(1-\beta) - \Lambda \omega i \sqrt{1-x}],$$

ou en rapportant la variation de pression à un temps quelconque  $dt$ , et en remarquant que  $dx$  et  $dt$  doivent être de signe contraire,

$$(29) \quad dx = -\frac{1}{m\mu} \left[ \frac{mv(1-\beta)x}{\mu} - \Lambda \omega i \sqrt{1-x} \right] dt.$$

Dans le même temps, la machine extrait un volume d'air

$$\frac{mvxdt}{i},$$

en effectuant un travail

$$(30) \quad dT = + 10.000 kvx \frac{1-\beta}{i} \log. \text{ nep. } \frac{X}{x(1-\beta)} dt.$$

Éliminons  $dt$  entre les équations (29) et (30), nous trouvons

$$(31) \quad dT = -\frac{10.000 km\mu vx(1-\beta)}{mv(1-\beta)x - \Lambda \omega i \sqrt{1-x}} \log. \text{ nep. } \frac{X}{(1-\beta)x} dx.$$

Il est évident d'ailleurs que la machine fonctionnerait dans des conditions inadmissibles si la rentrée d'air n'était pas très-petite par rapport au volume d'air extrait, c'est-à-dire si la fraction

$$\frac{\Lambda \omega i \sqrt{1-x}}{mvDx}$$

n'était pas très-faible; nous pouvons donc écrire l'expression du travail (31) sous la forme plus simple

$$dT = -10.000 k\mu \left( 1 + \frac{\Lambda \omega i \sqrt{1-x}}{mv(1-\beta)x} \right) \log. \text{ nep. } \frac{X}{(1-\beta)x} dx.$$

En supposant une profondeur de 1.000 mètres,  $x$  sera compris entre 1 et 0,4; le logarithme népérien de  $x$  pourra donc être remplacé en commettant une erreur moindre que 0,006 par la suivante :

$$\frac{8}{3} \frac{x^3 - 1}{(x+1)^3},$$

et il vient alors en posant

$$(32) \left\{ \begin{aligned} E &= \frac{10.000 \mu k \Delta \omega i}{mv(1-\beta)} - \\ -dT &= 10.000 \mu k \log \text{nep.} \frac{X}{(1-\beta)x} dx + \frac{8E \sqrt{1-x}}{3x(1+x)^3} dx + \\ &+ \frac{E \sqrt{1-x}}{x} \log \text{nep.} \frac{X}{(1-\beta)} dx - \frac{8Ex^2 \sqrt{1-x}}{3(1+x)^3} dx. \end{aligned} \right.$$

Il est plus commode, pour effectuer l'intégration, de choisir une nouvelle variable

$$y = \sqrt{1-x},$$

et l'on a

$$\begin{aligned} u_1 &= \int \frac{\sqrt{1-x}}{x} dx = 2y - \log \text{nep.} \frac{1+y}{1-y}, \\ u_2 &= \int \frac{x^2 \sqrt{1-x}}{1+x} dx = \frac{2y^5}{5} + 2y - \sqrt{2} \log \text{nep.} \frac{\sqrt{2}+y}{\sqrt{2}-y}, \\ u_3 &= \int \frac{\sqrt{1-x}}{x(1+x)} dx = -\log \text{nep.} \frac{1+y}{1-y} + \sqrt{2} \log \text{nep.} \frac{\sqrt{2}+y}{\sqrt{2}-y}, \\ u_4 &= \int \log \text{nep.} \frac{X}{(1-\beta)x} dx = x \left( 1 + \log \text{nep.} \frac{X}{(1-\beta)x} \right). \end{aligned}$$

De sorte que si dans les deux derniers termes du second membre de l'équation (32), nous remplaçons le carré de  $(1+x)$  qui entre dans leurs dénominateurs par sa valeur moyenne  $\Delta$ ,

$$2\Delta = (1+x_1)^2 + (1+x_2)^2,$$

nous trouvons pour l'expression du travail

$$T = 10.000 \mu k u_1 + E u_2 \log \text{nep.} \frac{X}{(1-\beta)} - \frac{8E}{3\Delta} (u_3 - u_4)$$

à prendre entre les limites (23) ou (27), suivant le cas.

Quant à la durée de l'opération, nous l'obtiendrons en intégrant l'équation (29), qui peut s'écrire en fonction de la nouvelle variable  $y$

$$dt = \frac{2m\mu i y dy}{mv(1-\beta) - \Delta \omega i y - mv(1-\beta)y^2}.$$

L'intégrale, en posant

$$u = mv(1-\beta), \quad w = -\Delta \omega i, \quad \sigma = \sqrt{w^2 + 4u^2}$$

est égale à

$$(33) \quad \tau_1 = -\frac{m\mu i}{u} \log \text{nep.} \left( y^2 - \frac{w}{u} y - 1 \right) - \\ - \frac{m\mu i w}{u\sigma} \log \text{nep.} \frac{2uy - w - \sigma}{2uy - w + \sigma}$$

à prendre entre les mêmes limites que plus haut. Le nombre des coups de piston simples de la machine aspirante sera

$$n'_1 = \frac{\tau_1}{i}.$$

Enfin le volume d'air qui aura pénétré par les fuites dans le tube pendant la première période nous sera donné par la relation

$$dO = \Delta \omega \sqrt{1-x} dt = \frac{2\Delta \omega m\mu i y^2 dy}{mv(1-\beta) - \Delta \omega i y - mv(1-\beta)y^2},$$

dont l'intégrale

$$(34) \quad O' = 2\Delta \omega m\mu i \left[ \frac{y}{u} - \frac{w}{2u^2} \log \text{nep.} \left( -y^2 + \frac{w}{u} y + 1 \right) - \right. \\ \left. - \frac{w^2 + 2u^2}{2\tau u^2} \log \text{nep.} \frac{2uy - w - \sigma}{2uy - w + \sigma} \right]$$

sera prise dans les mêmes limites.

Pour la seconde période de l'aspiration, c'est-à-dire celle de la montée du piston, nous pouvons, à cause des va-

riations assez faibles de la pression, supposer qu'elle reste constante en adoptant une valeur moyenne.

Nous avons donné les pressions moyennes  $p$  et  $p_3$  sur le piston et à la partie supérieure du tube

$$p = 1 + \frac{\beta}{2} - \frac{bKC}{\pi R^2}, \quad p_3 = 1 - \frac{bKC}{\pi R^2} \left(1 - \frac{\beta}{2}\right).$$

A mesure que le piston s'élève d'un mouvement uniforme, la partie du tube située au-dessous de lui diminue de longueur et à l'instant  $\tau_1$ , la longueur de cette partie du tube est

$$\frac{\tau_2 - t}{\tau_2} L.$$

En désignant par  $\tau_2$  la durée de la seconde période, les fuites d'air ne se produiront que dans la partie du tube située au-dessous du piston; la quantité d'air qui pénétrera dans le tube à l'instant  $\tau$  sera donc égale à

$$\Delta \omega \frac{\tau_2 - t}{\tau_2} \sqrt{1-p} dt.$$

La quantité totale d'air qui entrera par les fuites dans la seconde période sera

$$(35) \quad Q_2 = \frac{\Delta \omega \sqrt{1-p}}{2} \tau_2.$$

Le travail dépensé par chaque coup de piston est

$$(36) \quad dT = 10.000 k v p_3 \log \text{nep.} \frac{X}{p_3}$$

et le volume d'air contenu dans le tube ne diminuera dans le même temps que de

$$(37) \quad \left( \frac{m v p_3}{i} - \Delta \omega \sqrt{1-p} \frac{\tau_2 - t}{\tau_2} \right) dt.$$

Si donc la pression moyenne dans le tube au commencement de la seconde période est

$$p_1 \left(1 - \frac{\beta}{2}\right),$$

le volume d'air à extraire, sans tenir compte des fuites,

$$\pi R^2 L p_1 \left(1 - \frac{\beta}{2}\right)$$

sera égal à l'intégrale de l'expression (37), et l'on a

$$(38) \quad \pi R^2 L p_1 \left(1 - \frac{\beta}{2}\right) = \frac{m v p_3}{i} \tau_2 - \frac{\Delta \omega \sqrt{1-p}}{2} \tau_2.$$

On doit en réalité extraire un volume d'air

$$(39) \quad \pi R^2 L p_1 \left(1 - \frac{\beta}{2}\right) + \frac{\Delta \omega \sqrt{1-p}}{2} \tau_2.$$

Remplaçons dans cette expression  $\tau_2$  par sa valeur tirée de (38)

$$(40) \quad \tau_2 = \frac{\pi R^2 L p_1 \left(1 - \frac{\beta}{2}\right)}{\frac{m v p_3}{i} - \frac{\Delta \omega \sqrt{1-p}}{2}}.$$

Le travail élémentaire (36) correspond à une extraction d'un volume d'air  $m v p_3$ ; pour le volume (39), il faudra donc un travail

$$T_2 = 10.000 k \pi R^2 L p_1 \left(1 - \frac{\beta}{2}\right) \frac{1}{m} \left( 1 + \frac{\Delta \omega \sqrt{1-p}}{2 m v p_3 - \Delta \omega \sqrt{1-p}} \right) \times \log \text{nep.} \frac{X}{p_3}.$$

Enfin, le nombre des coups de piston sera

$$n'_2 = \frac{\tau'_2}{i}$$

Il ne serait pas prudent de commencer l'aspiration avant que les manœuvres ne fussent terminées au bas du puits; en désignant par  $\tau_3$  le temps nécessaire à ces manœuvres, et par  $\tau_4$  la durée de la descente du piston, le rapport de la durée de l'ascension du piston au temps total sera

$$\frac{1}{2} \frac{\tau_2}{\tau_1 + \tau_2 + 2\tau_3 + \tau_4}, \quad \text{ou} \quad \frac{\tau_2}{\tau_1 + \tau_2 + 2\tau_3 + \tau_4},$$

suivant qu'il y aura deux tubes fonctionnant alternativement ou un seul; dans ce dernier cas, il faudrait rendre le rapport ci-dessus minimum, afin d'augmenter le plus possible l'extraction. Ce résultat ne peut être obtenu qu'en diminuant  $\tau_1$ . M. Blanchet a proposé, pour atteindre ce but, de créer un récipient N (fig. 5) dans lequel la machine ferait le vide pendant les périodes  $2\tau_3 + \tau_4$ , puis de mettre ce récipient en communication avec le tube au commencement de la première période. On diminuerait ainsi très-brusquement la pression dans le tube et l'on abrégierait d'autant la durée  $\tau_1$  de la première période.

Soient :

V le volume du récipient,

$x_3$  la pression de l'air dans le récipient quand l'équilibre s'est établi après sa mise en communication avec le tube,

$x_4$  la pression de l'air au moment où l'on va établir la communication avec le tube, c'est-à-dire quand le vide partiel est fait.

La pression  $x_3$  devrait être égale à celle qui existe à l'orifice supérieur du tube au moment où le piston va commencer à monter, ce qui donne la relation (20)

$$x_3 = (1 - \beta)p_1.$$

D'autre part, la pression moyenne dans le tube lorsque le piston est descendu au bas du puits est (26)

$$\left(1 - \frac{\beta}{2}\right) p'_1.$$

On aura donc

$$vx_3 + \pi R^2 L \left(1 - \frac{\beta}{2}\right) p'_1 = vx_4 + \pi R^2 L x_4 \left(1 + \frac{\beta}{2}\right),$$

et la quantité d'air à extraire du récipient sera

$$V(x_3 - x_4).$$

Le travail

$$dT = 10.000 k v x \log \frac{X}{x}$$

correspond à l'extraction d'un volume d'air

$$m v x = - V dx,$$

de sorte que l'on a enfin

$$T_2 = - \frac{10.000 k V x}{m} \left( \log \text{nep.} \frac{X}{x} + 1 \right),$$

intégrale à prendre entre les limites

$$x = x_3, \quad x = x_4.$$

Le volume du réservoir est

$$(41) \quad v = \frac{\pi R^2 L}{x_3 - x_4} \left[ \left(1 - \frac{\beta}{2}\right) p'_1 - \left(1 + \frac{\beta}{2}\right) (1 - \beta) p_1 \right].$$

Le nombre des coups de piston nécessaire pour faire le vide

partiel dans le réservoir est facile à calculer; on trouve

$$n'_3 = 1 + \frac{\log \text{nep. } \frac{x_1}{x_3}}{\log \text{nep. } \left(1 - \frac{mv}{V}\right)} =$$

$$= 1 + \frac{V}{mv} \log \text{nep. } \frac{x_3}{x_1}.$$

La durée de l'opération sera enfin

$$\tau'_3 = n'_3 i < 2\tau_3 + \tau_1.$$

Enfin, le travail économisé dans la première période sera représenté par la valeur de l'intégrale  $T'_1$  (22) prise entre les limites

$$x = x_3(1 + \beta), \quad x = p_1.$$

A moins de donner au récipient un volume énorme, on ne pourra obtenir pour  $x_3$  la valeur-limite  $(1 - \beta)p_1$ , et c'est pour cela que nous avons laissé  $x_3$  en évidence dans ces formules.

*Aérage.* — Il nous reste à nous rendre compte de l'aérage produit par le système atmosphérique.

L'air aspiré sous le piston dans une ascension est

$$\pi R^2 L \left(1 + \frac{\beta}{2}\right) = M,$$

et si  $\Theta$  est la durée d'une manœuvre complète, on extraira de la mine par seconde un volume

$$\frac{M}{\Theta}, \quad \frac{2M}{\Theta},$$

suyant qu'on aura un ou deux tubes. Cette quantité d'air suffirait généralement pour la ventilation; mais il ne faut

pas oublier que la régularité d'air est principalement dans les mines à grisou plus importante que la rapidité du renouvellement de l'air. De sorte qu'il nous paraît difficile de se contenter de ce moyen sans installer une machine d'aérage auxiliaire; celle-ci serait d'ailleurs indispensable pour assurer l'aérage pendant les arrêts de l'extraction.

*Application.* — Pour faire l'application du système atmosphérique, nous prendrons deux cas différents :

- 1° Extraction de 120.000 tonnes en trois cents jours de travail, à raison de 10 heures par jour, avec un seul tube;
- 2° Extraction de 150.000 tonnes dans le même temps avec deux tubes.

L'extraction de 120.000 et 150.000 tonnes par année correspond à une extraction journalière de 400 et 500 tonnes. En admettant les chiffres indiqués par M. Blanchet,

Poids de la cage et des wagons vides. . . . .	kilog. 7.500
Poids de la charge de houille. . . . .	4.500
Total. . . . .	12.000

il faudrait de 89 à 111 voyages, suivant le cas; mais on a toujours à retirer de la mine des déblais, et il faut tenir compte des temps perdus, inséparables d'une exploitation. Nous admettrons donc qu'on doit faire 100 voyages par jour dans un cas et 120 dans l'autre.

Avec un seul tube, le voyage aurait une durée de 6 minutes; avec deux tubes, sa durée serait de 10 minutes, car alors on n'aurait à faire avec chaque tube que 60 voyages par journée de 10 heures.

Nous pouvons considérer le premier cas comme très-difficile à réaliser à cause des vitesses considérables auxquelles on serait conduit. Nous examinerons seulement les conditions de marche d'une extraction de 150.000 tonnes par an avec deux tubes.

*Deux tubes extracteurs.* — Nous supposons une pente de 1.000 mètres et un tube de 1<sup>m</sup>,60 de diamètre.

Il faut compter 35 secondes au moins pour le chargement et le déchargement à chaque recette, 320 secondes pour la montée (1<sup>re</sup> et 2<sup>e</sup> période), 210 secondes pour la descente; soit 600 secondes ou 10 minutes par manœuvre complète.

Dans la première période, les pressions extrêmes sur le piston seront

$$x = 1 + \beta = 1,1266, \quad x = p_1 = 1,1266 - 0,6355 = 0,4911.$$

Nous supposons que

$$m = 0,80, \quad k = 1,333;$$

d'où

$$\mu = 2.344,13, \\ T_1 = 7.436.407^{\text{km}}.$$

Dans les manœuvres suivantes, en profitant du vide partiel que peut produire le piston en descendant, on peut diminuer la pression initiale, qui deviendra

$$p'_1 = 1,1266 - 0,325 = 0,8016,$$

et le travail correspondant à la première période ne sera plus que

$$T'_1 = 5.641.944^{\text{km}}.$$

Pour la seconde période, on a

$$p_2 = 1 - 0,59527 = 0,40473 \\ T_2 = 13.878.682^{\text{km}},$$

et le travail total

$$T'_1 + T_2 = 19.520.626^{\text{km}}$$

exigera une machine de la force de 813,3 chevaux-vapeur pour être accompli en 320 secondes.

Mais cela supposerait que la machine produit un travail uniforme, et par conséquent que la vitesse varie, circonstance peu admissible pour des machines pneuma-

tiques. On doit au contraire chercher à obtenir une vitesse constante et un travail variable.

Nous avons indiqué les formules qui donnent le nombre de coups de piston et la durée de chaque période (33) et (40). Supposons dans ces expressions que  $\omega$  est nul, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de rentrées d'air dans le tube, et elles deviennent

$$\frac{\tau_1}{i} = \frac{\mu i}{v(1-\beta)} \log. \text{ nep. } \frac{p'_1}{p_1}, \quad \frac{\tau_2}{i} = \frac{\pi R^2 L p_1 \left(1 - \frac{\beta}{2}\right)}{m v p_2}.$$

Admettons que les cylindres ont une capacité de 18 mètres cubes, nous trouvons

$$\tau_1 = 73,07i, \quad \tau_2 = 158,40i,$$

et si l'opération doit se faire en 320 secondes,

$$\tau_1 + \tau_2 = 320 = 231,47i \\ i = 1,382,$$

et par conséquent

$$\tau_1 = 101'', \quad \tau_2 = 219'',$$

de sorte que nous pourrions dresser le tableau suivant :

TEMPS.	MANOEUVRE.	DURÉE de la manœuvre.
0	Chargement. . . . .	35
35	Première période. . . . .	101
136	Deuxième période. . . . .	219
355	Déchargement. . . . .	35
390	Descente. . . . .	210
600		

L'équation (30) nous permet de déterminer la valeur de la pression qui correspond au travail maximum; cela a lieu lorsque

$$\log. \text{ nep. } \frac{X}{x(1-\beta)} = 1,$$

d'où l'on déduit pour  $x$  la valeur 0,422.

Le travail produit dans une seconde est

$$10.000 \frac{kpx}{i} (1-\beta) \log. \text{nep.} \frac{X}{x(1-\beta)}$$

Si nous remplaçons  $x$  par les valeurs 0,422 et 0,8016, qui donnent le maximum et le minimum, et que nous divisons les résultats par 75, nous obtiendrons la force déployée par la machine exprimée en chevaux-vapeur :

$$\begin{aligned} \text{pour } x = 0,422. \dots & 907,7 \text{ chevaux,} \\ x = 0,8016. \dots & 671,0 \text{ chevaux,} \end{aligned}$$

tandis que, en divisant le travail total par la durée de la manœuvre, nous aurions

$$\frac{19.520626}{320 \times 75} = 815,3 \text{ chevaux.}$$

Pour nous rendre compte de l'effet des fuites, il suffit de calculer ce qui pourra rentrer d'air pendant la seconde période.

La relation (35) nous donne

$$O_2 = 37.959\omega,$$

soit 3<sup>m</sup>3,800 par chaque centimètre carré de section réduite des fuites; et comme le volume d'air à extraire dans cette période était, indépendamment des fuites, de

$$\pi R^2 L p_1 \left(1 - \frac{\beta}{2}\right) = 924,6,$$

il faudra augmenter la section et par suite la force de la machine de

$$\frac{3,8}{924,6} = 0,0041.$$

Nous avons trouvé que la machine devait, à un certain

moment, développer un effort équivalent à 907,7 chevaux; on devra donc augmenter sa puissance de 3,72 chevaux par chaque centimètre carré de section réduite des fuites.

Enfin, en négligeant l'influence des fuites, on peut dresser le tableau suivant :

	MANŒUVRE complète.	PAR 1.000 kilogrammes.
	kilogrammètres.	kilogrammètres.
Effet utile. . . . .	4.500.000	1.000.000
Effet réel. . . . .	12.000.000	2.666.666
Travail du moteur. . . . .	19.520.626	4.337.917

Enfin, évaluons le volume qu'il faudra donner au récipient pour qu'en le mettant en communication avec le tube, il y fit descendre la pression au point où commence l'ascension du piston; supposons que dans ce récipient on puisse faire le vide jusqu'à une pression 0,1911, la relation (41) nous donnera

$$V = 2.895^{\text{m}^3}$$

c'est-à-dire que le récipient devrait avoir un volume égal à peu près à une fois et demie le volume du tube.

En résumé nous voyons que pour élever 1.000 kilogrammes de matières à 1.000 mètres de hauteur, il faudra dépenser

5.255.000 kilogrammètres avec l'air comprimé,	
4.338.000 — avec le vide,	
1.555.000 — avec le câble,	

en admettant qu'on utilise les 75 p. 100 de la force motrice.

Il est juste de remarquer que le rapport du poids utile élevé au poids de la cage n'est pas le même dans les trois cas.

	$q$ = poids de la cage et des wagons vides.	Nombre des wagons.	$Q$ = poids utile.	Rapport $\frac{Q}{q}$ .
	killog.			
Air comprimé. . . . .	3.640	4	1.800	0,4945
Vide. . . . .	7.500	9	4.500	0,6000
Câble. . . . .	2.740	4	1.800	0,6569

Il est évident néanmoins que jusqu'ici aucun système ne semble de nature à pouvoir remplacer l'emploi des câbles. Ajoutons qu'avec les câbles en acier manganésé, formés d'une série de tronçons ayant chacun une section constante, on peut déterminer, comme nous l'avons vu, le diamètre de la bobine de manière à ce que l'effort produit par la machine aux différentes époques de la manœuvre ne subisse que des variations très-faibles.

Lorsqu'on doit desservir avec le même câble dans un même puits des recettes placées à des niveaux différents, il devient impossible d'adopter un diamètre des bobines satisfaisant au point de vue que nous avons examiné, puisqu'à chaque hauteur correspond un certain diamètre; mais plus le câble sera léger, plus cet inconvénient sera faible. Nous croyons donc que l'on doit surtout s'appliquer à fabriquer des câbles légers et flexibles; en un mot, à perfectionner le système actuel d'extraction, plutôt que de chercher un autre système basé sur l'emploi du vide ou de l'air comprimé, qui ne pourrait convenir que dans des cas très-particuliers.

## NOTICE

SUR

## LES GISEMENTS DES MINÉRAIS D'ARGENT

LEUR EXPLOITATION ET LEUR TRAITEMENT MÉTALLURGIQUE

AUX ÉTATS-UNIS

Par M. P.-L. BURTHE, ancien élève de l'École des mines.

## INTRODUCTION.

Depuis 1859, les États-Unis ont produit des quantités d'argent si considérables que cet accroissement soudain de la masse du métal en circulation a amené une forte dépréciation de sa valeur. La démonétisation partielle de l'argent en Europe est une des conséquences les plus importantes de cette dépréciation. Aux États-Unis elle aura pour effet de rendre plus difficiles des exploitations qui ne pouvaient se soutenir que par la valeur élevée de leur produit. Il n'est donc pas sans intérêt de résumer les conditions actuelles de ces exploitations. En outre, au point de vue métallurgique, la variété des minerais que l'on rencontre dans ce vaste pays rend intéressante l'étude des procédés de traitement auxquels on les soumet. J'ai choisi comme sujets d'étude trois types de minerais bien distincts par leur composition et traités par des procédés, sinon complètement, du moins très-sensiblement différents. Ce sont : 1° les minerais d'argent purs ou presque purs; 2° les minerais d'argent antimonial et arsénicaux; 3° les galènes et les blendes argentifères.

Le gîte aujourd'hui fameux du Comstock, dans le Nevada,

m'était tout naturellement indiqué comme représentant du premier type. Les filons d'Austin (Nevada) et de Georgetown (Colorado) sont de très-bons exemples des deux autres. A l'étude des filons argentifères du Colorado j'ai cru devoir joindre ici celle des filons aurifères du même pays, les deux espèces de minerais étant en partie réunies dans le traitement métallurgique.

Ce travail est divisé en deux parties : la première est consacrée à l'étude des gisements et à leur exploitation ; la deuxième à la métallurgie.

Je me suis librement servi, pour l'étude du filon de Comstock, du beau travail de MM. Clarence King et J. D. Hague, et des discussions auxquelles le tunnel Sutro a donné lieu devant le Congrès ; pour l'étude des filons du Colorado, j'ai mis à profit la *Revue minière de Georgetown*.

On trouvera d'utiles renseignements dans les statistiques minières de M. R. W. Raymond, commissaire du gouvernement fédéral. Je ne puis citer la longue liste de propriétaires et directeurs, soit d'usines, soit de mines, qui, dans le Colorado et à Austin, m'ont fourni toute facilité pour mener à bien mes études ; mais je ne saurais trop les remercier tous pour leur inépuisable complaisance.

---

## PREMIÈRE PARTIE.

---

### CHAPITRE PREMIER.

#### FILON DE COMSTOCK.

*Situation géographique.* — Sous la latitude 38° 8' N., la Sierra Nevada, qui court au N.-O., lance vers le nord une branche connue sous le nom de chaîne Washoe. Cette

chaîne secondaire conserve cette direction N.-S. sur une longueur de 170 kilomètres environ ; elle atteint alors la vallée du lac de Boue (Mud Lake) et s'y termine en pente douce. Son point culminant, le mont Davidson, a une altitude de 2.579 mètres au-dessus du niveau de la mer. A la base de ce mont, et à une distance de quelques centaines de mètres vers l'est, se trouve le filon de Comstock.

Le pays environnant est extrêmement accidenté : du mont Davidson, en portant ses regards vers l'est, on n'aperçoit qu'une série de pics et de vallées profondes et étroites. Les pics sont dénudés, et les vallées en été manquent d'eau. Les quelques arbres, qui autrefois, paraît-il, couvraient ces montagnes, ont disparu. Il est difficile de se représenter un paysage plus aride et plus désolé. Sans les richesses minérales que renferme cette terre, elle serait probablement déserte ; mais l'industrie l'a peuplée. Deux villes contiguës, Gold Hill et Virginia City, sont construites sur le Comstock même. Elles ont une population de 12 à 15.000 habitants ; on y trouve tout le luxe que connaissent les Américains du nord.

#### § 1. — Gisement.

*Terrains et roches.* — La réunion, dans un espace très-restreint, de roches d'origine sédimentaire et de roches éruptives, rend très-intéressante la géologie des environs du Comstock. Ce district présente de nombreuses analogies avec celui de Schemnitz par la nature et les caractères des roches qu'on y rencontre, comme on peut en juger par la carte ci-jointe (fig. 6, 7, 8, Pl. III).

Le mont Davidson est formé de syénite. Autour de lui s'étend une vaste nappe de grüntein, percée par des dykes d'andésite et de trachyte, et bordée à l'est par des trachytes, au sud par des rhyolites, des roches métamorphiques et enfin des basaltes. Le granit apparaît en deux points vers le sud-ouest où il n'occupe qu'une place très-

restreinte. L'ordre de superposition et les âges relatifs de ces différentes roches sont nettement indiqués par les coupes (fig. 7 et 8, Pl. III). Les terrains métamorphiques reposent sur les syénites, ainsi que le grünstein; l'andésite en trois bandes parallèles, le trachyte, puis la rhyolite traversèrent ce grünstein successivement; enfin parut le basalte.

La syénite qui, avec les roches métamorphiques, formait la charpente primitive de la chaîne Washoe, est de teinte rosée. Elle est principalement composée de feldspath orthose et d'hornblende; le quartz n'est pas abondant. Elle contient fréquemment du fer titané, occasionnellement de l'oligoclase et de l'épidote. Sa dureté est très-grande, et sa compacité quelquefois si considérable qu'il est difficile de distinguer ses éléments sans l'aide de la loupe. Cependant on y voit fréquemment de petites veinules de pyrites. Elle forme des bancs parallèles, peu nets le plus souvent, mais quelquefois bien accusés, et qui, dans ce cas, ont une direction N.-S.

M. Cl. King distingue deux groupes dans les roches métamorphiques qui reposent sur ces syénites : une série peu puissante de calcaires très-altérés et des schistes cristallins. Au-dessous de ces schistes cristallins et en contact direct avec les syénites, se trouvent des micaschistes, dont la direction est un peu à l'ouest du nord, et qui plongent vers l'est sous un angle très-aigu. D'abord grossiers à leur base et renfermant des morceaux de quartz, d'hornblende et de fer magnétique, ils prennent une texture de plus en plus fine à mesure qu'on s'élève, les noyaux étrangers disparaissent, et la masse finit par ressembler à un basalte. En outre des affleurements indiqués sur la carte, ces schistes ont été trouvés dans les travaux de la mine Yellow Jacket en masse extrêmement confuse, et sur le versant est de Cedar Hill, où ils émergent du grünstein. Toutes ces roches sont traversées par d'innombrables petites fissures

contenant du carbonate de chaux. Les calcaires appartiendraient aux couches supérieures du trias qui est très-développé à l'est de la rivière Carson.

Le grünstein occupe une place proéminente parmi toutes les roches du district, autant par son abondance que par ses relations avec le Comstock. C'est à ce grünstein que le baron Richtofen a donné le nom de *propylite*, cette variété qui, assez rare à la surface étudiée du globe, apparaît dans tous les grands districts argentifères, en Hongrie, au Mexique, en Bolivie. Il se présente le plus souvent, près du Comstock, sous forme d'une pâte porphyrique verdâtre d'oligoclase et hornblende; mais, dans un très-petit rayon autour de Virginia City, il prend nombre d'aspects différents. D'après les analyses de M. Mixer, le grünstein le plus répandu dans le pays serait composé de

Silice. . . . .	58,68
Alumine. . . . .	17,90
Oxyde de fer. . . . .	4,11
Chaux. . . . .	5,87
Magnésie. . . . .	2,03
Alcalis. . . . .	5,16
Eau. . . . .	6,53
	<hr/>
	100,36

Une seconde variété bréchiforme se rencontre au nord et au sud du Comstock. Dans le filon même s'en trouve une troisième très-cristalline et beaucoup plus siliceuse que le grünstein ordinaire, comme le montre l'analyse suivante, faite par M. Mixer sur un échantillon provenant de la mine Yellow Jacket.

Silice. . . . .	80,27
Alumine. . . . .	9,29
Oxyde de fer. . . . .	2,17
Chaux. . . . .	0,54
Alcalis. . . . .	4,13
Eau. . . . .	1,83
Pyrites. . . . .	1,69
	<hr/>
	100,02

Ces trois variétés sont les plus distinctes. Mais entre le mont Bufler et la vallée de la rivière Carson qui est à l'est, en dehors des limites de la carte, la roche est traversée par une quantité innombrable de fissures N.-S., et elle est très-décomposée. Il en est résulté une roche jaunâtre, ocreuse, facilement délitable et montrant à sa surface des zones concentriques de décomposition.

Au sud du Comstock, le grünstein devient très-quartzeux, puis tellement acide qu'il tourne à la rhyolite. La structure de la roche est tout à fait trachytique. Cependant les géologues qui ont étudié le district rattachent cette roche au grünstein.

M. Cl. King désigne sous le nom d'andésite une roche formée principalement d'une pâte feldspathique compacte, avec hornblende et oligoclase, d'un gris verdâtre, présentant presque toujours une cassure résineuse. Quelquefois elle devient porphyrique et se rapproche de la variété du grünstein cristallisé. Cette andésite pourrait bien être un grünstein sous une forme différente de celles qui ont été précédemment signalées. Toutefois, tandis que le grünstein est très-altéré à l'est du Comstock, l'andésite ne présente aucune trace d'altération. Elle apparaît en trois bandes parallèles au filon Comstock et dans son voisinage.

Les trachytes sont principalement composés de feldspath et de mica magnésien brun; ordinairement leur couleur est rosée, mais en certains points elle devient rouge brique. Ces trachytes sont facilement reconnaissables à leur texture; ils sont très-durs, très-résistants et fort utiles pour les constructions. Toute cette formation est traversée par de grandes lignes de fracture N.-S., qui tracent des plans plongeant de 60 à 70° vers l'est. A l'ouest de la grande zone trachytique qui borde l'orient de la carte, entre cette zone et le Comstock, on rencontre de petits fragments isolés de trachyte. Ces morceaux sont considérés comme des restes

d'une coulée plutôt que comme des affleurements de dykes particuliers.

Les basaltes ne paraissent pas avoir joué un rôle important dans la formation du Comstock. Les fragments représentés sur la carte font partie d'une grande éjection s'étendant plus au sud; ils sont remarquables par la grande quantité d'olivine qu'ils renferment.

Toutes les éruptions, sauf l'éruption syénitique, sont postérieures à l'époque du miocène.

Avant d'aborder la description du Comstock, je signalerai, pour n'y plus revenir, quelques gîtes métallifères qui l'avoisinent. Leurs affleurements ont été tracés sur de grandes longueurs et indiquent des filons de dimensions assez considérables; mais leur puissant voisin les a toujours fait négliger.

Dans les syénites du mont Davidson se trouve une série de petites veines de quartz, généralement aurifères, et parallèles au Comstock; elles n'ont pas été travaillées.

A l'ouest du mont Davidson, on a signalé une veine de galène argentifère qui a été explorée sommairement, et qui aujourd'hui est abandonnée.

A 2 ou 3 kilomètres à l'est de Virginia City est un filon N.-E. S.-O., plongeant vers l'est sous un angle de 45°, présentant un bel affleurement qui a été tracé sur une longueur de 4.827 mètres. Sa puissance varie de 3 à 15 mètres; le grünstein est au mur et le trachyte au toit. On a remarqué que le carbonate de chaux, gangue fréquente près de la surface et dans la portion sud du gîte, est remplacé en profondeur par le quartz. — Le filon est connu sous le nom de *Occidental* dans sa partie sud, et *Monte-Christo* dans sa partie nord. Jusqu'à présent, il n'a produit que du minerai vendant de 85 à 98 francs par tonne.

Le filon Lady-Bryan, à l'est du précédent, n'a pas été mieux développé. Sa direction est N. 30° E.; il plonge à l'est sous un angle qui varie de 45 à 55°.

*Allures générales du filon de Comstock.* — Le filon court à la base du mont Davidson dans une direction moyenne N. 25° E. Il a été reconnu sur une longueur de 6.600 mètres. Son parement est plonge d'abord vers l'ouest, puis vers l'est; il est formé entièrement par le grüstein. Cette même roche forme le parement ouest aux extrémités nord et sud du gîte. Dans la partie centrale, sur une longueur de 1.440 mètres, le mur est formé par la syénite.

Malgré l'extension des travaux qui ont atteint une profondeur de 450 à 500 mètres (\*), bien des points de la structure de ce grand gîte sont encore obscurs. Jamais on n'a entrepris d'explorations systématiques, et la subdivision du gîte en quarante-six propriétés, appartenant à un égal nombre de compagnies différentes, rend difficile la coordination des résultats obtenus. En particulier, les allures des parties riches ne sont connues qu'imparfaitement; leurs limites ne sont fixées que par les parois des excavations qu'on y a pratiquées, et les portions non extraites ne sont pas représentées sur les plans comme métallifères. Il ne s'ensuit pas qu'en dehors de ces limites le gîte soit pauvre: on peut simplement en conclure qu'il n'était pas assez riche pour être abattu au moment où on l'exploitait. Ainsi on exploite maintenant des minerais rendant 113 francs à la tonne, tandis qu'il y a quelques années, un minerai rendant 227 francs à la tonne était considéré comme improductif. Ce serait un minerai riche au moment actuel; mais la difficulté de rentrer dans les vieux travaux et d'autres circonstances obligent à l'abandonner. Il en résulte que certaines relations qui peuvent exister entre les différentes parties riches du gîte sont complètement inconnues.

On distingue ordinairement dans le Comstock une portion sud et une portion nord. Ces deux portions sont sépa-

(\*) Les profondeurs sont comptées à partir de l'affleurement de la mine Gould and Curry, sauf dans les cas mentionnés plus loin.

rées par le terrain qu'occupe la mine Bullion. Cette division est arbitraire, mais a quelques raisons d'être au point de vue de la disposition des parties riches et de l'écoulement des eaux de la surface.

Dans la portion sud, les mines productives, les seules dont nous nous occuperons, sont, en marchant du sud au nord :

	mètres.
Belcher, occupant sur le gîte une longueur de	285,76
Crown Point — —	164,16
Kentuck — —	28,27
Yellow Jacket — —	286,67
Et le groupe connu sous le nom de mines proprement dites de Gold Hill, qui occupent une longueur de . . . . .	209,15
subdivisée en propriétés de 3 <sup>m</sup> ,04 à 30 mètres.	

Puis vient la portion médiane totalement improductive sur une longueur de 501<sup>m</sup>,60; elle comprend les mines de Apple and Bates, Alpha, Exchequer et Bullion.

La portion nord commence alors. Les grandes mines qu'elle renferme sont celles de

	mètres.
Chollar Potosi, occupant sur le gîte une longueur de	435,94
Hale and Norcross — —	121,60
Savage — —	234,38
Gould and Curry — —	364,40

Enfin, à 535 mètres au nord de cette dernière, se trouvent les deux dernières mines productives. Ce sont les mines

Mexican, occupant 50 <sup>m</sup> ,4 de longueur	
Ophir — 364 <sup>m</sup> ,80 —	

Sur toute la longueur du Comstock, l'éponte ouest, qui forme le mur partout où on l'a rencontré, a une inclinaison de 45 à 55° vers l'est. Ces variations de plongement ne se produisent pas brusquement, mais résultent de larges ondulations tournées vers l'est. Ce mur ouest est le mur proprement dit du gîte; il est surtout régulier là où

il est formé par la syénite, entre les mines Chollar-Potosi et Mexican. Son inclinaison moyenne est alors de 46 à 47°. Dans la portion sud il est encore fort mal connu. On le considère ordinairement comme formé par le grüstein; mais dans la mine Yellow Jacket, à une profondeur de 141 mètres, au lieu du grüstein, on a rencontré les mica-schistes, et c'est un des rares points où l'on soit sorti du gîte lui-même. A la surface, c'est bien le grüstein qui est au mur; mais on ignore jusqu'à quelle profondeur il conserve cette position.

Le toit, formé par l'éponte est, est très-irrégulier et mal défini; sa distance au mur varié de 30 à 240 mètres. En partant de l'affleurement il plonge d'abord vers l'ouest, puis se redresse presque verticalement, sa surface présentant de larges ondulations. A une profondeur variant entre 180 et 360 mètres, il change d'inclinaison, tourne vers l'est en conservant une grande raideur et devient un toit régulier. Dans la mine Crown Point, cette nouvelle allure ne se manifeste qu'à une profondeur de 456 mètres. Une exception se présente dans les mines de la portion médiane du gîte, entre les mines Chollar-Potosi et Alpha; la portion verticale du toit rencontre la syénite qui forme le mur, et le filon disparaît.

Au toit et au mur sont deux salbandes argileuses atteignant parfois une grande puissance. Celle du mur n'est pas toujours très-bien définie; elle s'interrompt fréquemment. Sa puissance dépasse rarement 0<sup>m</sup>,60 ou 0<sup>m</sup>,90; mais celle du toit persiste sur toute la longueur du gîte et conserve toujours les mêmes caractères. Elle est d'un gris noir et renferme de petits noyaux de quartz et de calcaire, de la dimension d'un œuf. Les noyaux de quartz sont durs; ceux de calcaire sont plus ou moins décomposés et tombent facilement en poudre. Cette argile atteint quelquefois jusqu'à 12 mètres de puissance.

Les deux limites latérales du Comstock affectent donc à

peu près la forme d'un V dont les deux branches supérieures affleurent à une distance l'une de l'autre qui varie de 30 à 240 mètres. Dans la portion médiane du gîte, la partie inférieure de ce V est fermée. Partout ailleurs les deux branches deviennent parallèles et plongent à l'est sous un angle qui varie de 38° (mine de Crown Point) à 45° (mine Hale and Norcross.)

La masse du filon, en partant du sud, court jusqu'au puits Belcher sur le N. 35° à 40° E. (fig. 9, Pl. III). En arrivant sur la mine Crown Point, elle forme deux veines distinctes, séparées par un *horse* de grüstein. La veine ouest qui est la continuation de la masse trouvée dans le Belcher, se redresse et court sur quelques degrés à l'est du nord magnétique, tandis que la veine est adopte la course N. 35° à 40° E. qu'elle garde en traversant les mines Kentuck et Yellow Jacket. En arrivant à la limite nord de cette propriété, elle court sur le N. vrai pendant 150 mètres environ et se réunit à la veine ouest. Elle s'infléchit alors de 15° environ vers l'est dans les mines de Gold Hill proprement dites, et parcourt dans cette direction l'espace qui la sépare de la mine Chollar Potosi, en formant une masse unique.

La veine ouest, la seule qui existe dans la mine Belcher, a dans cette mine une puissance maximum de 110<sup>m</sup>,96 entre les deux épontes. Sur ces 110<sup>m</sup>,96, 24<sup>m</sup>,62 sont des quartz métallifères de différentes qualités. La veine plonge vers l'ouest sous un angle de 50° environ, en partant de la surface, puis se redresse verticalement et enfin plonge à l'est. En passant dans la mine Crown Point, et à partir de cette mine, elle plonge exclusivement à l'ouest sous des angles variant entre 50 et 70°. Dans Crown Point (fig. 2, Pl. IV) elle est subitement arrêtée à une profondeur de 121 mètres au-dessous du sol par une veine argileuse presque horizontale, inclinée de quelques degrés vers l'est. Le même phénomène se représente dans les mines Kentuck et Yellow Jacket, à la même profondeur. Les travaux d'ex-

ploration, assez restreints, il faut l'avouer, n'ont pas retrouvé la veine au delà de cette faille. En s'élevant au-dessus de cette faille jusqu'à la surface la veine perd continuellement de sa puissance. Elle se termine en pointe effilée à 50 ou 60 mètres au-dessous du sol et n'affleure pas. Ainsi dans la mine Crown Point, au niveau 400' elle atteint une puissance de 15<sup>m</sup>,20; au niveau 160', cette puissance est réduite à 6<sup>m</sup>,08. Horizontalement et en s'avancant vers le nord, sa puissance augmente de 15 mètres à 53<sup>m</sup>,44 quand on passe de Crown Point dans Yellow Jacket; puis elle ne fait que décroître. Elle se réduit à 2<sup>m</sup>,43 à la hauteur du puits nord de Yellow Jacket, et se perd ensuite dans la veine est. Toutefois dans les mines Eclipse (fig. 3, Pl. IV), Consolidated et Empire, qui font partie des mines de Gold Hill proprement dites, on a constaté l'existence d'amas de minerais présentant de grandes analogies avec les amas de la veine ouest, en sorte que cette veine conserverait son influence au point de vue de la disposition des parties riches quoique n'ayant plus une existence distincte.

La veine est, qui est réduite à zéro dans la mine Belcher, fait son apparition dans la mine Crown Point. Elle apparaît en pointe à 60 mètres de profondeur au-dessous de la surface du sol et à 50 mètres à l'est du puits Crown Point. Elle est presque verticale jusqu'au niveau 700', et atteint une puissance de 44 mètres. A partir du niveau 900' elle tend à plonger vers l'est sous un angle très-élevé. Elle se rétrécit beaucoup dans la partie sud de la mine Yellow Jacket, précisément à la hauteur du point où la veine ouest atteint de grandes dimensions; mais elle se renfle considérablement et atteint 60 mètres de puissance près du puits nord de Yellow Jacket, où elle est inclinée de 50° vers l'est.

Ces deux veines est et ouest sont séparées depuis la mine Belcher jusqu'à la mine Empire (Gold Hill) par une masse considérable de grüstein cristallin connue sous le

nom de *horse de Hawkeye*. C'est un immense coin ayant 750 mètres de longueur dans la direction N.-S., une hauteur approximative de 395 mètres et une puissance de 120 mètres au niveau 400 pieds de la mine Belcher. Il est bordé par des argiles épaisses et pénétré en tous sens par des fissures argileuses et quartzéuses.

Depuis trois ans, les nouveaux travaux des mines Belcher, Crown Point, Kentuck et Yellow Jacket développent une nouvelle veine quartzéuse à l'est de la veine est précédemment décrite. Cette veine commence à 109 mètres à l'est du puits Crown Point où elle a été rencontrée pour la première fois, et à 273 mètres de profondeur. Elle plonge vers l'est sous un angle aigu, et a montré jusqu'à présent une grande puissance et une grande richesse. Ses relations avec les veines précédentes ne sont pas encore bien connues.

En entrant dans la mine Chollar Potosi (Pl. IV, fig. 1), la masse unique de quartz qui constitue le filon a une direction parallèle à celle observée dans la mine Belcher; elle court sur le N. 44° E., puis s'infléchit de 20° environ vers le nord dans la mine Hale and Norcross, et enfin court sur le N. 18° 45' O. Elle a près de 100 mètres de puissance maximum, et plonge à l'est sous un angle de 45°. Dans la mine Chollar Potosi (fig. 4) elle est arrêtée à une profondeur de 150 mètres par le contact des deux épontes qui se rejoignent, ce qui lui donne la forme d'un grand coin. Dans la mine Hale and Norcross (fig. 5), ce contact cesse, en sorte que, suivant toute probabilité, la veine se continue en profondeur sous forme d'une bande étroite plongeant vers l'est. Dans la mine Savage, elle est au contraire interrompue, mais pour une autre cause que le contact des deux épontes. Un grand *horse* de grüstein est intercalé dans la masse quartzéuse depuis la mine Chollar Potosi. A partir de cette mine, à mesure qu'on s'avance vers le nord, ce *horse* s'enfonce de plus en plus profondément dans la veine, si bien que sur la mine

Savage (fig. 6) il finit par rejoindre le mur de syénite et coupe la veine en profondeur. Les mineurs désignent cette veine, qui suit constamment le mur, sous le nom de veine ouest, par analogie avec la veine ouest de la portion sud du filon. L'analogie n'est pas très-frappante, puisqu'ici il y a un mur, que la veine plonge à l'est et se réunit probablement en profondeur à d'autres fissures, tandis que dans la portion sud, la veine, dite veine ouest, n'a pas de mur bien marqué, plonge à l'ouest et se réunit avec la fissure est près de la surface. On a cependant conservé ici cette dénomination parce qu'on la trouve fréquemment dans les descriptions américaines du Comstock.

A peu près à la hauteur du point où la veine ouest tourne à l'ouest du nord, une nouvelle veine (fig. 5) apparaît à l'est, à 120 ou 150 mètres de profondeur, formant presque la continuation de la masse quartzreuse qui arrive de la mine Bullion. Sa puissance moyenne est d'environ 18<sup>m</sup>,50; elle plonge à l'est, sous un angle de 40°. A l'extrémité nord de la mine Hale and Norcross, elle s'infléchit vers le nord, et, dans la mine Savage, prend la direction N. 55° O., en affectant la forme de deux croissants tournés en sens contraire l'un de l'autre et réunis par une pointe (fig. 6, Pl. IV). Elle n'est qu'à une petite profondeur au-dessous de la surface du sol et affleure tout à fait sur la limite nord de la mine Savage, où elle est presque verticale sur une hauteur de 150 mètres. Sa direction la ramène rapidement vers le mur de syénite, contre lequel elle s'appuie dans la mine Gould and Curry (fig. 7). Elle n'a pas moins de 51<sup>m</sup>,60 de puissance, formant une masse séparée en trois parties par des *horseshoes* de grüstein; et la section qu'elle présente à la hauteur des affleurements dits *Eldorado* (fig. 7 et 1) n'est pas sans quelque ressemblance avec la section du puits Chollar. Cette veine suit la syénite, puis passe dans le grüstein, où elle perd sa puissance et devient stérile.

Par suite de cette stérilité, on a prêté peu d'attention à

ses allures sur une longueur de 535 mètres; on sait qu'elle s'infléchit vers l'est jusqu'à prendre une orientation de N. 35° à 40° E.; puis qu'elle se recourbe vers le nord, sa direction dans les riches mines Ophir et Mexican oscillant entre N. 10° à 15° E. et N. 5° à 7° O. Le grüstein est alors au mur comme au toit.

De même que dans les mines de la portion du sud du gîte les travaux ont développé des veines de quartz situées successivement plus à l'est et à une plus grande profondeur, de même dans la portion nord on retrouve, dans la mine Hale and Norcross (fig. 5, Pl. IV) au niveau 1.356', à l'est de la veine précédemment décrite et à une plus grande profondeur, une nouvelle veine que les travaux de la mine Savage ont développée plus au nord, et qui, comme allures, paraît se conformer à celles de cette dernière veine. C'est même cette idée préconçue que les différentes veines et les amas riches qu'elles contiennent se trouvent de plus en plus vers l'est, qui a empêché l'exploration complète de la veine dite ouest dans la portion sud du gîte, quoique les travaux y eussent donné des résultats satisfaisants.

*Parties riches ou bonanzas* (Pl. III et IV). Les parties riches ne forment qu'une portion très-minime de la matière du gîte,  $\frac{1}{600}$  tout au plus. Elles se présentent en amas, dans l'arrangement desquels on n'a jusqu'à ce jour découvert aucune loi. Ces bonanzas sont distribuées en trois groupes: le premier correspond à ce que nous avons appelé la portion sud du filon; le deuxième aux mines Chollar-Potosi, Hale and Norcross, Savage, Gould and Curry de la portion nord; le troisième aux mines Mexican et Ophir de cette même portion. Dans chacun de ces groupes, les bonanzas affectent une disposition en éventail; le centre du premier serait dans les mines Crown Point et Yellow Jacket; le centre du deuxième dans la mine Hale and Norcross; le centre du troisième dans les mines Ophir et Mexican.

C'est dans la mine Overman, au sud de la mine Belcher,

que se trouvent les premières traces de parties riches. De petites exploitations disséminées dans cette mine ont fait croire à l'existence d'une bonanza, sans que les résultats aient justifié cette croyance.

La bonanza Belcher (A) a été exploitée en 1864. Elle plongeait à l'ouest; sa longueur horizontale était de 91<sup>m</sup>,20. En profondeur elle n'atteignait pas 100 mètres au-dessous de la surface. Elle était dirigée N. 33° E. Elle a produit 7.982.500 francs.

La bonanza ouest de la mine Crown Point (B) a été exploitée sur 152 mètres de longueur, dont 60<sup>m</sup>,80 dans les mines Kentuck et Yellow Jacket. Le minerai commençait à 22<sup>m</sup>,80 au-dessous de la surface du sol dans la mine Crown Point (*fig. 2*, Pl. IV) et remplissait toute la veine jusqu'à une profondeur de 120 mètres, à laquelle il a disparu en même temps que la veine coupée par une faille argileuse presque horizontale. En passant plus au nord, dans la mine Yellow Jacket, le minerai se concentre dans une zone centrale ayant à peu près la puissance de toute la veine quartzreuse dans Crown Point; il montait jusqu'à 15<sup>m</sup>,20 de la surface. La bonanza plonge, comme la veine quartzreuse, vers l'ouest, sous un angle de 50 à 70°; sa direction moyenne est N. 4 ou 5° E.

La bonanza est de Crown Point (C) n'est pas un amas unique, comme on la représente ordinairement, mais une série de petits amas (*fig. 2*). Dans la mine Crown Point, à 9<sup>m</sup>,12 au-dessus du niveau 500', commença un petit massif de 6<sup>m</sup>,08 d'épaisseur, au contact du toit, mais s'en séparant bientôt et entrant dans la masse quartzreuse comme un coin vertical de 60<sup>m</sup>,80 de hauteur. A 18 mètres plus au nord, cette hauteur se réduit à 6<sup>m</sup>,08. La longueur totale de cet amas est de 69<sup>m</sup>,92; il est orienté sur 10 ou 12° à l'est du nord. Au niveau 800', on découvrit trois bandes de minerais, commençant par des pointes argileuses dans le quartz et s'élargissant en profondeur, mais en même temps diminuant de richesse jusqu'à ce que le minerai se disséminât

et se perdit dans la masse quartzreuse. L'amas oriental, le plus important des trois, suivait le toit, entre les niveaux 700' et 900'. Au niveau 900' son axe commença à plonger vers le nord; il n'avait plus que 7<sup>m</sup>,60 de puissance dans la mine Crown Point; à quelques mètres plus bas il quittait cette mine pour passer dans les mines Kentuck et Yellow Jacket. Des deux autres amas, l'un suivait le parement ouest, l'autre était au centre du filon; tous deux plongeaient à l'est sous un angle très-aigu.

Au nord des bonanzas est et ouest de Crown Point, lorsque les deux veines quartzreuses se sont fondues en une seule, se trouvent deux autres bonanzas, connues sous les noms de bonanzas est (D) et ouest (E) de Gold Hill. Elles ont produit des sommes considérables; mais leur exploitation remontant aux premières années qui suivirent la découverte du Comstock, et les mines dans lesquelles elles furent travaillées ne possédant pas de plans de leurs travaux, on ne sait presque rien de leur allure. L'axe longitudinal de la bonanza ouest était à peu près horizontal et avait 344<sup>m</sup>,400 de long; l'amas se terminait brusquement en profondeur. Ce sont les extrémités sud de ces deux bonanzas qui ont été exploitées dans la partie nord de la mine Yellow Jacket. La bonanza est plonge en ce point sous un angle de 62° vers l'est, et son axe court vers le N. dans sa portion supérieure; dans la portion inférieure et la plus méridionale, il s'infléchit jusqu'à N. 15° O. La bonanza ouest plonge à l'est sous un angle de 50°. Elle est dirigée d'abord sur le nord, puis s'infléchit vers l'ouest et près de la limite nord de la mine court sur le N. 30° O. environ.

Outre ces deux bonanzas, dans les mines de Gold Hill proprement dites, se trouvent deux amas de minerais en feuilles minces plongeant vers l'ouest sous un angle d'environ 45°; ce sont, dans la masse unique de quartz, les représentants de la veine ouest (*fig. 3*, Pl. IV).

Toutes ces bonanzas ont été exploitées de 1860 à 1867.

En mai 1870, on découvrit dans la mine Crown Point une nouvelle bonanza (F) qui est encore en exploitation. C'est la dernière qui ait été trouvée jusqu'à ce jour dans la portion sud du Comstock. Au niveau 1.100', on poussait une galerie dans la direction du sud, amorcée à 109<sup>m</sup>,44 est du puits et à 30 mètres de la limite nord de la propriété, quand on traversa une veine argileuse de direction N.-E. On dévia alors la galerie vers l'est et à 9<sup>m</sup>,22 de distance on coupa un amas de 0<sup>m</sup>,304 de puissance dont le minerai rendait 227<sup>f</sup>,12 par tonne. En continuant cette galerie vers le S.-E., on reconnut un amas de 25<sup>m</sup>,55 de puissance, continu et uniforme jusqu'à la limite de la propriété. On constata ensuite qu'il pénétrait dans la mine Belcher. Son mur plonge à l'est sous un angle de 38°.

Au niveau 900' l'amas a 2<sup>m</sup>,736 de largeur,

Au niveau 1100' — 15<sup>m</sup>,68 — et 60<sup>m</sup>,80 de longueur,

Au niveau 1200' — de 23<sup>m</sup>,10 à 35<sup>m</sup>,87 — et 94<sup>m</sup>,24 —

Le minerai rend de 169 à 200 francs par tonne. Il est confiné dans les 4 ou 5 mètres voisins du mur ou parement ouest.

A ce même niveau 1.200' en un point situé à 31 mètres à l'est du parement ouest et 30 mètres nord de la limite sud de la propriété, on coupa un quartz extrêmement dur qu'on considéra comme le toit de l'amas précédent. Pour s'assurer de son étendue, on le traversa et à 11 mètres plus à l'est on coupa un deuxième amas de minerai de direction N. 36° O. qui s'étend aussi jusque dans la mine Belcher. Son mur plonge sous un angle de 32° vers l'est. Cet amas a 1<sup>m</sup>,82 de puissance au niveau 1.200' et 1<sup>m</sup>,20 au niveau 1.300'. Son minerai rend de 198<sup>f</sup>,73 à 398 francs par tonne.

La galerie de recherche rencontra alors le grüstein. Au niveau 1.200' ce grüstein a 4<sup>m</sup>,86 d'épaisseur; il est suivi d'un amas de 8<sup>m</sup>,20 de puissance, dont le minerai vaut

500 francs la tonne. Au niveau 1.300', le grüstein a 2<sup>m</sup>,10 d'épaisseur et l'amas 5<sup>m</sup>,04; son minerai rend 550 francs à la tonne. Le minerai n'est plus confiné au voisinage du parement ouest, mais est réparti également dans toute la masse quartzeuse. La galerie de recherche prolongée vers l'est, a ensuite coupé la salbande argileuse qui, sur toute la longueur du Comstock, forme le toit du gîte.

Cette bonanza, composée en somme de trois amas distincts, a une longueur totale de 162 mètres, une largeur moyenne de 18<sup>m</sup>,25 et plus de 90 mètres de hauteur au-dessous du niveau 900'. Son minerai a rendu successivement à la tonne de 170 à 600 francs. Elle a produit, de 1870 à 1873, dans la mine Crown Point seulement, 53.655.784<sup>f</sup>,85.

Elle a révélé un fait important : à savoir que les différents filets de matières, argile, grüstein, quartz, minerai ont uniformément conservé la direction et le plongement des épontes qui les encaissent, uniformité qui n'existe dans aucune autre bonanza.

Après avoir parcouru les 500 mètres stériles qui séparent les mines proprement dites de Gold Hill de la mine Chollar Potosi, on trouve dans cette dernière, une bonanza connue sous le nom de Blue Wing ou Bonanza sud de Potosi (G). Elle court sur le N. 34° à 40° E. en moyenne. Partant de la surface avec une puissance de 48<sup>m</sup>,64, elle suit le toit. Dans sa partie méridionale, elle atteint une profondeur de 123 mètres au-dessous de la surface et, au niveau 218', une puissance de 24<sup>m</sup>,52. Plus au nord elle descend jusqu'à 150 mètres de profondeur, mais sa puissance ne dépasse pas 15 mètres. Sa longueur totale est de 60 mètres. Elle se conforme comme allure au parement est qu'elle suit constamment (Pl. IV, fig. 4), plongeant d'abord à l'ouest sous un angle de 80°, devenant verticale, et enfin plongeant à l'est sous un angle de 60 à 70°. A son extrémité inférieure,

elle se sépare du toit et se termine en pointe effilée dans le quartz.

A l'ouest de cette bonanza Blue Wing, et dans les niveaux supérieurs de la même mine, est un petit amas irrégulier (G'), dont la section longitudinale représente deux ellipses réunies par une bande horizontale suivant leurs petits axes. Ce petit amas, sans grande importance, atteint une profondeur de 60 mètres au-dessous de la surface : son axe horizontal a 55 mètres de longueur. Il est dirigé sur quelques degrés à l'est du nord.

Au nord-est de la bonanza Blue Wing, se trouve la bonanza Potosi (H), toujours dans la même veine quartzeuse. Cette bonanza suit le parement est depuis la surface jusqu'à une profondeur de 150 mètres. Sa puissance ne dépasse pas 17<sup>m</sup>,20. La portion est était de beaucoup la plus riche ; elle tenait du sulfure noir d'argent, dont la limite ouest était définie par un filet d'argile ocreuse et de quartz très-menu. Elle a été exploitée sur 136<sup>m</sup>,80 de longueur N.-S. Sa hauteur suivant une ligne de plus grande pente dirigée vers le sud était de 185 mètres.

Dans la mine Hale and Norcross, le minerai disparaît de la veine quartzeuse où se trouvaient les bonanzas précédentes et passe à la veine qui apparaît plus à l'est et à une plus grande profondeur. Il forme, le long des deux éponges de la fissure, deux amas qui conservent intercalée entre eux une masse de quartz stérile (fig. 5). Tous deux commencent à 108 mètres au-dessous de la surface, et se prolongent en profondeur, la branche est à 275 mètres, la branche ouest à 255 mètres. La puissance est en moyenne de 3<sup>m</sup>,19, atteignant au niveau 535', un maximum de 15 mètres. Dans sa partie méridionale, cette bonanza Hale and Norcross (I), court d'abord sur le N. 40° E. ; mais en arrivant dans la mine Savage, elle tourne vers le nord. A sa partie supérieure, elle prend la direction N. 16° E. en moyenne, tandis que dans sa partie inférieure, elle ne tourne pas de

plus de 10° vers le nord. Dans cette mine Savage, elle est encore composée de deux branches, qui, au lieu d'être séparées par du quartz, le sont par un *horse de grünstein*. La branche ouest est la plus puissante ; elle a de 3 à 8 mètres d'épaisseur.

Dans le coude brusque que fait la veine quartzeuse du côté de l'ouest pour se rapprocher du mur de syénite, se trouve la grande bonanza Savage (L), dirigée N. 45 à 50° O. Comme les précédentes, elle suit le parement est, et, du sud au nord, se continue sur une hauteur verticale de 120 mètres. Elle plonge ensuite en profondeur sous un angle de 70° vers l'est. Son grand axe est incliné du côté du sud et a une longueur de 190 mètres. La puissance minimum de la masse minérale est de 6 mètres.

A l'est de cette bonanza, dans une veine quartzeuse auxiliaire et au centre de cette veine, se trouve un petit amas, appelé *Potosi Strike* (fig. 6) de 30 mètres de hauteur environ, vertical, parallèle à la bonanza Savage. Son grand axe plonge au sud et a une longueur de 90 mètres.

Vers l'extrémité nord de son grand axe, la bonanza Savage se soude presque à l'extrémité sud de la bonanza Gould and Curry (M), une des plus riches qu'on ait rencontrées dans le Comstock. Mais son allure est différente de celle de la précédente. Elle forme une masse verticale (fig. 7), ayant un grand axe plongeant au sud, divisée en deux fragments que réunit à leur base une veinule horizontale, semblable à celle qui joint les deux fragments des bonanzas de Gold Hill. L'ensemble court sur le N. 5 à 10° O. en moyenne, au milieu d'une masse quartzeuse que bordent deux *horses* de grünstein. Dans sa partie supérieure, il atteint 30 mètres de puissance. On a travaillé cette bonanza avec profit pendant cinq années consécutives, et souvent les portions négligées ont formé une réserve à laquelle on a été bien heureux de recourir pendant les années de détresse. — Les deux bonanzas Savage et Gould and Curry ont sui-

vant leur grand axe incliné vers le sud un développement de 244 mètres et une longueur horizontale de 100 mètres.

Enfin la dernière bonanza (N) qu'on ait rencontrée au nord est celle des mines Mexican et Ophir. Elle s'est présentée dans les conditions suivantes (fig. 8) : la masse quartzreuse la plus puissante (Virginia vein) suit le mur qui ici est de grüstein ; elle est stérile. Au niveau 598' de cette masse se détache verticalement un filet argileux qui se développe en montant et devient une veine quartzreuse en forme de croissant. Au niveau 485', se montre une seconde branche beaucoup moins considérable mais cependant métallifère sur 100 mètres de longueur N.-S. et 76 mètres de hauteur. La portion est la plus importante avait une puissance de 152 mètres à la surface, et descendait à une profondeur de 205 mètres, la limite nord restant bien définie, la limite sud assez mal et se recourbant vers le centre de la bonanza. Cette masse a produit plus de 10 millions de francs.

*Minérai.* — Le minérai du Comstock est aurifère et argentifère ; le produit qu'en retirent les usines contient environ 53 p. 100 d'or. L'or est probablement à l'état natif dans le minérai ; dans les portions supérieures du gîte, on le trouvait ainsi en mouches visibles à l'œil nu. L'argent s'y trouve aussi à l'état natif ; mais le plus souvent sous forme de stéphanite, argentite et polybasite. Comme matières accidentelles on rencontre de la galène riche, de la blende et des pyrites de fer et de cuivre, particulièrement dans la portion du filon située entre les mines Gould and Curry et la mine Ophir, là où les minerais d'argent n'ont pas été rencontrés.

Le quartz est l'unique gangue qui accompagne le minérai ; la quantité de carbonate de chaux que les vieux travaux ont découverte est trop réduite pour être prise en considération. Ce quartz ne présente pas toujours le même aspect. Rosé dans les niveaux supérieurs, teinte provenant de la décomposition des pyrites de fer, en profondeur il

redevient blanc. Sa dureté est variable ; tantôt il est en gros blocs très-durs comme dans la veine ouest ; tantôt, et surtout dans la veine est, en grains fins, ressemblant à du sucre, et s'abattant facilement au pic sans emploi de la poudre. Le quartz friable est généralement le plus riche ; néanmoins on a trouvé des quantités importantes de minérai dans du quartz en blocs et dur. Parfois on constate une forme rubanée très-remarquable dans le remplissage du filon, des quartz en poudre fine, en blocs et enfumés se succédant régulièrement. Malheureusement ni le plongement ni l'orientation de ces couches n'ont été relevés, pas plus que leurs relations avec les parties riches.

Les analyses suivantes faites, par M. R. H. Stretch, sur des minerais provenant de différentes bonanzas, prouvent que la composition est assez régulière. Les seules différences à noter sont les proportions des minerais plombeux et zingueux beaucoup plus considérables dans l'extrémité nord du filon que partout ailleurs.

	MINE CALIFORNIA.		MINE OPHIR.	MINE YELLOW JACKET.	
Silice. . . . .	67,5	65,783	63,38	98,310	96,560
Soufre. . . . .	8,75	11,35	7,919	0,693	0,160
Cuivre. . . . .	1,30	1,31	1,596	"	"
Fer. . . . .	2,25	2,28	5,463	0,575	2,800
Argent. . . . .	1,75	1,76	2,786	0,150	0,050
Or. . . . .	0,059	0,57	0,059	0,005	0,001
Zinc. . . . .	12,85	11,307	14,455	"	"
Plomb. . . . .	5,7	0,145	1,151	"	"
Antimoine. . . . .	"	"	0,087	"	"
	100,209	100,505	99,896	99,733	99,571

Dans les analyses suivantes, MM. Mixer et A. Hague ont groupé les éléments tels qu'ils sont dans le minérai.

	MINE SAVAGE.	MINE KENTUCK.
Silice . . . . .	93,95	91,49
Protoxyde de fer. . . . .	1,95	0,83
Alumine. . . . .	1,25	1,13
Protoxyde de manganèse. . . . .	0,64	"
Magnésie. . . . .	2,82	1,37
Chaux. . . . .	0,85	1,42
Sulfure de zinc. . . . .	1,75	0,13
— de cuivre. . . . .	0,30	0,41
— de plomb. . . . .	0,36	0,02
— d'argent. . . . .	1,08	0,12
Or. . . . .	0,02	0,0017
Bisulfure de fer. . . . .	1,80	0,92
Alcalis. . . . .	1,28	1,05
Eau. . . . .	2,33	0,59
	100,38	99,4817

Dans toutes les bonanzas, le minerai massif, dit de 1<sup>re</sup> classe, est rare; il ne forme qu'une fraction infiniment petite des matières extraites. En général, le minerai est distribué assez uniformément dans le quartz. On a constaté que les portions nord des bonanzas étaient les plus riches; que, dans une même bonanza la richesse est plus grande près de la surface qu'en profondeur. La stéphanite, le plus riche des minéraux du Comstock, est plus fréquemment rencontrée dans les mines de Gold Hill que dans celles de la portion nord du filon. J'ai dit aussi que dans ces dernières les métaux d'ordre inférieur prédominent fréquemment. Dans la bonanza des mines Ophir et Mexican, les relations des minerais d'argent et des minéraux d'ordre inférieur étaient intéressantes. De la surface à une profondeur de 18 mètres, la galène, les pyrites de cuivre et de fer étaient assez abondantes. Plus bas, la masse minérale se tenant presque verticale le long du parement est, les minerais d'argent prédominaient. Ce parement se courbant vers l'est, sous un angle sensible, ces minerais furent progressivement remplacés par la pyrite de fer et la blende.

La grande masse des minerais qui, dans les premières années de l'exploitation, rendait de 560 à 850 francs par tonne, ne rend plus aujourd'hui que 170 à 250 francs.

*Observations.* — Les allures compliquées du Comstock ont soulevé aux États-Unis de nombreuses discussions. Est-ce un filon unique? Les uns l'affirmaient; le camp adverse soutenait que le gîte était composé de deux filons, et s'appuyait pour défendre cette opinion sur la nature et le nombre des affleurements. Au point de vue de l'exploitation, c'est bien un gîte unique; mais, au point de vue géologique, c'est la résultante d'actions multiples, qui, par suite de circonstances particulières, se sont toutes produites dans un même récipient, en le développant à mesure qu'elles s'y produisaient, jusqu'à ce qu'elles l'eussent amené à ses dimensions actuelles. Quoique les circonstances auxquelles on fait allusion soient d'ailleurs purement locales, presque tous les gîtes célèbres en ont montré d'analogues, et le Comstock prouve une fois de plus que c'est dans les filons ouverts et remaniés à différentes époques que se sont concentrées les grandes richesses minérales. Entrer dans une étude approfondie de ces événements entraînerait hors du cadre de ce travail; mais il y a entre certaines parties de ce gîte remarquable des analogies et des contrastes utiles à résumer.

Au milieu des innombrables crochets que font les veines quartzieuses, on distingue trois faisceaux de directions bien nets. Le premier comprend des directions entre N. 50° et N. 45° E.; en particulier les directions N. 30° et N. 35° E. y sont fréquentes. C'est suivant elles que sont orientées les masses quartzieuses qui traversent les mines Belcher, Crown Point (portion est) Gold Hill (portion nord), Chollar-Potosi, Hale and Norcross, et les mines situées entre Gould and Curry et Ophir Sud. La ligne de contact de la syénite et du grüstein dans la mine Chollar-Potosi est dirigée sur le N. 35° E., ainsi que la fracture par laquelle s'est produite l'éruption de l'andésite. Le deuxième faisceau embrasse les directions comprises entre le N. 30° et le N. 40° O.; on le rencontre dans les mines Yellow Jacket, Gold Hill (portion

sud), Savage, Gould and Curry; suivant une direction de ce faisceau est orientée, dans la mine Savage, la masse syénitique du mur. Le troisième faisceau est composé de directions entre le N. 15° O. et le N. 15 à 20° E., c'est-à-dire comprises entre les directions des deux faisceaux précédents. Il est particulièrement remarquable dans les mines Crown Point (portion ouest), Kentuck, Gould and Curry, Ophir, Mexican, Gold Hill (portion médiane); il faut y rapporter l'orientation des micaschistes au sud du Comstock. Généralement une direction du troisième faisceau en croise une du premier et est à son tour remplacée par une direction du second, en sorte que les faisceaux de directions, tout en formant entre eux des angles aigus, déterminent dans le gîte de grandes sinuosités.

D'une manière générale, le Comstock plonge à l'est, c'est-à-dire dans le même sens que les terrains encaissants. Le mur syénitique, le seul qui ait été bien reconnu, plonge dans ce sens sous un angle de 45 à 47°. Le toit plonge d'abord vers l'ouest sous un angle assez élevé, puis se redresse, devient vertical et plonge ensuite vers l'est, sous un angle plus élevé que le mur, de sorte qu'il tend à s'en rapprocher jusqu'à une certaine profondeur à laquelle il lui devient parallèle. Les mêmes phénomènes se représentent pour les épontes de chacune des veines quartzeuses distinctes, sauf pour celles de la veine qui prend naissance dans la mine Hale and Norcross; dès son apparition son toit plonge vers l'est. Mais cette veine se termine, en montant vers la surface, par un filet d'argile qui se replie de façon à plonger vers l'ouest à son affleurement; de sorte que si les deux portions de terrains qu'elle traverse s'étaient séparées, la fente résultant de ce décollement aurait un toit qui, près de la surface, plongerait vers l'ouest. La veine ouest de la mine Crown Point fait aussi exception; mais rien ne prouve qu'elle ne soit pas le tronçon supérieur d'une veine dont la partie inférieure aurait

été rejetée vers l'ouest par une faille et qui prendrait en profondeur un plongement vers l'est.

Les parties riches sont disposées dans les veines quartzeuses de deux façons: 1° Les plus riches et les plus grandes telles que les bonanzas Gould and Curry, Savage, Gold Hill, Hale and Norcross, sont situées dans les portions du gîte où un changement d'orientation se manifeste. Ainsi les bonanzas Savage et Gould and Curry sont à l'intersection d'une veine N. 30° O. et d'une veine N. 5° E.; la bonanza Savage est orientée sur le N. 39° O., plonge verticalement puis vers l'est, son grand axe étant dirigé sur le sud; la bonanza Gould and Curry, qui est à une profondeur moindre et orientée sur le N. 7° E., reste verticale, son grand axe étant dirigé vers le sud. La bonanza de Gold Hill est située à l'intersection des trois faisceaux de direction; d'abord verticale, sa grande masse plonge en profondeur vers l'est (il faut en excepter, dans sa portion occidentale, les deux petits massifs de minerais qui plongent vers l'ouest). Elle forme deux amas soudés ensemble; l'amas nord a un grand axe plongeant vers le nord, l'amas sud un grand axe plongeant vers le sud. 2° Les autres bonanzas, Belcher, Crown Point est, Potosi, Blue Wing sont dans des portions rectilignes du gîte, toutes orientées selon des directions du premier faisceau. Je laisse ici de côté les bonanzas Crown Point ouest et Ophir-Mexican, incomplètement connues.

Toutes les bonanzas sont au toit du gîte et se conforment à son allure. Celles qui sont le mieux connues sont voisines de la surface; elles commencent donc par plonger légèrement à l'ouest, puis deviennent verticales et plongent à l'est; mais, dès que l'inclinaison dans ce dernier sens devient notable et dépasse 60° à partir de l'horizontale, le minerai disparaît. La partie supérieure de la bonanza Hale and Norcross fait seule exception; car, à son apparition, elle plonge vers l'est sous un angle de 54°, tandis qu'en

profondeur elle reprend une allure analogue à celle des autres bonanzas.

Les matières de remplissage sont : le quartz, le minerai, l'argile. On a déjà appelé l'attention sur les deux aspects distincts qu'affecte le quartz. Le quartz dur est en gros blocs, coloré en rouge par de l'oxyde de fer, et généralement stérile. Le quartz qui accompagne les bonanzas est blanc, grenu au point de ressembler parfois à du sucre, et il n'est jamais dur. Le seul quartz rosé dans lequel on ait trouvé du minerai en amas est celui de la veine ouest de Crown Point ; mais il n'est ni dur ni en gros blocs. Quoiqu'aucun des trois faisceaux de direction ne soit caractérisé par une espèce particulière de quartz, le quartz blanc prédomine pourtant dans les éléments du gîte orientés suivant les deux derniers. Dans les éléments dirigés sur le N. 30 à 45° E., on le trouve côte à côte avec du quartz dur ; mais il en est toujours séparé au moins par un filet argileux. Enfin dans les bonanzas situées dans du quartz blanc, là où elles sont verticales ou inclinées vers l'ouest, on trouve du quartz rouge formant des *horses*, comme en forment dans un filon des morceaux de roche encaissante tombés du toit.

Le minerai a à peu près la même composition dans toutes les bonanzas ; cependant la stéphanite est plus abondante dans celle de Gold Hill que dans les autres, surtout que dans les bonanzas septentrionales. Au point de vue de la *nature* des minerais, il faut remarquer les amas de métaux d'ordre inférieur, cuivre, plomb, zinc, qui sont concentrés entre les mines Gould and Curry et Ophir sud. Ces amas n'ont pas été explorés ; mais on sait qu'ils se trouvent dans des veines quartzieuses orientées suivant des directions du premier faisceau. On a remarqué, d'autre part, qu'en certains points de la veine Virginia (mine Ophir), l'or est plus abondant que l'argent ; la direction de cette portion de veine serait une de celles du troisième faisceau.

L'argile est une matière abondante dans le gîte ; les veines quelquefois puissantes qu'elle y forme ont été malheureusement peu étudiées, mais dès aujourd'hui on distingue deux espèces d'argile. L'une, qui forme les salbandes des bonanzas, contient toujours de l'argent ; l'autre ne renferme jamais de métal précieux, a des allures indépendantes de celles des veines quartzieuses et les coupe fréquemment ; par exemple la veine ouest de Crown Point est interrompue par une faille argileuse. Il paraît difficile d'admettre avec M. Cl. King qu'elles résultent uniquement de la décomposition du grüstein. Des observations suivies sur les directions et les actions de ces veines argileuses pourraient conduire à des résultats intéressants sur les âges relatifs des différentes veines quartzieuses.

Des faits précédents on est porté à tirer les présomptions suivantes :

Le Comstock est un gîte qui a été ouvert et remanié à des époques différentes par trois systèmes au moins, orientés suivant les directions des trois faisceaux : N. 30 à 45° E. ; N. 30 à 40° O. ; N. 10° O. à N. 15 ou 20° E.

La fracture initiale serait celle qui est dirigée sur le N. 35° E. : cette orientation est en effet celle de la ligne de contact de la syénite et du grüstein, des éruptions d'andésite, des amas de minerais cuivreux et plombeux, certainement antérieurs aux amas argentifères, des grandes masses de quartz dur et généralement stérile.

Les veines de quartz blanc sont considérées comme postérieures aux veines de quartz rouge et dur à cause de leur richesse, la nature fragile et l'aspect physique de leur gangue ; elles présentent une analogie frappante avec des filons dont l'origine récente a été démontrée d'une façon indiscutable ; en outre, on y trouve des fragments de quartz dur et rouge empâtés comme des *horses* dans des bonanzas ayant pour gangue du quartz blanc et fragile.

Par suite de cette circonstance et du fait qu'on trouve

les deux quartz formant des veines juxtaposées et parallèles orientées sur le N. 33° E., le quartz blanc étant riche et le quartz dur stérile, on est conduit à penser que les fentes du premier faisceau ont été ouvertes une deuxième fois au moment de l'apparition des minerais d'argent.

La structure des bonanzas, surtout de celles des mines Savage et Gould and Curry, leur plongement et leur orientation, laissent à supposer que le deuxième faisceau de directions est antérieur au troisième.

Enfin leurs allures permettent de considérer les plus riches et les plus développées, celles de Gold Hill, Savage, Gould and Curry, Hale and Norcross, comme des enrichissements produits par des croisements de filons de directions différentes. Le sens relatif de l'inclinaison du grand axe de chaque bonanza, envisagée dans le filon quartzueux auquel elle appartient essentiellement, montre que les filons orientés suivant les directions des deux derniers faisceaux sont parfaitement distincts. Ces considérations conduisent à avancer que les bonanzas Savage et Gould and Curry ne forment qu'une même masse, et qu'au contraire, tout en distinguant dans Gold Hill une bonanza est et une bonanza ouest, il serait opportun d'en distinguer aussi deux autres, une au sud et une au nord. La très-grande accumulation de matière minérale dans Gold Hill provient précisément de ce que dans cette région les *trois* faisceaux de direction ont agi l'un sur l'autre, tandis qu'en tout autre point la richesse ne s'est produite qu'au point de croisement de *deux* directions.

Cette conclusion ne préjuge pas le mode de production des autres bonanzas, et laisse de côté bien d'autres points importants. Toutefois il est probable que, la régularité du gîte s'accroissant en profondeur, des observations ultérieures plus précises jetteront enfin la lumière sur la nature et le mode de formation de ce vaste champ de fractures qu'on appelle le Comstock.

## § 2. — Exploitation.

La méthode d'exploitation par gradins renversés est adoptée dans toutes les mines du Comstock. La matière abattue est extraite exclusivement par des puits. Dans les premières années de l'exploitation, alors que les travaux n'avaient pas encore atteint une grande profondeur, la mine Gould and Curry était exploitée en partie par tunnels.

Un puits étant foncé, des galeries de niveau, dites stations, sont ouvertes de 100 en 100 pieds pour explorer le gîte. Lorsqu'une bonanza est rencontrée, on pousse du puits une galerie qui aille la recouper à sa partie inférieure, et l'on s'élève à partir de cette galerie jusqu'à ce que la bonanza soit extraite en entier.

Le terrain est généralement mauvais; les dimensions du gîte sont immenses; l'eau est abondante, la chaleur intense. L'abatage, le boisage, la ventilation, l'extraction des minerais, l'épuisement des eaux se ressentent de ces conditions difficiles, et il n'est pas sans intérêt de donner quelques détails sur les solutions plus ou moins parfaites que les Américains ont trouvées à ces différents problèmes.

*Puits.* — L'emplacement des puits fut primitivement choisi sur la portion ouest du filon, par suite de la croyance que le filon plongeait vers l'ouest. A mesure que les travaux développèrent le gîte, on s'aperçut de l'erreur commise, principalement dans la portion nord, où l'on rencontra la syénite. On abandonna donc ces puits et on en fonça de nouveaux à l'est du gîte. Il fallut transporter tous les appareils d'extraction, opération qui ne laissa pas que d'être coûteuse. Les nouveaux puits furent placés de façon à recouper le gîte à une profondeur de 200 à 450 mètres au-dessous de la surface du sol. Le gîte atteint, on continue à foncer le puits le long du mur, en lui donnant l'inclinaison de ce mur, ou bien on le continue verticalement. Ce dernier procédé est rarement employé: les puits inclinés sont

devenus d'un usage général et sont commodes, grâce à l'inclinaison moyenne du mur.

Ces puits, devant servir à une extraction très-active et à l'épuisement d'un volume d'eau très-considérable, ont de grandes dimensions qui varient ordinairement, en dedans du boisage, de 1<sup>m</sup>,368 à 1<sup>m</sup>,824 de large, sur 6<sup>m</sup>,80 ou 7<sup>m</sup>,296 de long. Ils sont divisés en trois ou quatre compartiments, dont l'un est toujours réservé à l'épuisement; les autres servent à l'extraction.

Le boisage se compose de cadres horizontaux, séparés par des poteaux qui les soutiennent, et placés à 1<sup>m</sup>,50 ou 1<sup>m</sup>,50 les uns des autres. Des planches forment une enveloppe extérieure continue autour de ces cadres, qui sont en outre reliés entre eux par des moises verticales servant de guides aux cages d'extraction. Les bois ont 35 centimètres carrés d'équarrissage, sauf les pièces qui forment les séparations des compartiments et qui n'ont que 30 centimètres carrés. En certains points où le terrain est très-mauvais, quand par exemple on traverse une puissante veine argileuse, on est obligé d'employer de doubles cadres horizontaux concentriques et juxtaposés, dont les pièces ont 35 centimètres carrés d'équarrissage. Les planches extérieures sont maintenues contre la roche par des coins en bois serrés entre elles et les cadres, et des matières de remplissage sont tassées entre elles et la roche.

M. J. D. Hague donne les prix de revient suivants du puits Gould and Curry qui a 7<sup>m</sup>,296 sur 1<sup>m</sup>,416; il est divisé en quatre compartiments. Ses dimensions, en dehors du boisage, représentent une excavation de 7<sup>m</sup>,904 sur 2<sup>m</sup>,128.

Le mètre courant a coûté, y compris le boisage :

	mètres.		francs.		
De la surface à	68,40	de profondeur	1.189,592		
De	68,40	à	129,20	—	1.708,976
De	129,20	à	190,00	—	2.292,780
De	190,00	à	210,37	—	3.210,252
De	210,37	à	267,22	—	3.811,000
De	267,22	à	343,22	—	5.804,050

Dans ces puits circulent des cages à un ou deux étages, portant des wagons. Il y a de très-nombreux modèles de ces cages, généralement très-simples, se composant de barres de fer forgé réunies solidement entre elles. Les wagons reposent sur un plancher muni de deux tronçons de rails. Sur quelques mines, ces cages sont pourvues de parachutes. En arrivant au jour, pendant qu'on en extrait les wagons, elles reposent sur des verroux.

Les wagons sont en bois, consolidés par des pièces en fer; ils sont à bascule et leur manœuvre est facile pour un homme. Le wagon de la mine Belcher pèse 400 livres et porte une charge de 1.600 à 1.800 livres.

Les grandes galeries de niveau ont 1<sup>m</sup>,824 × 2<sup>m</sup>,756 à l'extérieur des bois. A l'intérieur des bois on trouve fréquemment les dimensions 1<sup>m</sup>,368 × 2<sup>m</sup>,128. Elles doivent toujours être boisées solidement, les cadres complets (poteaux, chapeau, semelle), étant distants de 0<sup>m</sup>,60 à 1<sup>m</sup>,80. Un planchéage entre les cadres et la roche est toujours nécessaire. Le prix de revient de ces galeries varie entre 285<sup>f</sup>,25 et 388<sup>f</sup>,76 par mètre courant, boisage compris.

*Abatage.* — Les massifs à abattre, après avoir été subdivisés par des galeries et cheminées, sont exploités par gradins renversés. Très-fréquemment la poudre est inutile, et la matière s'abat bien au pic. Le minerai étant disséminé dans toute la masse quartzueuse, on abat tout. On forme ainsi des excavations énormes, nécessitant un mode de boisage particulier. Primitivement, ces excavations boisées n'étaient pas remblayées et, comme le terrain est très-peu stable, que les grandes masses argileuses exercent des pressions excessives, les éboulements étaient fréquents et s'étendaient à une grande profondeur. La nécessité du remblayage s'étant fait sentir, on s'est décidé, pour se procurer des remblais, à faire un triage grossier des minerais au chantier, et à n'envoyer au jour que la roche assez riche pour être traitée directement avec profit. Cette richesse re-

lative baisse chaque année par suite des améliorations qu'on apporte à l'exploitation et au traitement métallurgique; en sorte que des masses considérables de minerais, restées dans les vieux travaux, pourraient être traitées avantageusement au moment actuel. — Pour pouvoir remblayer, même avec des minerais pauvres, il faut que les chantiers soient ouverts en bonanza. Lorsque les remblais ainsi obtenus ne sont pas en quantité suffisante, on fait des excavations dans le quartz stérile pour s'en procurer; car les déblais fournis par les travaux de recherche sont insuffisants.

La grandeur des excavations pratiquées dans les bonanzas et la mauvaise qualité du terrain rendent le boisage particulièrement difficile. Après quelques tâtonnements, on a adopté dans toutes les mines le système suivant. Des cadres rectangulaires, de 1<sup>m</sup>,52 de section, sont juxtaposés horizontalement; sur chaque cadre s'élèvent quatre poteaux de 2<sup>m</sup>,128 à 2<sup>m</sup>,45 de hauteur qui, à leur tour, supportent une nouvelle série de cadres horizontaux. Sur ces cadres sont placées des planches, et à chacun de ces planchers correspond un des gradins renversés de l'exploitation, en sorte que chaque plancher dépasse d'un cadre le plancher immédiatement supérieur. L'ensemble est représenté par la fig. 9, Pl. IV. Les différentes pièces de bois ont un équarrissage de 30 centimètres carrés; elles sont assemblées sans boulons ni ferrures. Sur les côtés voisins des épontes des bonanzas, ces immenses échafaudages sont garnis de planches.

Ce mode de boisage est fort coûteux. Avant la construction du chemin de fer qui relie le Comstock à la ligne du Pacifique, on dépensait de 5<sup>f</sup>,95 à 17<sup>f</sup>,04 par tonne de minerai extraite, uniquement pour le bois de chantier. Les bois valaient alors de 0<sup>f</sup>,505 à 0<sup>f</sup>,70 par mètre courant de 30 centimètres d'équarrissage. Aujourd'hui ce prix est moindre; mais il augmentera certainement, la consommation énorme de bois dépeuplant les forêts d'une manière

sensible. Ce mode de boisage fait en outre courir de grands dangers aux mineurs. Deux terribles incendies arrivés en 1869 et en 1875, dans les mines de la portion sud du gîte, ont entraîné la mort de plus de cinquante hommes asphyxiés et brûlés. Le premier incendie, circonscrit depuis longtemps dans la mine Yellow Jacket, n'est pas encore complètement éteint.

*Machines d'extraction.* — Les machines employées sur les grandes mines sont puissantes; car elles doivent suffire à une extraction considérable, énorme même pour des mines métalliques. Ainsi l'on extrayait, en juillet 1875, 570 tonnes par vingt-quatre heures sur la mine Belcher et 500 sur la mine Crown Point.

Sur le puits Belcher, qui a 400 mètres de profondeur, on emploie le type suivant, qui est assez commun. La machine est horizontale, à un seul cylindre; elle marche à haute pression, sans détente ni condensation. Elle est à engrenages, avec deux bobines, montées chacune sur un arbre indépendant. L'arbre moteur porte les deux pignons correspondant aux deux roues des arbres des bobines, plus deux embrayages à dents triangulaires commandés par des leviers. Les deux bobines peuvent donc tourner soit simultanément, soit séparément. Le changement de marche se fait au moyen d'une coulisse de Stephenson. Chaque bobine est munie d'un frein manœuvré par un levier; le mécanicien qui en a charge veille aussi aux embrayages. Un troisième frein, appliqué au volant calé sur l'arbre moteur, est serré par un second mécanicien qui élève ou abaisse la coulisse et règle l'admission de la vapeur.

La vitesse des cages dans le puits est de 2<sup>m</sup>,756 par seconde.

Cette machine est plus compliquée que les types employés en France et en Belgique pour l'extraction de la houille, types auxquels elle est comparable par sa puissance et le service qu'elle doit remplir. Il est permis de

s'étonner qu'on emploie un seul cylindre pour les machines puissantes et fonctionnant d'une façon intermittente. Quoique les pignons non calés sur l'arbre moteur et les bobines à arbres indépendants permettent de donner facilement du câble et de faire l'extraction d'un seul coup à des niveaux différents avec les deux cages, l'emploi d'une bobine folle serait peut-être plus avantageux. Enfin le rapport entre le rayon de la roue de la bobine et le rayon du pignon moteur est très-grand, et l'on n'emploie pas la détente. De ces deux circonstances il résulte que, pour avoir une grande vitesse d'extraction, il faut donner une grande vitesse au piston, et que la vapeur n'est pas employée très-économiquement.

Dans le cas où le puits, après avoir atteint le mur du gîte, est continué suivant l'inclinaison de ce mur, une machine dessert les niveaux du puits vertical et une autre les niveaux du puits incliné.

L'emploi des câbles plats en acier ou en fer est général; les chaînes ne sont pas usitées. Les câbles plats en fer ont de 0<sup>m</sup>,014 à 0<sup>m</sup>,019 d'épaisseur et ceux en acier 0<sup>m</sup>,0094. Leur largeur est de 0<sup>m</sup>,089 à 0<sup>m</sup>,125.

*Épuisement.* — L'épuisement des eaux joue un rôle considérable dans l'exploitation du Comstock, car on extrait au minimum 4.000 mètres cubes d'eau par vingt-quatre heures. Sur toutes les mines on emploie le même système de pompes mues par des machines à vapeur spéciales; l'eau est extraite du puisard par une pompe aspirante qui l'élève à une hauteur de 60 à 80 pieds; de là elle est refoulée au jour par des pompes à piston plongeur. Ces pompes ont de 0<sup>m</sup>,20 à 0<sup>m</sup>,30 de diamètre intérieur; la longueur des cylindres est égale à leur diamètre. Les maîtresses tiges sont en bois, consolidés par des pièces de fer et équilibrées.

*Aérage.* — Dans les travaux profonds, la chaleur est accablante; les ouvriers travaillent nus, et ceux qui dé-

butent se ressentent des conditions mauvaises de la ventilation. Un renouvellement insuffisant de l'air est ordinairement cause de cette grande chaleur; il faut y joindre, dans la mine Belcher, par exemple, la présence de sources thermales. Pour combattre cette température de 83 à 100° Fahrenheit (29 à 30° C.), on se borne à injecter de l'air dans les mines avec un appareil dit souffleur de Root (Root's blower). C'est, en grand, l'appareil soufflant employé dans les fonderies de plomb de l'Utah. Le remède est dérisoire. L'influence de ce mauvais aérage sur les frais d'exploitation est considérable; ainsi, dans la mine Yellow Jacket, on estime qu'une galerie de 6' x 9', en terrain dur, coûte 36<sup>f</sup>,05 par pied quand l'air est frais et 164<sup>f</sup>,80, quand la température atteint 110° F. (43°,3 C.). Dans le premier cas on fait 1<sup>m</sup>,064 d'avancement par vingt-quatre heures, dans le second 6<sup>m</sup>,088 en un mois.

*Frais d'exploitation.* — M. J. D. Hague estimait, en 1868, que les frais d'exploitation s'élevaient de 34<sup>f</sup>,75 à 62<sup>f</sup>,45 par tonne. Entre autres exemples, il cite celui de la mine Savage qui paraît être une bonne moyenne. Les frais sur cette mine en 1869 se sont répartis de la façon suivante :

	francs.
Frais généraux. . . . .	2,441
Abatage, extraction, etc. . . . .	21,749
Explorations. . . . .	6,180
Travaux accessoires. . . . .	15,740
Améliorations. . . . .	1,694
Accidentel. . . . .	4,666
	40,470

Sous la rubrique travaux accessoires, il faut compter probablement les dépenses d'épuisement.

En 1873, les frais sur la mine Belcher étaient de 43<sup>f</sup>,25 par tonne.

Les frais ont varié du reste dans de larges limites suivant la position des bonanzas, la nature du terrain et diverses

autres conditions. La bonanza de la mine Ophir, qui était près de la surface, a été abattue et extraite à raison de 12<sup>f</sup>,875 par tonne, tandis que dans la mine Chollar Potosi les frais ont monté à 80 francs par tonne. Souvent, dans les mines du Comstock, on comprend sous le nom de frais d'extraction les dépenses d'extraction et d'abatage du minerai, mais on ne tient pas compte des frais d'exploration, ou du moins on n'en tient pas un compte suffisant. On exploite, nous l'avons dit déjà, sans ménager de réserves; à peine une bonanza est-elle rencontrée que les explorations sont abandonnées; on double ou triple le nombre des mineurs aux chantiers de façon à enlever le minerai riche le plus vite possible. Cet état de choses dure autant que la bonanza elle-même; puis, lorsqu'elle est épuisée, on en cherche une nouvelle; et les travaux de recherches peuvent durer quatre ou cinq ans sans produire aucun résultat. On ne compte pas les dépenses qu'occasionnent ces travaux de recherche dans les frais d'exploitation des minerais.

L'exemple suivant montre entre quelles limites varient les évaluations des frais d'exploitation du Comstock. En 1869, une commission d'ingénieurs, chargée par le gouvernement fédéral d'étudier le projet du tunnel Sutro, évalua une partie des frais annuels d'exploitation sur tout le Comstock de la façon suivante :

En admettant une production annuelle de 331.055 tonnes.	
Extraction du minerai 321.055 tonnes à 2 <sup>f</sup> ,90.	960.059 <sup>f</sup> ,50
Transport aux usines à . . . . . 9,06.	2.999.358,50
Épuisement des eaux. . . . .	642.071,10
Entrée et sortie des ouvriers, 3.000 mineurs, à 0 <sup>f</sup> ,824. . . . .	902.280,00
	<hr/> 5.503.766,90

M. Sutro, dans la discussion que subit le projet devant le congrès, reprit les nombres précédents et y ajouta les suivants, qui sont établis sur les données fournies par la commission.

Extraction de 331,055 tonnes de roche (au minimum), à 10 <sup>f</sup> ,76. . . . .	francs. 5.562.151,80
Main-d'œuvre, 3.000 mineurs à 20 <sup>f</sup> ,60 par jour. . . . .	22.557.000,00
Frais indirects d'épuisement sur les seize mines actuellement travaillées, comprenant l'usure des machines, etc. . . . .	2.348.400,00
Boisage. . . . .	2.060.000,00
	<hr/> 50.527.551,80
Plus. . . . .	5.503.768,90
Frais totaux annuels. . . . .	<hr/> 56.031.320,70

Soit par tonne 108<sup>f</sup>,83. On voit qu'il y a loin de là à l'estimation de M. J. D. Hague.

Si l'on admet que les frais faits à la mine soient représentés par la somme moyenne de 50 francs, le prix du traitement métallurgique variant entre 50 et 60 francs, il en résulte que, pour payer les frais d'exploitation, un minerai doit rendre au minimum de 100 à 110 francs par tonne.

Trois causes principales concourent à élever les frais d'exploitation :

1° Le mode de boisage qui entraîne chaque année dans la totalité des mines une consommation de 4.864.000 mètres de bois équarris de 30 centimètres de côté.

2° La ventilation très-mauvaise et la chaleur qui en est la conséquence font que, sur un poste de huit heures, les ouvriers ne peuvent pas en utiliser plus de quatre. L'air vicié contribue aussi à la prompte altération des boisages.

3° L'affluence des eaux qui oblige à de grandes dépenses *directes* d'épuisement et probablement à des dépenses *indirectes* encore plus considérables.

Sans parler ni du prix élevé de la main-d'œuvre et du bois, ni des dépenses judiciaires résultant de procès inévitables que se font les compagnies minières, etc.; éléments sur lesquels l'habileté des exploitants est sans influence; les trois obstacles sérieux que j'ai signalés

appellent des modifications essentielles dans la conduite des travaux. Ils disparaîtront en partie quand sera achevé le tunnel auquel M. Sutro, promoteur de l'entreprise, a donné son nom.

*Tunnel Sutro.* — Ce tunnel, amorcé dans la vallée de la rivière Carson, à 25 ou 30 mètres au-dessus du niveau de cette rivière, courra de l'est à l'ouest et viendra recouper le gîte à une profondeur de 608 mètres dans la mine Savage, après avoir parcouru une longueur de 6 kilomètres environ. Sa section sera de 3<sup>m</sup>,648 de hauteur sur 4<sup>m</sup>,864 de large en dedans des bois. Les wagons d'extraction seront traînés sur une double voie ferrée par une machine fixe placée à l'orifice du tunnel. Lorsque le tunnel aura atteint le Comstock, il se divisera en deux branches, l'une courant au nord, l'autre au sud, de façon à desservir les mines sur une longueur de 4 à 6 kilomètres.

La nécessité d'un pareil travail, assurant la ventilation et le drainage du gîte, ouvrant une nouvelle base d'exploitation à 600 mètres de profondeur, faisant connaître au juste la valeur des filons situés à l'est du Comstock, est incontestable. L'entreprise fut accueillie au début avec faveur, et les compagnies minières signèrent avec la compagnie du tunnel un contrat par lequel elles s'engageaient à payer une redevance de 11<sup>f</sup>,35 par tonne de minerai extraite par le tunnel. La législature de Nevada puis le Congrès passèrent des actes donnant de grands avantages à M. Sutro pour lui permettre de commencer son entreprise et de l'exécuter rapidement. Les compagnies minières, jusque-là favorables au tunnel, lui déclarèrent alors une guerre acharnée. Les conditions onéreuses des contrats en furent le prétexte; mais la raison véritable de cette opposition était tout autre. Une association puissante, la Banque de Californie, a sur le Comstock et ses produits un contrôle absolu acquis par des procédés pour le moins hardis. Il lui était désagréable qu'un nouveau venu, M. Su-

tro, pût prendre dans le pays une position capable de troubler ses profitables spéculations. Étant admis qu'aux États-Unis la richesse est la seule puissance reconnue, le résultat de la lutte fut remarquable en ce sens que ce fut le plus pauvre qui eut l'avantage. Disons ici que la grande énergie de M. Sutro fut constamment appuyée par la bourse et l'amitié d'un Français de Phalsbourg, M. Aron, auquel il dut de pouvoir traverser les moments les plus difficiles.

Le prix total du tunnel est estimé à plus de 20 millions de francs.

Outre son influence directe sur l'exploitation du Comstock, le tunnel Sutro en aura une non moins certaine sur le traitement des minerais. On se propose d'établir à son orifice de vastes ateliers de concentration, alimentés par l'eau qu'il fournira. Ce projet a des avantages puisque le manque d'eau est un des principaux obstacles à la réduction des minerais du Comstock; mais il a encore l'inconvénient de gêner les allures de la banque de Californie. Celle-ci possède en propre les usines répandues en grand nombre autour du filon sur un rayon de quelques kilomètres; elle fait payer aux compagnies minières une somme de 45 à 68 francs par tonne de minerai pour frais de traitement, et garde les résidus qui sont toujours riches: c'est pour elle une source de grands profits que tarirait l'exécution des ateliers projetés à l'orifice du tunnel.

Le tunnel a été commencé en octobre 69. En octobre 73, sur quatre puits auxiliaires qu'exige son percement, les deux premiers étaient terminés; les deux autres plus profonds en voie de fonçage. Le premier puits a 159 mètres, le second 317 mètres. Le troisième est poussé jusqu'à une profondeur de 152 mètres, le quatrième de 196 mètres. Les trous de mines sont forés par des machines à air comprimé. On estime que grâce à l'énergique impulsion donnée aux travaux, le tunnel sera terminé dans deux ans, c'est-à-dire à la fin de 1875.

## § 3. — Production.

J'inscris ici la production totale du Comstock depuis sa découverte en 1859 jusqu'au 1<sup>er</sup> janvier 1873. On pourra, d'après cette somme, se faire une idée de ce que ce gîte vraiment extraordinaire aurait pu produire s'il avait été travaillé rationnellement. Les chiffres cités sont tirés des statistiques de MM. Browne et Raymond, commissaires du gouvernement fédéral.

	francs.
En 1859 la production a été de	275.500,00
En 1860 —	515.000,00
En 1861 —	11.716.250,00
En 1862 —	55.475.000,00
En 1863 —	64.375.000,00
En 1864 —	82.400.000,02
En 1865 —	85.520.000,00
En 1866 —	60.420.000,00
En 1867 —	70.174.319,30
En 1868 —	45.775.810,55
En 1869 —	38.158.726,70
En 1870 —	42.846.444,70
En 1871 —	56.924.659,20
En 1872 —	69.884.078,60
Total. . . . .	660.620.985,85

Il serait intéressant de connaître les dépenses correspondantes. Elles ont dû être très-élevées, d'après M. R. W. Raymond. Cet ingénieur constate que chaque année la production des États-Unis en métaux précieux décroît, et ajoute à propos du Comstock : « Une des causes principales de cette décroissance est que l'exploitation des mines n'est pas favorable aux intérêts des particuliers. En neuf ans on a extrait près de 100 millions de dollars du Comstock, et dépensé une somme à peu près égale en spéculations, extravagances, procès ruineux, travaux inutiles. Du puits de la mine Bullion, le plus profond en 1869, on n'a jamais extrait une tonne de minerai. La source du mal est ce sys-

tème d'exploitation individuelle, jalouse, qui a détruit les ressources du filon en les divisant. Quarante compagnies travaillent leurs propriétés isolément ; elles emploient autant de présidents, directeurs, secrétaires, tous pourvus de salaires élevés, et ayant toute facilité pour spéculer aux dépens mêmes de leurs compagnies respectives ; ajoutez-y une armée d'hommes de lois, de témoins, d'experts, d'essayers, des milliers d'ouvriers unis pour maintenir le taux des salaires, et vous saurez où passent 50 p. 100 de la production du Comstock. »

La réunion forcée de beaucoup de ces compagnies rivales sera probablement un des plus heureux effets exercés sur l'exploitation du Comstock par le percement du tunnel Sutro.

## CHAPITRE DEUXIÈME.

## FILONS ARGENTIFÈRES D'AUSTIN (NEVADA).

*Situation géographique.*— Avant la construction du chemin de fer du Pacifique, la grand'route transcontinentale, suivie par les émigrants entre le Mississippi et la Californie, passait par le *cañon*, où s'élève aujourd'hui la petite ville d'Austin. En 1862, un des courriers de la poste découvrit dans ce cañon du minerai d'argent. A la suite de cette découverte fut fondé le district minier de Reese River, qui prit son nom d'un petit ruisseau du voisinage.

La vieille route est aujourd'hui abandonnée, et les mines sont devenues d'un accès plus facile. On quitte le chemin de fer du Pacifique à la station de Battle Mountain, située à 841 kilomètres de San Francisco et 2.258 kilomètres d'O-maha, et, après avoir parcouru en diligence une distance de 158 kilomètres, on arrive à Austin. Cette dernière partie du trajet est des plus désagréables. On suit, en la remontant,

la vallée de la rivière Reese, large d'environ 12 ou 15 kilomètres, et bordée par deux chaînes de montagnes complètement nues et arides. La vallée elle-même ne produit qu'un petit arbrisseau informe, le *sage-brush*, sauf sur les bords de la Reese, où l'on aperçoit de temps à autre un filet de verdure. En revanche, elle est remplie d'un sable alcalin très-fin, d'une odeur désagréable, qui s'attache aux vêtements et s'incruste dans les pores de la peau. L'eau qu'on retire des puits est salée ; tout est sable et alcalis. Le confort d'une diligence américaine n'est pas fait pour ajouter aux charmes du voyage.

Austin a eu son moment de prospérité, et a compté jusqu'à 5 ou 6.000 habitants ; mais la population, rapidement agglomérée, s'est dispersée à mesure que de riches mines ont été découvertes dans d'autres parties de l'État de Nevada. Austin n'est plus aujourd'hui qu'un gros bourg de 2.000 habitants au maximum, en hiver quartier général des chercheurs de mines qui explorent le sud de l'État. Son altitude dépasse 2.000 mètres au-dessus du niveau de la mer. Le séjour en est peu agréable, la neige commence en septembre, et déjà en août le froid est quelquefois assez vif pour obliger à allumer du feu ; une journée de pluie y est un événement. Le pays ne produisant rien, les objets de première nécessité viennent de Californie par chemin de fer, puis par voiture. Comme dans tout le Nevada, on éprouve un sentiment insurmontable de tristesse à l'aspect de ces longues chaînes de montagnes dénudées et des vallées désertes qui suivent leur base. Quelques Peaux-Rouges, jouant aux cartes dans une maison abandonnée, ou mangeant avec une satisfaction évidente des fruits de Californie, sont les seuls objets de curiosité que rencontre le voyageur.

Tous les filons découverts jusqu'à ce jour sont situés dans les monts Toyabe, une de ces nombreuses petites chaînes qui sillonnent le Grand Bassin en courant du sud au nord

parallèlement les unes aux autres. Ces monts sont bordés à l'est par la vallée Smoky ; à l'ouest par la vallée de la Reese. Leur largeur moyenne ne dépasse pas 12 kilomètres. Au delà de la limite nord de la carte (fig. 1, Pl. V), ils se développent en collines transversales, par lesquelles ils se soudent aux montagnes voisines. La direction générale de la chaîne est N. 25° E. ; mais la ligne de partage des eaux est extrêmement sinueuse. Les petits torrents qui sortent des cañons atteignent rarement la Reese ; ils disparaissent dans les sables. La Reese elle-même qui, topographiquement, est un affluent de la rivière Humboldt, ne lui apporte que rarement ses eaux ; elle est à sec avant d'avoir parcouru tout son lit ; ses dimensions sont celles d'un ruisseau.

Tout le pays est très-élevé : la vallée Smoky est à 1.645 mètres et celle de la Reese, près d'Austin, à 2.000 mètres d'altitude. Le point culminant de la chaîne, le mont Poston, situé loin au sud d'Austin, atteint 3.691 mètres au-dessus du niveau de la mer.

#### § 1. — Gisement.

*Terrains et roches* (fig. 1, 2, 3, Pl. V). — Des différentes roches que l'on rencontre dans le voisinage d'Austin la plus importante est le granit, puisque c'est elle qui contient les gîtes minéraux. C'est un granit à grain assez grossier, tantôt noir (indice de richesse dans les mines), tantôt blanc par suite de la disparition graduelle du mica. Il est disposé en strates remarquablement réguliers et peu puissants, dirigés N.-O.-S.-E. et plongeant sous l'horizon de 25 à 40° vers le N.-E. D'innombrables petites fissures, se réunissant ou se perdant en profondeur, le traversent en tout sens ; elles sont remplies par des filets de quartz. Intercalées entre les strates et se conformant à leur allure, se rencontrent des couches d'argile noire de quelques centimètres de puis-

sance ; elles rendent un boisage serré indispensable dans les mines. Ce granit se décompose facilement après quelque temps d'exposition à l'air ; les strates noirs sont les plus durs et résistent le mieux.

Deux masses granitiques principales sont représentées sur la carte. L'une, sur le versant est des monts Toyabe, comprend le mont Park ; c'est la plus développée, mais elle ne renferme point de gîtes minéraux. La deuxième, plus restreinte, forme le versant ouest de la chaîne ; c'est sur elle qu'est bâti Austin et que sont installées les exploitations minières.

Le granit est recouvert par diverses roches sédimentaires et volcaniques.

La rhyolite est la seule roche volcanique visible près d'Austin. Elle forme la masse du mont Prométhée. C'est une roche vésiculaire, d'un brun pourpre, dont la pâte feldspathique englobe des cristaux microscopiques de feldspath, de mica en abondance, et, à l'occasion, de quartz enfumé. Au travers de la masse sont disséminées des concrétions sphéroïdales de feldspath ayant jusqu'à 0<sup>m</sup>,02 de diamètre. Quand on descend le versant ouest du mont Prométhée en s'avançant vers Austin, on observe cette roche passant à une perlite noire, dans laquelle la structure sphéroïdale est beaucoup moins développée et privée de zones concentriques ; il n'y a plus de cristaux de quartz libre apparent. Cette rhyolite s'est fait jour au travers du granit. Elle a coulé sur cette roche et sur les roches sédimentaires voisines.

Il faut signaler à une assez grande distance d'Austin des éruptions de grüstein-propylite.

Les formations sédimentaires comprennent quatre groupes : 1° des schistes ; 2° des calcaires ; 3° des quartzites ; 4° des débris d'époque très-récente. Les trois premiers groupes forment des assises en stratification concordante.

Les schistes, sur une longueur de près de 100 kilomè-

tres, occupent la portion centrale de la chaîne Toyabe. Ce sont tantôt des schistes argilo-siliceux, tantôt des schistes cristallins et profondément métamorphosés. Fréquemment ils passent aux calcaires par gradation lente en sorte que leur ligne de démarcation est difficile à tracer nettement. Ces roches sont très-brisées, leur direction et leur plongement changent constamment. Près du pic Télégraphe, elles plongent au sud-est.

Les calcaires sont compactes, d'un bleu sombre, à grain fin et parsemés de filets de carbonate de chaux cristallisé. M. Emmons les rapporte au terrain carbonifère inférieur.

Les quartzites sont moins abondants que les roches précédentes. Ils sont au-dessous des schistes et n'apparaissent que dans la portion sud de la chaîne.

Dans ces roches sédimentaires et dans le granit apparaissent des dykes fréquents de grüstein et d'une roche analogue à la syénite. Ces dykes ont de 15 à 20 mètres de puissance ; leurs dimensions sont donc trop restreintes pour qu'on ait pu les représenter sur la carte. Ils ont fait leur apparition principalement sur le versant est de la chaîne ; ils plongent au sud-est et courent sur le N.-E. comme la chaîne elle-même. Comme exception à cette règle, un dyke coupe les schistes du pic Télégraphe suivant la direction du N.-O.

Sous le nom de formation quaternaire on a désigné sur la carte une masse très-récente de détritits de toutes sortes, variant comme dimensions d'une poussière impalpable à de gros blocs de rochers et couvrant entièrement les vallées.

Avant de décrire les filons d'Austin, j'indiquerai, pour mémoire, les filons exploités en dehors du district proprement dit de Reese River, dont Austin est le centre.

1° Dans le sud de la chaîne, à 60 ou 70 kilomètres d'Austin, et sur le versant est, se trouvent les mines de Buckeye et de Murphy. Dans la première on exploite un

filon N.-S. plongeant à l'ouest sous un angle élevé, au contact des schistes et du calcaire; dans la seconde, un filon de même direction plongeant à l'est sous un angle de 45°, et compris entièrement dans les schistes. Il est coupé par une faille E.-O.

2° A une distance d'Austin à peu près égale, mais au nord, se trouve le district de Cortez dont les filons principaux encaissés par un quartzite blanc, courent du N. au S. et plongent vers l'est sous un angle très-faible. D'autres filons au contraire, courent sur l'est-ouest et plongent au nord sous des angles voisins de 90°. L'importance de ces deux districts n'a pas été jusqu'ici bien grande.

*Allures générales des filons d'Austin (fig. 4, Pl. V).* — Quoique la zone métallifère qui environne Austin, soit de faible étendue, elle est d'une étude difficile. Sur une superficie de 18 kilomètres carrés au maximum, on a prétendu avoir découvert près de cinq mille filons. La plupart probablement n'ont jamais existé; un très-petit nombre est exploité actuellement; d'autres, qui l'étaient au moment où la fièvre de découverte sévissait, ont été abandonnés. Les plans de ces anciens travaux manquent, et, comme il est presque impossible de visiter les travaux eux-mêmes, on ne peut vérifier que très-difficilement les ou-dit des anciens mineurs.

Actuellement la compagnie Manhattan, de New-York, est la seule qui continue des travaux sur une grande échelle; grâce à sa prudence et à une sage économie, elle est parvenue à se rendre maîtresse de presque toute la zone métallifère, et ainsi débarrassée de futures querelles judiciaires avec ses voisins, elle peut exploiter avec fruit sa propriété.

Les géologues américains qui ont visité les filons d'Austin les répartissent en plusieurs groupes. M. J. Arthur Phillips (\*) en distingue quatre :

(\*) Mining and metallurgy of gold and silver, p. 363.

	DIRECTION:	PLONGEMENT:
1 <sup>er</sup> groupe.	N.-O.	45° N.-E.
2 <sup>e</sup> groupe.	N. 75° O.	50° N.-E.
3 <sup>e</sup> groupe.	N. 25° O.	70° O.
4 <sup>e</sup> groupe.	N.-S.	Très-faible vers l'ouest.

Lorsqu'on étudie les différents filons, on est peu porté à admettre une classification aussi radicale. Qu'on prenne une des galeries d'allongement du filon Oregon, l'un des mieux connus (fig. 4, Pl. V), ou du filon North Star, et l'on y trouvera de très-nombreuses directions variant entre N. 50° O. et N. 110 à 120° O. Le seul fait incontestable, c'est qu'on rencontre deux *orientations moyennes* bien caractérisées, l'une entre le N.-O. et l'ouest, suivie par les filons riches; l'autre N.-S., suivie par des filons pauvres ou mêmes complètement stériles. Les filons du second système coupent et rejettent les filons du premier.

Ces deux groupes sont caractérisés aussi par leur plongement. Les fentes N.-S. sont presque verticales, ou plongent à l'ouest sous un angle très-élevé; une seule exception a été rencontrée: au quatrième niveau de la mine Oregon, le filon est coupé par une faille très-couchée. Le plongement des filons N.-O. est beaucoup plus variable et passe de 25 à 60 et même 70°, c'est-à-dire que les filons tantôt suivent le plongement des strates granitiques et tantôt les coupent franchement. Le sens du plongement est toujours le N.-E.

Un filon métallifère Yankee Blade fait exception et plonge, dit-on, de 70° vers l'ouest; son orientation moyenne est N. 25 à 50° O. Il est au nord et en dehors de la région actuellement étudiée.

Les filons, dits filons N.-O., présentant d'aussi nombreuses variations dans leur direction, sembleraient devoir se couper quelquefois les uns les autres. Un seul exemple d'une pareille intersection est cité. Au près du puits N. Star, un filon dont l'élément, au point étudié, présente une direction

N. 48° O. est coupé par un élément de direction N. 54° O. d'un filon voisin; on n'observe pas de rejet, mais une simple interruption.

Au point de vue de la richesse, quelques observateurs divisent la région minière en deux parties séparées par une ligne S.-E.-N.-O. passant soit par la mine Savage soit par la mine Diana. Suivant eux la portion est serait riche, la portion ouest, au pied de la montagne, plus pauvre; cet appauvrissement serait graduel. — D'autres attribuent à la zone est favorisée une limite N.-S. passant par les mines Savage et Diana. Cette manière de voir n'est pas complètement justifiée par les faits, mais elle s'explique en ce sens qu'en traversant la zone métallifère de l'est à l'ouest, on trouve un terrain de moins en moins brisé par des failles et des accidents de toute espèce. Les failles paraissant avoir produit un enrichissement lorsqu'elles ont coupé les filons, il s'ensuit que, là où elles manquent, les filons sont plus pauvres quoique plus puissants et plus réguliers. Il est parfaitement constaté d'ailleurs que la richesse est très-irrégulière dans un même filon, que les minerais forment des masses en relation avec le plongement et la nature du terrain encaissant. On a déjà dit à ce sujet que le granit le plus noir était à la fois le plus dur et le plus riche. Les observations sont malheureusement insuffisantes pour fixer d'une manière précise l'allure de ces parties riches. Toutefois elles ont mis en évidence les circonstances suivantes : 1° Dans certains filons une direction variant entre N. 45 à 55 et même 60° O. est favorable; dans les autres, la bonne direction est entre N. 70° et N. 80° O. 2° Un minerai de la première direction est toujours plus riche en minéraux d'argent proprement dits qu'un minerai de la deuxième, qui, en général, contient une quantité assez forte de galène, blende, pyrites et autres impuretés relatives. 3° L'argent rouge, le *ruby silver* des Anglais, est un des minerais principaux d'Austin; lorsqu'on

le trouve orienté dans la deuxième direction, sa teinte est beaucoup plus claire que lorsqu'il est orienté dans la première. Il est probable que dans le premier cas ce minerai est de la proustite, tandis que dans le second c'est de la pyrargyrite. Ce caractère, très-constant, est assez saillant pour que les mineurs d'Austin s'en servent pour classer les veines en filons N.-O. et en filons N. 54° O. Ils rapportent, en s'exprimant ainsi, leurs observations à l'aiguille aimantée; la déclinaison à Austin est de 16° 45' est.

Les filons sont très-peu puissants; leur épaisseur se réduit souvent aux deux salbandes d'argile qui les accompagnent constamment. Elle atteint jusqu'à 2 mètres; mais une puissance moyenne de 0<sup>m</sup>,25 à 0<sup>m</sup>,40 est généralement celle qui accompagne les parties riches.

Outre les grandes failles N.-S. qui ont fait perdre les gîtes ou nécessité pour les retrouver des travaux considérables, on rencontre dans l'exploitation de nombreux accidents impossibles à classer faute de documents. On n'en a point pris note lorsqu'ils se présentaient parce qu'ils n'offraient point de difficultés pour le travail. Souvent, par exemple, une veine se dérange de quelques centimètres de telle façon que la portion supérieure paraît avoir glissé le long de la colline vers le S.-S.-O. Ces sauts se reproduisent quelquefois à de très-courts intervalles, le filon présentant alors une forme en échelons.

On voit (*fig. 4, Pl. V*) combien la direction N.-E. est fréquente dans les galeries de recherches à travers bancs. C'est généralement en la suivant qu'on a retrouvé les filons perdus par la rencontre d'une faille; on marchait, dans cette recherche, à angle droit avec le filon travaillé, d'après cette idée que la portion perdue devait se retrouver dans la roche à un niveau supérieur, par suite du glissement du toit sur le mur. Depuis quelque temps on a abandonné cette méthode qui ne réussissait pas toujours et on chemine dans les failles elles-mêmes qui sont minces et argileuses.

Ce glissement signalé vers le S.-S.-O. paraît avoir été une des grandes causes de perturbation dans les filons. Il affecte très-différemment les diverses portions d'un même gîte, et quelquefois semble s'être produit autour d'un centre de rotation situé à l'est du puits North Star. Dans la portion totale du filon qui a été mise en mouvement, une partie a glissé plus loin que l'autre; en sorte que cet accident, insignifiant dans une mine, prend des proportions considérables dans une mine voisine et sur le même filon. Dans d'autres cas, la rupture du filon, au lieu de se produire suivant une ligne horizontale tracée dans son plan moyen, s'est effectuée suivant une ligne très-inclinée. Dans une mine, par suite, on rencontre la fracture tout près du sol, et dans une mine voisine, à une profondeur considérable.

Il serait intéressant de savoir si les perturbations produites par les failles et par ces glissements sont distinctes, et dans ce cas quelles sont les plus anciennes. Leur étude serait véritablement nécessaire dans une région aussi troublée que celle d'Austin. Elle l'aurait été surtout au début des travaux, les filons paraissant devenir plus réguliers en profondeur. Dans les niveaux inférieurs, on constate encore des surfaces polies et striées, non seulement auprès des épontes, mais dans l'intérieur même du filon.

*Minerais.* — Les principaux minéraux que l'on rencontre dans les filons d'Austin sont : l'argent rouge antimonial et arsenical, l'argent sulfuré, la polybasite, la stéphanite et le cuivre gris. L'argent rouge antimonial est plus abondant que l'arsenical; de toutes les espèces citées, c'est celle que l'on rencontre le plus rarement cristallisée. Au début des exploitations et jusqu'à la profondeur de 20 à 25 mètres, où l'eau commence à apparaître, le chlorure d'argent était abondant et prédominait; au-dessous, il a été remplacé par les composés sulfurés. Dans la portion centrale du Nevada, c'est un fait général que tous les filons argentifères sont riches en chlorure d'argent à leurs affleurements.

La gangue se compose de quartz. La blende, les pyrites, et la galène se rencontrent assez fréquemment, ainsi que bien d'autres minéraux, mais en quantité trop restreinte pour jouer un rôle dans le traitement métallurgique.

Les différentes substances sont ordinairement disposées en rubans; et l'aspect des filons est très-beau quand, en même temps que des pyrites, ils renferment du silicate rose de manganèse, qu'il n'est pas rare d'y trouver. Ordinairement ce silicate se trouve soit au centre du gîte, soit au mur. En certains points le rubanement est assez net pour qu'on puisse relever jusqu'à seize rubans successifs, ainsi disposés : 1° silicate de manganèse avec pyrites; 2° quartz blanc; 3° minerai d'argent avec pyrites; 4° quartz; 5° minerai d'argent; 6° quartz; 7° silicate de manganèse; 8° quartz. L'autre moitié du filon présente la même disposition. Jamais le minerai ne se trouve au centre du filon; c'est au toit ou au mur qu'il faut chercher l'argent. Quelquefois, en dehors des salbandes argileuses, on trouve le granit encaissant imprégné de minerais très-riches.

La valeur des minerais traités est toujours considérable. Pendant les six premiers mois de 1873 elle a été de 1.571<sup>f</sup>, 15 par tonne, ce qui suppose une teneur de 606<sup>gr</sup>,8 aux 100 kil., en estimant le gramme d'argent à 0<sup>f</sup>,22. M. R. W. Raymond cite une campagne de quinze jours, en 1870, pendant laquelle on a traité des minerais d'une richesse extraordinaire.

NOMS DES MINES.	VALEUR PAR TONNE.	TENEUR AUX 100 KILOG.
	francs	grammes.
Morris and Caple. . . . .	15.778,98	7.172,1
Dollar Hide. . . . .	5.365,65	2.438,8
Oregon. . . . .	3.470,71	1.577,5
Plymouth. . . . .	4.878,92	2.217,6

La teneur moyenne des minerais traités pendant l'année 1871 était de 650<sup>gr</sup>,8 aux 100 kilog; la tonne de minerai valait 1.431<sup>f</sup>,78.

Donner une nomenclature exacte des filons découverts, ou travaillés, sur un espace même aussi restreint que celui qui est représenté par la carte ci-jointe (fig. 4, Pl. V), et décrire les travaux, serait une tâche interminable. Aux obstacles naturels, les lois minières des États-Unis ont forcé les exploitants à en ajouter d'autres. Une patente fédérale donne au patenté 450 mètres sur la longueur de la veine et 90 mètres de chaque côté, comptés à la surface du sol. Si le filon sort des plans verticaux menés par les limites du rectangle indiqué de la surface, le patenté n'a point le droit de le suivre sur le terrain voisin, à moins qu'il n'obtienne pour ce terrain une nouvelle patente. Si le filon exploité est riche, cette nouvelle patente sera impossible à obtenir; tout le terrain qui environne la première patente est occupé depuis la découverte du gîte par des individus qui espèrent qu'une faille ou tout autre accident heureux enverra le gîte chez eux. Avec de pareilles lois, il n'est pas aisé de travailler des filons dérangés comme ceux d'Austin. Un exploitant sérieux est obligé de demander des patentes pour des veines quelquefois imaginaires, de façon à protéger son exploitation réelle. Qu'une galerie de recherche découvre un filon n'affleurant pas, on le fait patenter immédiatement comme découverte nouvelle; si les travaux postérieurs prouvent que ce nouveau filon n'est qu'une portion d'un filon déjà connu et patenté, on se garde de divulguer le secret dans la crainte de procès. Un filon brisé en vingt portions recevra autant de noms différents et appartiendra peut-être à vingt compagnies différentes. Il résulte d'un pareil état de choses un fouillis inextricable et de perpétuelles confusions.

Je me bornerai à mentionner les travaux exécutés sur les filons importants.

1° *Filon North Star.* — Sur ce filon étaient établies trois mines appartenant aux compagnies : North Star, Buel

North Star et Timoke. Aujourd'hui, la compagnie Manhattan en est seule propriétaire.

Voici quels sont les travaux de la mine North Star. Un puits vertical, portant le même nom, a été foncé et a coupé la veine à une profondeur de 56 mètres. Une galerie d'allongement a été poussée vers l'est sur 69 mètres de longueur et vers l'ouest sur 108 mètres; cette dernière a été abandonnée par suite de l'appauvrissement du filon. C'est le premier niveau. — A 10 mètres plus bas, une galerie à travers bancs, longue de 28 à 29 mètres, a rejoint le filon, dans lequel on a ouvert une galerie d'allongement poussée vers l'est sur 170 mètres, vers l'ouest sur 79 mètres de longueur. A 51 mètres à partir du puits, la branche ouest a rencontré une faille qui avait rejeté le filon à 90 mètres au S.-O.; le filon a été retrouvé très-appauvri au delà du rejet. A 90 mètres de profondeur, on a ouvert un troisième niveau; la branche est a été arrêtée à 154 mètres du puits; la branche ouest, au bout de 19 mètres, rencontra une faille qui rejeta la veine au S.-O., à une distance de 78 mètres. Le filon retrouvé fut suivi pendant 42 mètres, puis perdu de nouveau par suite d'un nouveau croisement; on ne l'a pas suivi au delà. — A ce niveau, les travaux entrent en communication avec ceux de la mine Buel North Star.

Le puits North Star a été alors abandonné, et le centre de l'exploitation porté au puits Oregon, qui coupe le filon à une profondeur de 155 mètres. A cette profondeur, on a poussé vers l'est une galerie de 127 mètres; la galerie ouest, à environ 110 mètres du puits, rencontra une faille qui déranga le filon. Il a été retrouvé au delà, mais considérablement appauvri; les travaux furent alors arrêtés.

C'est dans les deux premiers niveaux qu'on a rencontré les plus grandes richesses et principalement à l'ouest du puits: là on a suivi le minerai riche sur 30 mètres au moins. Cette colonne s'élevait du deuxième niveau à quelques mètres au-dessus du premier. Entre ces deux niveaux

l'inclinaison de la veine ne dépasse pas 25°; elle est donc très-couchée. — Le troisième niveau était moins riche. A ce niveau, le filon présente deux directions principales moyennes, l'une N. 50° O., l'autre N. 83° O.; les divers éléments du filon oscillent autour de ces directions moyennes; l'amplitude des déviations ne dépassant pas 6 ou 7° dans un sens ou dans l'autre. Le quatrième niveau, comme richesse, paraît encore moins favorisé; il n'a été riche que dans la portion qui est à l'ouest du puits Oregon. Cependant la production s'est constamment soutenue. Entre les deux derniers niveaux, l'inclinaison est de 30°. — A ce quatrième niveau, les directions des éléments ne se succèdent pas avec la même régularité qu'au niveau précédent; ils semblent avoir subi une déviation générale vers l'ouest, en sorte qu'au lieu d'osciller autour des directions N. 50° O. et N. 83° O., ils oscillent autour du N. 60 à 64° O. et O.-E. — Sur la droite du puits Oregon, on remarque des directions fortement infléchies entre l'ouest et le sud, atteignant jusqu'à la valeur O. 81° S. ou N. 9° E. Elles proviennent probablement de l'action d'une fissure N.-S., qui s'est fait moins fortement sentir en profondeur et n'a pas rejeté complètement le filon, mais lui a fait subir une déviation générale vers l'ouest. — C'est un fait digne de remarque que les éléments d'un filon retrouvé au toit d'une faille étaient toujours plus infléchis vers l'ouest que les éléments qui précédaient le point de rencontre. On a constaté aussi qu'au mur des failles les filons étaient riches et devenaient pauvres au toit de ces mêmes failles.

Sur la mine Buel North Star, le filon a été attaqué par un puits incliné; on le perdit plusieurs fois pendant ce travail, mais on le retrouva toujours facilement; aussi n'a-t-on point consigné les accidents rencontrés. A une profondeur de 115 mètres, mesurés suivant l'inclinaison du puits, on était dans du minerai riche quand on rencontra une faille N.-S. On la traversa et l'on continua le puits sur une longueur

de 19 mètres sans retrouver le gîte. Suivant l'idée que la portion perdue se trouvait dans le terrain au-dessus, on poussa une galerie à travers bancs dirigée au N.-E., et, à 67 mètres du fond du puits, on retrouva le filon, ou du moins une veine qu'on regarda comme le filon. On poussa dans le gîte une galerie d'allongement: la branche est, à 9 mètres de son point de départ, rencontra une faille N.-S. plongeant à l'ouest et fut abandonnée; la branche ouest fut poussée pendant 30 mètres à travers une colonne de minerai riche qui subsistait à la couronne de la galerie. Le minerai massif présentait une puissance de 0<sup>m</sup>,375. A cette distance de 30 mètres, l'appauvrissement se manifesta et la galerie fut abandonnée. — Les travaux furent alors portés au puits Pacific à 250 ou 270 mètres au N.-E. du puits incliné. A 120 mètres de profondeur, on ouvrit une galerie à travers bancs dirigée au sud-ouest qui rencontra le filon à 80 ou 90 mètres du puits; la galerie d'allongement qu'on ouvrit ensuite traça près de 100 mètres de minerai riche vers l'est, puis atteignit la faille qui avait coupé les niveaux supérieurs. Quelques travaux sont encore poursuivis vers l'ouest. Le filon, d'abord pauvre dans cette direction, montra ensuite de beau minerai.

Dans la mine Timoke, on descendit aussi dans le gîte par un puits incliné d'environ 30° comme le gîte lui-même. A 105 mètres de profondeur, mesurés suivant l'inclinaison, on trouva une faille N.-S. plongeant à l'ouest. Le filon, jusque-là, avait été riche, mais exclusivement à l'ouest du puits. — Après avoir rencontré la faille, on continua le puits, ou plutôt une galerie en descente inclinée seulement de 15° sur l'horizon. A 12 ou 15 mètres de distance, on trouva le filon très-apauvri. — On le suivit pendant environ 20 mètres, puis il fut coupé par une nouvelle faille et ne put être retrouvé au delà; les travaux furent abandonnés.

2° *Filon Oregon.* — Les travaux entrepris sur ce filon

n'ont pas encore atteint la profondeur de ceux du North Star; mais ils ont donné lieu à de nombreuses découvertes de filons n'affleurant pas, en sorte que le puits dit *Oregon*, foncé sur la veine du même nom, peut être considéré comme le centre d'exploitation le plus actif d'Austin.

Ce filon est considéré comme un filon N.-O. (magnétique) par les mineurs du pays, à cause des caractères minéralogiques de ses minerais et de la répétition fréquente de cette direction dans ses éléments. — En réalité, comme le filon North Star, il présente un grand nombre de directions différentes, se groupant en deux faisceaux; le premier faisceau est limité par les directions N. 45° ou 50° O et 65° ou 70° O.; les côtés du second sont orientés N. 75° ou 80° O. à N. 95° ou 100° O. environ. Pour chacun d'eux les déviations extrêmes sont de 15° à 20° et ne paraîtront pas anormales si l'on tient compte de la faible puissance et du plongement modéré des strates granitiques. Le plongement du filon lui-même dépasse rarement 40°. Son affleurement court à environ 60 ou 70 mètres au N.-E. de celui du filon North Star.

Les travaux ont débuté par le puits incliné, dit *Campbell's incline*, foncé suivant le gîte. A la profondeur de 52 mètres, mesurés selon l'inclinaison, une galerie d'allongement fut ouverte: c'est le niveau Campbell. A ce niveau supérieur, le gîte a une allure très-tourmentée, mais ne subit aucun accident. On fonça ensuite, plus au nord, un puits vertical, dit *Oregon*, qui coupa le filon à une profondeur de 72 mètres. Une nouvelle galerie d'exploitation fut ouverte; sa branche est fut poussée sur 48 mètres de longueur. En ce point, le filon se divisa en deux veines, l'une conservant les directions indiquées précédemment, l'autre courant beaucoup plus au nord. Cette branche sud était tout à fait pauvre et la branche plus septentrionale avait une richesse au-dessous de la moyenne; à une faible distance en profondeur, les deux veines se réunirent, et l'on retrouva

la richesse normale. Au niveau Campbell, on ne rencontra point cette bifurcation, probablement parce que les travaux ne furent pas poussés assez loin; car, à la surface, où l'affleurement est très-net, elle est facile à constater. En suivant cet affleurement, on a vu qu'à une distance horizontale de 150 mètres environ, à partir du point de bifurcation dans le deuxième niveau, les deux veines se réunissent à la surface et n'en forment plus qu'une. — La branche ouest de la galerie de niveau, à 60 mètres du puits, rencontra une première faille qui rejetait le filon à 7 mètres au sud; le filon fut retrouvé et suivi, puis perdu de nouveau et retrouvé à 10 ou 15 mètres plus au sud. Ces rejets successifs l'appauvrissaient.

A la profondeur de 87 mètres, un travers bancs de 30 mètres rejoignit le filon et une nouvelle galerie fut ouverte; sa branche ouest, à 60 mètres de distance, rencontra une faille, au delà de laquelle elle n'a pas été suivie.

Enfin, à une profondeur de 103 mètres, on poussa un travers bancs de 60 mètres et on ouvrit un autre niveau. La portion ouest du filon est appauvrie; dans la portion est, on rencontra une faille très-couchée, plongeant à l'ouest; cette portion a été abandonnée.

Actuellement on abat le filon entre les niveaux 3 et 2 et l'on foncé un puits suivant l'inclinaison du filon à partir du quatrième niveau.

En même temps que ces travaux d'exploitation proprement dits, on poussait des travaux d'exploration qui ont donné des résultats satisfaisants. Le puits *Oregon* rencontra à la profondeur de 35<sup>m</sup>,5 un filon qu'on appela *Blind Ledge*. A 52 mètres de profondeur un travers bancs dirigé N.-E. recoupa ce même filon à 19 mètres du puits et successivement les veines suivantes:

Miantonomah. . . . .	à 65 mètres du puits.	
Stetefeldt. . . . .	à 76	—
Frost Lode. . . . .	à 94	—

Huber. . . . .	à 115 mètres du puits.	
Alliance. . . . .	à 123	—
Lee. . . . .	à 136	—
Farrell. . . . .	à 154	—

La galerie a été arrêtée à une distance de 168 mètres à partir du puits. Les filons *Blind Ledge*, *Frost*, *Alliance*, ont été suivis en galeries; ils paraissent parallèles à l'Oregon et au North Star, quoique les travaux soient encore de date trop récente pour les avoir bien fait connaître.

Deux galeries d'allongement ont tracé le *Blind Ledge*. La première, ouverte au niveau de 36 mètres, a été poussée à 30 mètres du puits vers l'ouest et arrêtée par une faille; vers l'est, on continue les travaux qui sont à environ 50 mètres du puits; le minerai est de bonne qualité. Le deuxième niveau, de 52 mètres, rencontra la même faille à 37 mètres à l'ouest du puits; vers l'est il mesure 70 mètres; le filon y est devenu pauvre. On n'a point fait de recherches au delà des failles.

Au niveau 87 mètres, une autre galerie de recherche fut poussée dans la direction N.-E. et coupa trois filons, tous trois sans affleurements. Ce sont les filons: *Fortuna*, *Black Lode*, *Monitor*. D'autres petites veines très-faibles et présentant quelques mouches de minerai n'ont pas reçu de nom. Le *Monitor* a été exploré par une galerie d'allongement, poussée à l'est sur 49 mètres et à l'ouest sur 60 mètres, distance à laquelle elle a rencontré la faille qui coupe le filon Oregon au même niveau. Ce filon *Monitor* paraît avoir quelque analogie avec le *Blind Ledge*, comme direction et inclinaison.

A 155 mètres de profondeur, le puits Oregon coupe le filon North Star qui a été suivi par une galerie d'allongement. De l'extrémité ouest de cette galerie on a marché vers le sud en recherche et rencontré dans l'ordre suivant les filons:

Ruby Lode.	Pacific.
Alsop.	Antartic.
Research.	Curtis.
Hiko.	

L'Antartic seul a été travaillé, mais depuis fort peu de temps.

Enfin il reste à signaler, au milieu de ces veines reconnues par les travaux dont le puits Oregon est le centre, un filon appelé *Blue Lode*, peu puissant, mais paraissant assez riche. Le puits Oregon le coupe à une profondeur de 78 mètres. On ne lui a pas reconnu d'affleurement et les travaux d'exploration n'ont pas encore prouvé sa valeur.

Voilà donc un groupe de 21 filons. Sur ce nombre, combien y en a-t-il de réellement distincts? La compagnie Manhattan se tait avec raison sur cette question par crainte de querelles judiciaires avec ses voisins.

5° *Filons Florida, etc.* — Les filons Florida, Isabella, O'Connell, Ogden, Dollarhide, Troy, etc., constituent au N.-O. un autre groupe de mines. On y trouve les mêmes caractères de minerais et d'allures que dans le groupe précédent, et il est probable qu'un certain nombre de ces filons ne sont autre chose que des portions rejetées vers l'ouest des filons ci-dessus décrits. Les travaux y sont moins suivis et généralement, à la première rencontre de failles, les galeries ont été abandonnées après quelques recherches insignifiantes.

Sur le filon Florida, le puits a atteint une profondeur de 152 mètres, suivant l'inclinaison, et cinq galeries d'allongement ont été poussées dans le gîte. Elles sont distantes de 30 mètres environ les unes des autres, et mesurent de 30 à 50 mètres. Les trois premières ont ouvert un riche amas de minerai ayant de 30 à 40 mètres de longueur, une puissance de 0<sup>m</sup>,10 à 0<sup>m</sup>,15 et s'étendant du troisième niveau à la surface; tout a été enlevé avant 1868. On connaît encore du minerai entre les deux derniers niveaux;

mais depuis 1869 les travaux ont été suspendus. Au nord de l'affleurement de ce filon, on a foncé deux puits d'exploration qui n'ont amené aucune découverte : l'un, le puits Sherman, a atteint une profondeur de 76 mètres; l'autre, le puits Burns, à 450 mètres à l'ouest du précédent, une profondeur de 27 mètres.

Avant que la compagnie Manhattan eût absorbé toutes les propriétés qui avoisinent les mines Oregon et North Star, la compagnie Buel North Star avait formé une association avec sa voisine Lane and Fuller. Ces sociétés réunies avaient foncé le puits Lane and Fuller situé entre les puits Pacific et Florida, et qui, poussé à une profondeur de 122 mètres, rencontra plusieurs filons. Si ces veines avaient été exploitées, elles auraient donné des indications précieuses sur l'allure des filons Oregon, North Star, Blind Ledge et Monitor, à l'ouest de la grande faille qui les coupe et les rejette tous. Le puits rencontra successivement :

Black Ledge. . . . .	à 5 <sup>m</sup> ,04 de profondeur	} affleurant près de son orifice.
Florida. . . . .	à 55 <sup>m</sup> ,50	
Oleander. . . . .	à 59 <sup>m</sup> ,50	—
Miner. . . . .	à 42 <sup>m</sup> ,50	—
Tyler. . . . .	à 48 <sup>m</sup> ,60	—
Dyer. . . . .	à 70 <sup>m</sup> ,80	—
Warren. . . . .	à 86 <sup>m</sup> ,60	—

Ce dernier filon avait 0<sup>m</sup>,10 de puissance et était riche. Du fond du puits, on poussa vers le N.-E. une galerie d'exploration à travers bancs, qui, après un parcours de 55 mètres environ, rencontra un filon que l'on regarda comme étant le Warren; on l'a exploré, mais faiblement.

Tout près du puits Lane and Fuller, et juste au-dessus de l'affleurement du filon Florida, affleure le filon Troy, ouvert par puits incliné jusqu'à une profondeur de 85 mètres environ. Dans le filon, le minerai était en amas et en poche au lieu d'être en *courses*. La direction moyenne est indiquée N. 40° O; le plongement est de 20 à 30° N.-E.

4° Filons du groupe N. 54° O. — Les filons, considérés par les mineurs comme faisant partie du groupe dirigé sur le N. 54° O. magnétique, ont été exploités dans les mines suivantes : Diana, Morgan and Mussy, Allida, Savage, Seymour, Southern Light, Groves et Mohawk. On sait déjà ce qu'il faut entendre par *groupe* N. 54° O. C'est une direction rencontrée fréquemment dans les éléments brisés des galeries de niveau, mais que l'on observe aussi très-fréquemment dans les filons N. 45° O. En général, le plongement de ces filons est beaucoup plus roide que celui des autres.

A la mine Diana, on a foncé d'abord un puits incliné de 45 et de 65°, suivant le gîte; ensuite un nouveau puits vertical a été entrepris et poussé à la même profondeur que le puits incliné, soit environ 75 mètres au-dessous de la surface. De courtes galeries de niveau ont été ouvertes dans le gîte. A la profondeur de 75 mètres, la branche est de la galerie d'allongement a rencontré une faille; une galerie de recherche a été poussée dans la direction N.-E. sur 22 mètres sans retrouver le filon.

A la mine Morgan and Mussy, on a foncé un puits incliné et mené deux galeries de niveau à 60 ou 70 mètres de profondeur. Vers l'est, où on les poussait dans l'espérance de rencontrer une zone riche du filon, elles ont été coupées par une faille. Partant du niveau 70 mètres N.-E. un travers banc a recoupé le filon à 19 mètres de son point d'arrêt. On l'a suivi dans la direction est et reperdu au bout de 14 mètres. On a alors poussé une cheminée montante suivant l'inclinaison du gîte et, à 13 pieds au-dessus de la galerie précédente, ouvert un autre niveau; à 19 mètres de la cheminée, une nouvelle faille rejeta le filon à 32 mètres plus au nord.

L'exploitation par le puits incliné a été alors interrompue et portée au puits vertical South American (déjà foncé). Le filon y prend le nom d'Allida. A 80 ou 85 mètres de pro-

fondeur verticale, un travers bancs N.-E. a coupé le filon pauvre, mais montrant vers l'est des indices d'une grande richesse en proustite; vers l'ouest à 90 mètres du travers bancs, une faille a rejeté le filon; des travaux de recherches sont activement poursuivis. La mine est en pleine exploitation.

Les mines Savage, Seymour et Southern Light sont sur une même veine située à une faible distance au sud du filon North Star. La mine Seymour, la plus orientale, n'a pas été exploitée en profondeur. Le Southern Light avait été travaillé sur une faible profondeur au moyen d'un puits vertical, quand une faille N.-S. fut rencontrée au delà de laquelle on ne put retrouver le filon. On commença alors à la mine Savage un puits incliné qui mesura 106 mètres. Le filon a été riche entre ce puits et la limite S.-E. de la propriété, distante du puits de 136<sup>m</sup>,80. Trois galeries de niveau ont été ouvertes; dans la première le filon était riche jusqu'à cette limite, sauf sur quelques pieds près du puits; au deuxième niveau la richesse commença à 9 ou 10 mètres du puits et cessa à 15 mètres de la limite S.-E. par la rencontre d'une faille N.-S. plongeant de 35 à 45° vers l'ouest. Enfin, au troisième niveau, le minerai ne commençait qu'à 20 ou 25 mètres du puits et la faille fut rencontrée à 60<sup>m</sup>,80 de la limite S.-E. La distance des deux niveaux n'étant que de 4<sup>m</sup>,86, la faille était donc très-couchée. On la regarde comme identique à celle qui coupe le puits incliné Buel North Star.

Je n'ai pas pu visiter les autres mines du pays, et les renseignements obtenus sur elles sont trop vagues pour qu'il y ait lieu de les reproduire ici.

#### § 2. — Exploitation et production.

L'exploitation ne présente aucun trait caractéristique. L'abatage procède par gradins renversés et avec rem-

blais; le boisage doit être serré et solide à cause de la facile décomposition des strates granitiques et des bandes argileuses qui les séparent; l'extraction se fait soit dans de petites bennes, soit au moyen de wagons circulant dans des cages. Les machines d'extraction sont ainsi disposées: sur chaque bobine est fixée une roue, *a*, qui lui est concentrique et dont le bord est échancré de façon à présenter la forme d'un V sur toute la longueur de sa circonférence. Vis-à-vis de cette roue et calée sur l'arbre moteur s'en trouve une de plus petite dimension, *b*, dont le bord a la forme d'un V saillant pouvant s'engager dans le V rentrant de la roue précédente. L'arbre de la bobine et de la roue *a* étant mobile horizontalement, les deux pièces, *a* et *b*, peuvent être amenées en contact; le frottement détermine la mise en marche. Comme avec un pareil système, le mouvement n'est possible que dans un sens, celui de l'extraction, on contrôle la descente au moyen d'un frein appliqué directement sur la bobine. — L'eau n'est pas abondante et est épuisée au moyen de petites pompes; les travaux ne sont pas assez développés pour motiver des galeries d'écoulement et d'ailleurs la configuration du sol s'y prête peu.

Les mines de la compagnie Manhattan produisent par mois environ 725 tonnes, celles des autres compagnies de 75 à 80, ce qui donne pour tout le district une production mensuelle totale de 800 tonnes de minerai.

Par suite de l'allure irrégulière et de la faible puissance des filons, la proportion de minerai est toujours faible par rapport à celle du stérile. Elle varie de 2 à 15 ou 18 p. 100 suivant qu'on est en exploration ou qu'on abat une partie riche.

La compagnie Manhattan emploie environ 160 mineurs abattant la roche. Ils sont payés à la journée ou par contrat. La journée est de 8 heures et se paye 20<sup>f</sup>,60. Les mineurs aux chantiers d'abatage reçoivent de 8 à 10 p. 100 de la valeur du minerai, suivant la richesse. Dans les ga-

leries de niveau on paye tant par pied plus 5 p. 100 de la valeur du minerai. Dans les travers banc, on paye par pied d'avancement, représentant environ 20 pieds cubes de roche, de 18 à 61<sup>f</sup>,80 suivant la dureté du roc. La moyenne est de 25<sup>f</sup>,75 par pied d'avancement, soit 84<sup>f</sup>,539 par mètre. Les puits ont 5' sur 14' (1<sup>m</sup>,52 sur 4<sup>m</sup>,256); le fonçage est payé en moyenne 154<sup>f</sup>,50 par pied, soit 508<sup>f</sup>,223 par mètre.

Voici, d'après M. Hague, le prix de fonçage du puits Oregon. La section a 3<sup>m</sup>,648 sur 1<sup>m</sup>,216 en dedans des bois; elle est divisée en trois compartiments; le terrain est solide sans être trop dur, et le boisage léger. — Dans une région comprise entre 90 et 120 mètres de profondeur, les frais faits pour 12<sup>m</sup>,77 portent le prix de revient à 1.165<sup>f</sup>,18 par mètre.

Les frais se sont répartis en :

	par pied.	par mètre.
Main-d'œuvre . . . . .	155 <sup>f</sup> ,857	— 446 <sup>f</sup> ,898
Machine, mécanicien, transport, etc. . . . .	68,444	— 225,144
Matériaux consommés . . . . .	81,834	— 269,190
Combustible . . . . .	34,865	— 114,687
Poudre, bougies, fusées, acier, etc. . . . .	12,465	— 40,996
Préparation et mise en place des bois. . . . .	8,600	— 28,289
Transport à la surface . . . . .	12,154	— 39,980
Prix total . . . . .	354 <sup>f</sup> ,217	1.165 <sup>f</sup> ,184

*Frais totaux d'exploitation.* — Pendant l'année 1872, on a extrait 945<sup>f</sup>,224 de minerai des mines North Star et Oregon. Les frais d'exploitation se sont élevés à 749.228<sup>f</sup>,695, ainsi répartis

Main-d'œuvre: 18.590 journées d'ouvriers. . . . .	417.839 <sup>f</sup> ,482
Roulage, machines, travail au jour, etc. . . . .	139.415,650
Outils, boisage, combustible, frais généraux, etc. . . . .	191.973,563
Total . . . . .	749.228 <sup>f</sup> ,695
Soit par tonne 788 <sup>f</sup> ,63.	

Dans cette somme sont compris les travaux d'explora-

tion. Entre les travaux d'exploration et ceux d'exploitation proprement dits, les frais se décomposent ainsi :

*Travaux d'exploitation proprement dits.*

Main-d'œuvre: 11.073 journées d'ouvriers. . . . .	271.090 <sup>f</sup> ,232
Roulage, ma- chines, etc. $\left\{ \begin{array}{l} \frac{11.073}{18.590} \times 139.415,650 \dots \end{array} \right.$	83.041,947
Outils, boi- sage, etc. $\left\{ \begin{array}{l} \frac{11.073}{18.950} \times 191.973,363 \dots \end{array} \right.$	114.347,513
Total . . . . .	468.479 <sup>f</sup> ,692
Soit par tonne . . . . .	495 <sup>f</sup> ,104

*Travaux d'exploration.*

Main-d'œuvre: 7.517 journées. . . . .	146.749 <sup>f</sup> ,250
Roulage, etc. $\frac{7.517}{18.590} \times 139.415,650 \dots$	56.373,702
Outils, etc. $\frac{7.517}{18.590} \times 191.973,363 \dots$	77.625,950
Total . . . . .	280.748 <sup>f</sup> ,902
Soit par tonne . . . . .	293 <sup>f</sup> ,532
Total . . . . .	788 <sup>f</sup> ,637

*Production du district.* — Pendant l'année 1872, le traitement de 4.570<sup>f</sup>,37 de minerai a produit en dix mois une somme de . . . . . 4.563.287<sup>f</sup>,88  
Pendant les six premiers mois de 1873,  
on a produit . . . . . 3.015.322<sup>f</sup>,785

CHAPITRE TROISIÈME.

FILONS AURIFÈRES ET ARGENTIFÈRES DU COLORADO.

*Situation géographique.* — Le Territoire du Colorado comprend deux régions presque égales en étendue : celle des Montagnes Rocheuses à l'ouest; celle des Grandes

Prairies à l'est. L'une et l'autre sont encore très-imparfaitement connues. Dans la première sont situés les gisements métalliques, nombreux et variés auxquels le Territoire doit sa population et sa prospérité; la seconde produit les denrées agricoles nécessaires aux mineurs.

L'expédition scientifique du docteur Hayden, entreprise en 1873, a mis en relief quelques points intéressants de la géographie des Rocheuses. Entre les 38° et 40° degrés de latitude nord, ces montagnes forment trois grandes chaînes à peu près parallèles et de direction N.-S. — La première, à l'est, borde les Prairies, et, pour cette raison, est désignée sous le nom de *Front range*. Ses sommets principaux s'élèvent à une altitude de 4.200 à 4.516 mètres au-dessus du niveau de la mer. — A l'ouest de cette chaîne s'étend la région des *Parks*, sortes de vallées montagneuses de 60 à 70 kilomètres de largeur totale, divisées en trois parties, Park du nord, Park du centre, Park du sud, par des chaînes transversales de direction E.-O., relativement basses et brisées. — Les Parks sont bordés à l'ouest par la chaîne dite des Parks, qui atteint en certain point une hauteur de 4.000 mètres. — A 25 ou 30 kilomètres à l'ouest de cette seconde chaîne, s'étend la Sierra Madre, dont les pics s'élèvent, comme ceux des chaînes précédentes, à des hauteurs de 4.200 et 4.520 mètres. La Sierra Madre est la ligne de partage des eaux de l'océan Atlantique et de l'océan Pacifique.

Dans ces montagnes se trouve une zone minérale dont les limites sont encore mal définies. Elle comprend en particulier les comtés de Clear Creek et de Gilpin, qui renferment les mines les plus anciennes et le mieux développées, les seules dont il sera parlé ici. Ces mines sont situées sur le versant oriental du *Front range*, sous la latitude de 38° N. environ, à la hauteur du Park du centre. Celles de Clear Creek sont argentifères; celles de Gilpin aurifères. Tout récemment quelques mines du comté de

Boulder, au nord du comté de Gilpin, ont attiré l'attention, notamment celle de Red Cloud, district de Gold Hill, riche en tellurure d'or et d'argent; mais les travaux ne sont pas encore assez développés pour présenter beaucoup d'intérêt.

Denver, la ville la plus importante du Colorado, est sur la rivière South Platte, à 19 kilomètres de la base du *Front Range* et à 1.520 mètres au-dessus du niveau de la mer. Elle est reliée à Saint-Louis, sur le Mississipi, par le chemin de fer du *Kansas Pacific*. Les voies ferrées de *Denver Pacific* et de *Denver and Rio Grande* la réunissent, d'une part à la grande ligne du Pacifique, d'autre part avec les villes du Sud et le Nouveau-Mexique. Enfin, en quittant cette ville par le chemin du *Colorado central*, on se rend facilement aux districts miniers de Clear Creek et de Gilpin. Le chemin de fer suit le torrent de Clear Creek, affluent de la South Platte, et pénètre dans les Rocheuses à Golden City, à qui sa position promet un prompt développement industriel. En ce dernier point la voie se divise en deux branches, qui aboutissent, l'une à Black Hawk, au centre des mines d'or de Gilpin, l'autre à Floyd Hill, à 28 kilomètres de Georgetown, centre des mines d'argent de Clear Creek. Des voitures publiques font le trajet quotidiennement entre Floyd Hill et Georgetown. On se rend de Georgetown à Black Hawk à travers les montagnes en cinq heures de voiture.

#### § 1. — Filons aurifères du comté de Gilpin.

*Historique.* — Depuis 1852 l'existence de l'or dans le Colorado était connue. En 1859 quelques placers étaient exploités, quand le 6 mai de cette même année un mineur, nommé Gregory, découvrit un filon de quartz aurifère. Suivant l'habitude américaine, il s'ensuivit un *excitement*, c'est-à-dire une fièvre d'or. Des compagnies s'organisèrent dans les États de l'est; on amena d'au delà le

Mississippi tous les engins d'exploitation possibles; on construisit à grands frais des usines d'amalgamation sur le modèle californien; on bâtit Black Hawk, Central City, Nevada, trois villages à la suite les uns des autres, et n'en formant qu'un malgré leurs organisations distinctes; les luttes à coups de revolver, les procès, les spéculations suivirent leur cours inévitable. Bref, jusqu'en 1863 le pays fut prospère; quand, soudain, le minerai se transforma en profondeur. On traitait le quartz pour or natif et l'on se trouva en présence des pyrites; on ne sut comment les travailler, et l'inexpérience produisit un désastre. De 1865 à 1867, les inventeurs de procédés métallurgiques eurent beau jeu. Le pays était divisé en deux camps: l'un expérimentant, l'autre attendant les résultats. On chercha à fondre les minerais et l'on scorifia l'or; puis on s'ingénia à les traiter au moyen de réactifs chimiques, tels que l'acide pyrolique. Personne ne trouva le remède désiré, et l'on arriva peu à peu à la méthode d'amalgamation, suivie encore aujourd'hui malgré ses imperfections. Les travaux de mines reprirent un peu de vie; mais en 1869 une nouvelle difficulté surgit: l'eau devint abondante. Aucune des compagnies qui exploitaient le même filon ne désirait avoir l'épuisement à sa charge; celles dont les travaux étaient les plus profonds s'arrêtèrent pour attendre leurs voisins et à force d'attendre, laissèrent envahir les mines qui furent complètement noyées. En 1873, après trois ans de suspension de travaux, les compagnies n'avaient pu encore s'entendre sur la question d'épuisement que dans quelques cas trop rares. L'exploitation a donc été fort languissante pendant ces dernières années; on s'est borné à achever l'abatage de la roche dans les niveaux supérieurs non envahis par les eaux; peu de mines ont été travaillées en profondeur.

Les villages de Black Hawk, Central City, Nevada s'allongent à la suite l'un de l'autre sur 4 kilomètres de lon-

gueur, dans un ravin étroit où coule le ruisseau Gregory; leur altitude est de 2.523 mètres au-dessus du niveau de la mer. Les mines sont groupées autour d'eux dans un rayon de 3 à 4 kilomètres. Le pays présente un aspect désolé, pas un arbre des magnifiques forêts qui existaient autrefois n'ayant été laissé debout. Tous les objets nécessaires à la vie viennent de Denver; tous les produits métalliques y retournent en sortant des usines qui sont sur les mines mêmes ou à une faible distance. On compte environ 40 milles, soit trois heures de chemin de fer, de Black Hawk à Denver.

#### ALLURES GÉNÉRALES DES FILONS. — MINÉRAIS.

Toutes les hautes crêtes du Front Range sont formées de granit, gneiss et micaschiste. Ces roches, dans le comté de Gilpin, constituent des bancs épais, plongeant vers l'est, et difficiles à tracer à la surface; on les voit mieux dans les mines. Quelques roches amphiboliques et de nombreux fragments d'épidote sont à signaler sur la colline Gunnell, à l'ouest de Central City.

C'est dans le granit et le gneiss que se rencontrent les filons. Ils forment trois faisceaux (*fig. 5, Pl. V*) courant sur les directions suivantes:

1° Entre E.-O. et N. 85° E. avec inclinaison vers le sud. Tels sont les filons Bobtail, Burroughs, Gardner-Indiana, Flack-Mercer, Gunnell, Winnebago, Kansas, Illinois (en partie);

2° N. 55 à 60° E. avec inclinaison vers le sud. Par exemple les filons Briggs, Bates, Fisk, Illinois (en partie);

3° N. 45° E. avec inclinaison soit vers le nord, soit vers le sud. Par exemple le filon Gregory.

Cette dernière direction est la plus rare; la première prédomine, sans pourtant être exclusivement celle des meilleurs filons. On a toujours considéré le Gregory comme le

filon le plus riche du comté de Gilpin; mais, en étudiant ses relations avec le filon Briggs, on voit facilement que c'est à ce dernier, et non pas au Gregory, que sont dues les richesses.

Le minerai se compose de pyrite de fer et de cuivre pyriteux aurifères. Dans les portions des gîtes voisines de la surface, ces pyrites se sont décomposées et l'on a eu de l'or natif. L'argent est toujours mêlé à l'or en proportions variables, mais croissantes de l'est à l'ouest. Ainsi les minerais de première classe contiennent :

Bobtail. . . . .	Pour 1 gr. d'or. . . . .	1 gr. d'argent.
Briggs. . . . .	<i>Idem.</i> . . . . .	1 <sup>er</sup> ,789 —
Gregory. . . . .	<i>Idem.</i> . . . . .	2 <sup>es</sup> ,070 —
Illinois. . . . .	<i>Idem.</i> . . . . .	5 <sup>es</sup> ,000 —
Gardner. . . . .	<i>Idem.</i> . . . . .	3 <sup>es</sup> ,286 —
California. . . . .	<i>Idem.</i> . . . . .	6 <sup>es</sup> ,000 —
Flack. . . . .	<i>Idem.</i> . . . . .	9 <sup>es</sup> ,714 —

Dans les filons de direction N. 85° E., on a constaté que la richesse était plus grande, ou tout au moins plus uniformément répartie, dans la portion est que dans la portion ouest.

Dans un même filon, le minerai se présente de deux façons : en veinules massives de pyrite, ou en mouches finement disséminées dans la gangue. Suivant le mode d'aggrégation, on distingue le minerai de fusion et le minerai d'amalgamation. Les deux classes forment le tiers ou la moitié au plus de toute la roche extraite; le poids du minerai massif le dixième de celui du minerai disséminé. Le plus souvent les deux modes d'occurrence sont simultanés; le filon se compose de la veinule solide de pyrite, variant de zéro à 0<sup>m</sup>,60 ou 0<sup>m</sup>,90 de puissance, accompagnée dans le reste de la fissure d'une gangue imprégnée de mouches minérales. La puissance totale des filons varie de 0<sup>m</sup>,30 à 3<sup>m</sup>,65 et même 4<sup>m</sup>,50; une puissance moyenne de 0<sup>m</sup>,30 à 0<sup>m</sup>,55 est considérée comme favorable à la richesse. Quel que soit

l'état de l'or dans les pyrites, qu'il soit mélangé mécaniquement ou en combinaison chimique avec elles, toutes les bonnes mines ont fourni des spécimens d'or natif, non-seulement dans les parties voisines de la surface, mais aussi en profondeur. Dans le filon Briggs, par exemple, on a pu suivre au milieu de la veinule de pyrites un filet d'or natif s'entre-croisant avec un filet d'argent, également à l'état natif.

Les deux espèces de pyrites, cuivreuses et ferrugineuses, sont aurifères; les premières paraissent être les plus riches. La richesse est grandement influencée par l'état physique des pyrites; une cristallisation grossière entraîne la pauvreté.

L'argent se trouve partiellement allié à l'or; mais à mesure que sa proportion augmente, les espèces minérales avec lesquelles on le trouve ordinairement associé, telles que la galène et la blende, sont leur apparition. Tantôt ces matières sont intimement mélangées aux pyrites; tantôt, au contraire, elles forment dans la veine des filets bien distincts. Les minerais d'argent proprement dit sont très-rares: On cite pourtant le sulfure noir comme ayant été rencontré en proportion notable. Une partie du filon Flack a présenté la structure suivante : au mur, une salbande argileuse, suivie d'une veinule de galène et blende, de 0<sup>m</sup>,05 à 0<sup>m</sup>,07 de puissance; puis une veine de matière verdâtre, quartzeuse et feldspathique, imprégnée de pyrite de fer; ensuite un filet solide de ces mêmes pyrites, de 0<sup>m</sup>,05 à 0<sup>m</sup>,10 de puissance; enfin une gangue quartzeuse imprégnée de pyrite de fer, de cuivre pyriteux, et constituant un minerai d'amalgamation. Quelquefois la galène et la blende forment dans le filon des poches et des amas et non pas des veinules.

On prétend avoir trouvé des blendes aurifères.

L'or qu'on obtenait par pulvérisation et lavage des minerais de surface présentait parfois un phénomène singulier. Il avait une teinte d'un gris brun et sans éclat; de là

le nom d'*or rouillé* (rusty gold) qu'on lui donnait. Cet or s'amalgamait fort mal, et paraissait insensible à l'action du mercure. Le fait se répétait le plus fréquemment avec des minerais tenant une forte proportion de galène et de blende.

Le seul métal, autre que l'or et l'argent, ayant de la valeur dans ces minerais, est le cuivre; la teneur des pyrites est quelquefois considérable et monte jusqu'à 10 et 15 p. 100 (\*).

La gangue n'a pas du tout l'aspect bien connu de celles des filons aurifères de Californie. Quelquefois, et surtout dans les mines orientales du district, on retrouve le quartz blanc; mais le plus souvent on est en présence d'une matière quartzreuse et feldpathique, d'un vert jaunâtre, fréquemment onctueuse au toucher, et perdant vite sa dureté au contact de l'air. Ailleurs on rencontre une matière assez semblable au granit et au gneiss qui encaissent le filon, même quand les épontes sont bien nettement marquées: dans ce cas le filon est pauvre. On n'a signalé qu'une exception à cette pauvreté; dans les niveaux inférieurs du filon Briggs on trouve comme gangue partielle un gneiss aussi mou qu'une terre argileuse, mais dont le mica a conservé une orientation bien déterminée; ce gneiss accompagne une portion du filon de richesse moyenne.

L'allure des filons est assez régulière comme direction; on n'a pas, jusqu'à ce jour, rencontré de failles dans les exploitations. Sans présenter de rubanement parfait, les filets métalliques et leur gangue sont généralement en bandes remarquablement parallèles. Les épontes sont bien définies, au moins l'une d'elles; le plus souvent, le mur. Le plongement est toujours très-grand; il n'y a pas de filon

(\*) D'après des avis récents, on aurait découvert à l'usine de Golden City, qui traite de ces minerais, de 0,25 à 0,50 p. 100 de nickel dans des produits de four à manche.

plongeant sous un angle inférieur à 75°; les uns plongent au nord et les autres au sud. Le Gregory plonge tantôt au nord, tantôt au sud. — La puissance de la veine varie avec la richesse; ces deux éléments sont influencés d'une façon très-remarquable par la nature du terrain, gneiss ou granite, que traverse le filon. Le fait est assez général pour que les ouvriers mineurs aient adopté un terme, le mot *cap*, pour désigner l'appauvrissement du filon et la réduction simultanée de sa puissance. Les renseignements précis sur la position des caps manquent malheureusement, car les vieux mineurs du Colorado sont partis pour de meilleures régions pendant la suspension des travaux et ont été remplacés par des ouvriers nouveaux qui, tout en conservant les termes dont se servaient leurs prédécesseurs, ne connaissent aucun détail des exploitations anciennes. M. J. D. Hague décrit ainsi une portion de *cap* dans le filon Flack: « Le puits est de la mine Flack, sur le filon du même nom, traverse plus de 30 mètres de *cap*. La puissance de la veine était un peu supérieure à 0<sup>m</sup>,60; au toit était une fissure de 0<sup>m</sup>,025 à 0<sup>m</sup>,05, remplie d'une matière molle, argileuse et quartzreuse, puis un lit de roche stérile qu'on peut regarder comme un granit très-pauvre en mica, avec petits amas de gangue intercalés. Plus au nord, près du mur, était un autre lit, plus puissant que le précédent, de gangue ordinaire et sans minéral. » Dans ce puits on voit très-bien le granite et le gneiss disposés en bancs qui plongent vers l'est.

1° *Filons Gregory et Briggs*. — Le Gregory a été le premier filon découvert dans le comté de Gilpin; le point de découverte est situé dans le petit ravin qui sépare les collines de Bobtail et de Gregory. L'affleurement a été tracé sur une longueur de 1.216 mètres dans la direction N. 45° E. Il descend la colline Gregory, traverse le ravin de Gregory Gulch, remonte la colline Bates, et disparaît près de Chase Gulch.

Sur quatorze compagnies fondées pour exploiter ce filon, cinq seulement ont fait des travaux sérieux; ce sont :

Smith and Parmelee, occupant sur la longueur du filon au nord de Gregory Gulch. . . . .	91 <sup>m</sup> ,20
Briggs, occupant au sud de Gregory Gulch. . . . .	75,80
Black Hawk. . . . .	91,20
Consolidated Gregory. . . . .	152,00
Narragansett. . . . .	121,60
Total. . . . .	531 <sup>m</sup> ,80

Le filon tracé sur 1.216 mètres a donc été travaillé sur 531<sup>m</sup>,80 seulement.

De 1859 à 1866, les travaux furent poussés avec ardeur; mais, de cette date à 1869, une décadence sensible se produisit, et par suite d'inondation, en 1869, les travaux furent suspendus. Douze puits avaient été foncés; leur longueur totale était estimée à 1.614 mètres; celle des galeries de niveau ouvertes à 850 mètres. La profondeur maximum était 166 mètres. En 1873, la mine Briggs seule était exploitée en profondeur; à la mine Narragansett, on abattait du minerai, autrefois négligé, dans les niveaux supérieurs; sur les mines Smith and Parmelee, Black Hawk, et Consolidated Gregory, les travaux étaient complètement arrêtés.

D'après les quelques renseignements obtenus, le filon paraît avoir été pauvre à Narragansett.

A la mine Consolidated Gregory, les puits, qui ont été foncés verticalement, restent *presque* constamment entre les épontes du gîte. Le filon, dans les mines Black Hawk et Briggs, plonge au S.-E. sous un angle de 83°. A Smith and Parmelee, il plonge au N.-O. sous un angle de 80°. Dans l'intervalle, il est coupé par le filon Briggs de la façon suivante. Les deux filons affleurent assez près l'un de l'autre pour être travaillés entre les mêmes épontes sur plus de 30 mètres de profondeur; horizontalement et dans la direction du nord, leur divergence est d'abord de quelques de-

grés seulement; mais bientôt elle s'accroît, Gregory courant sur l'heure 3 et Briggs sur le nord 55° E. avec une grande régularité. A une profondeur de 30 et quelques mètres, une divergence en verticalité se prononce également, Gregory plongeant au N.-O. sous un angle de 80° et Briggs au S.-E. à peu près sous le même angle; à 72<sup>m</sup>,96 au-dessous de la surface du sol, la distance horizontale entre les deux filons est de 21<sup>m</sup>,88. — Horizontalement, la jonction se fait entre les deux puits de la mine Briggs, et, dans cette même mine, les deux filons ont été travaillés comme s'ils formaient une seule veine. A une profondeur de 40 ou 50 mètres, ils se séparent en plongeant tous deux vers le sud-est. La ligne suivant laquelle se fait le contact n'est pas verticale; elle plonge vers le S.-O., en sorte que dans la mine Black Hawk, la séparation ne se fait plus qu'à une profondeur de 76 à 80 mètres, et à 91 mètres plus à l'ouest que dans la mine Briggs.

Le filon Briggs est constamment le plus riche des deux; dans les trois mines Smith and Parmelee, Briggs et Black Hawk, les travaux ont atteint sur ce filon une profondeur moyenne de 160 mètres, tandis que sur le Gregory ils n'ont été poussés dans la mine Briggs qu'à une profondeur de 40 mètres, et n'ont pas dépassé 30 mètres dans la mine Smith and Parmelee.

La mine Briggs emploie, au moment actuel, vingt-cinq hommes travaillant au filon du même nom. Le puits d'extraction a 182 mètres; en ce point, le filon a de 0<sup>m</sup>,50 à 0<sup>m</sup>,60 de puissance et produit de bon minerai. Les travaux n'ont été repris qu'en juillet 1872. L'eau, qui formait alors une colonne de 148 mètres de hauteur dans le puits, fut épuisée en dix semaines. Les mines voisines étant encore noyées, on ne put développer les chantiers jusqu'aux limites de la propriété, et l'on s'étendit en profondeur. On extrait de 18 à 20 tonnes de minerai par jour.

Le minerai comporte deux classes :

1° le minerai de fusion valant de 658<sup>f</sup>,61 à 709<sup>f</sup>,45 la tonne; sur neuf essais, les deux extrêmes ont donné :

Or. . . . .	26 <sup>g</sup> ,536	. . . . .	11 <sup>g</sup> ,546	} aux 100 kilog.
Argent. . . . .	41 <sup>g</sup> ,015	. . . . .	19 <sup>g</sup> ,654	

2° Le minerai d'amalgame rendant de 150 à 186 grammes de métaux précieux par *cord*, mesure locale valant environ 6<sup>f</sup>,5; soit, par tonne, de 25 à 28 grammes.

Depuis 1859, on évalue à 30 ou 35 millions de francs la valeur en métaux précieux qu'on a extraite de ce filon; ce qui est considérable, si l'on tient compte du faible développement des travaux et de la façon un peu extravagante dont ils ont souvent été conduits.

2° *Filon Bates*. — Je signalerai pour mémoire le filon Bates, situé à une petite distance à l'ouest du Gregory-Briggs, et orienté N. 55° E., c'est-à-dire parallèlement au filon Briggs. Il affleure sur la colline Gregory, franchit Gregory Gulch, et remonte la colline Bates qu'il traverse jusqu'à Chase Gulch. Les travaux y sont depuis longtemps suspendus.

3° *Filon Bobtail*. — Ce filon a été le plus productif du district après le Gregory-Briggs. Il court sur le versant nord de la colline Bobtail, à plusieurs centaines de pieds au-dessus du Gregory Gulch. Sa direction est E.-O. sur une longueur de 245 mètres à partir du petit ravin qui sépare les collines Bobtail et Gregory. Ses épontes sont généralement bien définies; sa puissance varie de quelques centimètres à 5<sup>m</sup>,50 et 4 mètres et les parties les plus puissantes ont été les plus pauvres; dans les parties riches, la puissance ne dépasse pas 0<sup>m</sup>,25 ou 0<sup>m</sup>,30. Le filon est presque vertical, plongeant tantôt au nord tantôt au sud. La gangue est cette même matière quartzreuse et feldspatique qui remplit la fente du Gregory Briggs; mais dans la portion est du filon on trouve du quartz blanc analogue au quartz de Californie.

Six compagnies travaillent les 245 mètres reconnus du filon; ce sont, de l'est à l'ouest :

Bobtail, possédant sur la longueur du filon	151 <sup>m</sup> ,63
Sterling,	— — 20 ,06
Black Hawk,	— — 21 ,89
Field,	— — 10 ,04
Trust,	— — 20 ,07
Sensenderfer,	— — 58 ,91

Ces différentes compagnies ont exploité leurs propriétés isolément; or le filon est mince, la richesse inconstante, le roc dur, l'eau abondante, toutes conditions demandant un système de travaux réguliers et bien entendus pour rendre l'exploitation fructueuse. On s'est borné à abattre le minerai en vue; depuis 1869, l'exploitation a été presque nulle, l'eau ayant envahi les travaux. Les profondeurs atteintes varient entre 120 et 150 mètres. En 1871 on proposa d'ouvrir une galerie d'écoulement; le profit devant être partagé par toutes les mines, on espérait que les compagnies s'entendraient pour partager les dépenses; il n'en fut rien. Une nouvelle société, composée en réalité des actionnaires d'une des compagnies de mines, se forma avec un capital distinct pour entreprendre ce travail, commença le tunnel en 1871 et le termina en 1875. L'ouvrage part du ravin Gregory Gulch et mesure 352 mètres de l'orifice jusqu'au point d'intersection avec le filon Bobtail; la section est un carré de 2<sup>m</sup>,128; la pente est de 0<sup>m</sup>,005 par mètre. La solidité de la roche a permis d'éviter le boitage; l'avancement a varié entre 11<sup>m</sup>,856 et 25<sup>m</sup>,712 par mois; la dépense totale a été de 206.000 francs, soit 585 francs par mètre courant.

Le tunnel s'engage en ligne droite sous la montagne dans une direction à peu près N.-S.; à 178<sup>m</sup>,75 de l'orifice il coupe le filon Fisk; à une courte distance du filon Bobtail, il se divise en deux branches; celle de gauche court sur le S.-E. et rencontre le Bobtail à 13<sup>m</sup>,68 de la bifurcation :

le point d'intersection est sur la limite ouest de la mine Senseuderfer. La branche de droite court dans la direction de l'ouest pendant environ 97 mètres, traverse les mines Field, Black Hawk, Sterling, et aboutit à la limite est de la mine Bobtail. A l'extrémité de la branche du S.-E. une vaste chambre a reçu des appareils d'extraction et d'épuisement pour les travaux qu'on va pousser en profondeur; un puits a été foncé à quelques mètres à l'est et atteint au moment actuel une profondeur de 18<sup>m</sup>,24. Il sert simplement à l'épuisement des eaux, qui proviennent d'une source jaillissant de l'ouest par une fissure en communication, paraît-il, avec la mine Narragansett (sur le filon Gregory) et donnant de 1.155 à 1.362 litres par minute.

On ne pouvait songer à employer pour l'épuisement une pompe de Cornwall, qui aurait exigé des excavations immenses pour son installation. Les appareils devaient occuper peu de place, être faciles à manœuvrer pour la descente, et de grande puissance : la fig. 6, Pl. V, représente les dispositions adoptées : la pompe B est à piston plongeur; elle est contenue dans une cuve circulaire, faite en plaques de chaudières et munie d'une garniture à étoupe; son piston est relié au cylindre à vapeur *d*, qui est mobile, tandis que le piston à vapeur est fixe et repose, par les tuyaux d'échappement et d'arrivée de la vapeur, sur un cadre en fonte G. Les tuyaux d'écoulement de l'eau *ff* servent de guide au cylindre à vapeur. Le cadre G et la table G', qui supporte la pompe, sont reliés à *ff* et le tout est suspendu dans le puits par de forts câbles ronds F en fils de fer. L'ensemble pèse 1.362 kilog, et coûte 7.725 francs. La pompe peut épuiser 20.430 litres au maximum par minute.

J'ai donné quelques détails sur cette galerie d'écoulement parce que, fait assez curieux, c'est la seule qui existe dans un district, où les travaux sont constamment entravés par les eaux, et où le relief du sol se prêterait assez bien à l'utilisation des tunnels.

Quarante hommes environ sont occupés au-dessus du niveau du tunnel, principalement à des travaux d'aménagement.

On estime que la production totale du Bobtail, de 1860 à 1869, a été de 12.875.000 francs; mais ce filon a été exploité par tant de compagnies différentes et d'une façon tellement irrégulière qu'il est difficile d'évaluer sa production d'une manière précise.

Le minerai de fusion, extrait en 1873, tenait à la tonne 205<sup>g</sup>,07 d'or et une quantité égale d'argent.

La galerie d'écoulement sert en même temps de galerie d'extraction aux chantiers du filon *Fisk*. On sait peu de choses sur ce filon, situé un peu au nord du Bobtail; il aurait été travaillé autrefois, paraît-il, avec succès; l'ouverture de la galerie d'écoulement a inauguré une nouvelle période d'activité; mais les travaux sont encore peu développés. Le minerai de première classe extrait de ce filon a les teneurs extrêmes suivantes, aux 100 kilog. :

Or. . . . .	13 <sup>g</sup> ,526. . . . .	20 <sup>g</sup> ,739
Argent. . . . .	49 <sup>g</sup> ,538. . . . .	56 <sup>g</sup> ,885

Les filons précédents, Bobtail, Gregory, Fisk, Bates, ont des directions qui convergent sur la colline Gregory. Dans le pays on les regarde comme des prolongements, ou des ramifications, d'un filon nommé *Mammoth*, situé sur la même colline et courant de l'est à l'ouest; mais rien ne prouve l'exactitude de cette manière de voir. Le *Mammoth* a été tracé, à l'ouest, jusqu'au petit ravin qui sépare les collines Bobtail et Gregory, à l'est duquel commence le filon Bobtail; il est beaucoup plus puissant que les autres filons du district; mais aussi il paraît beaucoup plus pauvre, et rempli seulement de pyrites de fer. Jamais il n'a été exploité activement, et depuis quelques années il est abandonné; en aucun point les travaux n'ont dépassé la profondeur de 100 mètres.

4° *Filons de Quartz Hill*. — Un groupe de filons dont l'exploitation a donné des résultats avantageux, s'étend sur la colline de Quartz Hill, à l'ouest des précédents. La colline se dirige de l'ouest à l'est; à partir du sommet et en descendant le versant nord jusqu'au ravin Nevada Gulch, qui la limite, on trouve les filons :

- 1° Illinois, tout près de la crête;
- 2° Gardner, à environ 100 mètres au nord du précédent, et connu plus à l'ouest sous les noms de *California*, puis *Indiana*;
- 3° Burroughs, à 121 mètres au nord de Gardner et à 30 mètres au-dessus du Nevada Gulch;
- 4° Kansas.

A 1.600 mètres environ à l'ouest de ce groupe, et sur le même versant de Quartz Hill, se trouvent les filons :

- 5° Flack, dont l'extrémité occidentale est appelée *Mercer County*;
- 6° Forks;
- 7° American Flag, tout près du thalweg du ruisseau Nevada.

Ces filons de Quartz Hill se distinguent des filons orientaux par une proportion plus grande d'argent dans leurs minerais aurifères et par l'occurrence fréquente de la galène et de la blende. Tous plongent au sud et courent sur l'heure 5-6, excepté le filon Forks, orienté heure 3. Depuis 1869, les travaux sont languissants, toujours pour les raisons déjà énumérées : division du filon en propriétés parcellaires dont quelques-unes n'ont pas plus de 6<sup>m</sup>,08; exploitation individuelle de ces parcelles; mauvais aménagement intérieur; abondance d'eau. Les travaux les plus importants ont porté sur les filons Illinois et Burroughs, et ont atteint une profondeur de 150 à 180 mètres; on se borne aujourd'hui à reprendre les vieux chantiers. Le rapport du minerai de la première classe à celui de la deuxième a toujours été très-faible : il a varié entre  $\frac{1}{30}$  et  $\frac{1}{133}$ .

Le filon Kansas est un de ceux sur lesquels on continue les travaux en profondeur; le puits n'a pas plus de 90 à 95 mètres de profondeur, et les galeries de niveau n'ont pas été poussées à plus de 40 mètres dans le gîte. L'affleurement de ce filon a une puissance de 1<sup>m</sup>,50; à la profondeur de 50 à 60 mètres, il se divise en deux branches et s'amincit. Jusqu'à ce point on n'avait trouvé que du minerai en mouches disséminées dans la gangue; au delà on a suivi une veinule de minerai massif de plusieurs centimètres d'épaisseur dans la branche méridionale dirigée N. 85° E; la veinule riche est tantôt près du mur, tantôt près du toit. La branche sud plonge au S.-E. sous un angle de 80° environ; de son mur partent des ramifications qui meurent promptement à quelques centimètres dans la roche, ou rejoignent la branche septentrionale. Celle-ci plonge au N.-O. sous un angle élevé; au niveau de 94 mètres, un travers bancs l'a recoupée à 15 mètres de la branche sud; elle est constamment plus pauvre que cette dernière.

Le minerai de première classe de ce filon tient de 9<sup>g</sup>,517 à 13<sup>g</sup>,702 d'or et de 29<sup>g</sup>,450 à 32<sup>g</sup>,798 d'argent aux 100 kilogrammes.

Sur la colline Gunnell, séparée de Quartz Hill par le Nevada Gulch, plusieurs filons, travaillés autrefois, ne donnent lieu qu'à une exploitation languissante. Le filon Gunnell a été le plus productif; les travaux avaient atteint une profondeur de 150 mètres.

Enfin sur la colline Casto se trouve le filon Winnebago, travaillé actuellement, mais sans intérêt spécial.

*Tunnel de la Sierra Madre*. — On parlait en 1873 d'un grand travail d'art qui allait être entrepris pour frayer au chemin de fer du Colorado Central un passage sous la grande chaîne des Rocheuses; ce tunnel gigantesque pouvant avoir une grande influence sur la reprise des travaux de mines, il n'est pas sans intérêt d'en dire quelques mots. L'orifice doit être situé à 3.218 mètres à l'est de Black

Hawk, sur la branche nord du torrent de Clear Creek. L'altitude de cet orifice serait de 2.128 mètres au-dessus du niveau de la mer, soit 547 mètres au-dessus du niveau des plaines et 565 mètres au-dessous de Central City. Sa direction sera O. 30° N; il coupera donc les filons Fisk, Gregory, Briggs, Bates, etc., sous des angles de 70 à 75°. Les filons Bobtail, Mammoth, Winnebago seront coupés sous des angles très-aigus. La distance de l'orifice du tunnel au filon Bobtail sera de 3.344 mètres; de ce point au filon Gregory, on mesure 245 mètres. Le Bobtail sera rencontré à 955 mètres au-dessous de la surface; les filons Gunnell et Winnebago le seront à 4.864 mètres de l'orifice du tunnel et à 608 mètres au-dessous de leurs affleurements.

#### EXPLOITATION ET PRODUCTION.

Il y a peu de choses à dire sur la méthode d'exploitation et les détails qui s'y rapportent; le fait saillant est l'absence complète de galeries d'écoulement, le tunnel Bobtail excepté. Les gîtes sont attaqués et le minerai extrait par des puits foncés suivant leur inclinaison, et par conséquent presque verticaux; on exploite tantôt par gradins renversés, tantôt par gradins droits. Les mineurs du Cornwall sont en grand nombre à Central City; par suite, on retrouve dans les petits faits de l'exploitation qui dépendent des ouvriers, une forte ressemblance avec l'aménagement des mines de leur pays natal. L'éclairage se fait à la bougie. L'extraction est pratiquée dans les petites bennes connues sous le nom de *buckets*, qui contiennent de 275 à 360 kilogrammes; quelquefois on emploie les *ships*, qui servent alors à extraire le minerai et l'eau. Ces appareils sont identiques à ceux du Cornwall. Dans le tunnel Bobtail on emploie, pour l'extraction, de grands wagons en tôle de 3<sup>m</sup>,50 de long, d'une capacité de 1<sup>t</sup>,8 environ, trainés par des mulets. Ces wagons sont rectangulaires, et montés sur quatre paires de roues accouplées

deux à deux comme les roues des grands wagons des chemins de fer américains, de façon qu'ils puissent aisément tourner dans des courbes rapides. La décharge se fait par le fond; au milieu du wagon, à sa partie supérieure, et perpendiculairement à sa longueur, est fixée une tige de fer; le wagon, au moment de la décharge, se sépare en deux portions qui tournent autour de cette tige.

Les modèles de pompes employées à l'épuisement sont innombrables. Le plus souvent l'épuisement et l'extraction sont desservis par une seule machine à vapeur; quelquefois même, quand l'usine d'amalgamation est placée sur le carreau de la mine, la même machine met en mouvement les bocards, la pompe et les tambours d'extraction.

L'usage des câbles en fils de fer ou d'acier n'est pas répandu, ce qui s'explique par la faible profondeur des travaux, le prix élevé de ces câbles, et le peu d'activité de l'exploitation. L'appareil d'extraction est disposé de la façon suivante (*fig. 7 et 8, Pl. V*). Le câble sortant du puits passe sur une poulie de soutien *b*, puis s'enroule sur le tambour A de 1<sup>m</sup>,20 de diamètre, mobile autour d'un axe horizontal en fer. Ce tambour porte deux pièces pour sa manœuvre: l'une est une poulie *d*, concentrique au tambour, d'un diamètre plus large, mise en mouvement par une courroie de transmission *g*, qu'applique contre elle le levier *j*; l'autre est aussi une poulie *c*, permettant, par un levier *i* et un frein, de contrôler le mouvement du tambour en sens inverse. K et *m* sont des poulies de renvoi qui mettent la courroie *g* en mouvement; *m* reçoit son mouvement de la machine à vapeur.

*Frais d'exploitation.* — Les prix des travaux à la tâche sont :

1° Galeries de niveau : 51<sup>t</sup>,156 à 91<sup>t</sup>,917 par pied, soit de 168<sup>t</sup>,27 à 302<sup>t</sup>,55 par mètre, boisage compris.

2° Puits, section de 2<sup>m</sup>,128 sur 4<sup>m</sup>,256 : 792<sup>t</sup>,71 par mètre, boisage compris.

3° Abatage : 56<sup>f</sup>,50 à 64<sup>f</sup>,37 par mètre courant, selon la puissance du filon; exceptionnellement, la roche étant très-dure, le prix est monté à 110 et 113 fr. par mètre courant.

Le prix de revient par tonne, y compris les frais généraux, varie de 34<sup>f</sup>,97 à 85<sup>f</sup>,17; la moyenne est d'environ 55<sup>f</sup>,945.

L'habitude d'évaluer la production des mines en *cords*, mesure locale mal définie, rend difficile la fixation exacte des frais par tonne. En outre, les exploitants tiennent rarement des comptes détaillés de leurs opérations et se bornent chaque année à évaluer la dépense et la recette brutes.

La production totale du comté de Gilpin a été estimée, en 1872, à 7.154.858<sup>f</sup>,35. En 1875 cette production s'est élevée, pendant les sept premiers mois de l'année, à 4.464.985<sup>f</sup>,64, qui se décomposent ainsi :

Or et argent (produits d'amalgamation). . .	2.529.932 <sup>f</sup> ,55
Mattes cuivreuses, avec or et argent. . . .	1.555.381,64
Minerais expédiés et divers. . . . .	381.671,65
Total. . . . .	4.464.985 <sup>f</sup> ,64

On a prétendu que les filons du comté de Gilpin s'appauvrissaient constamment en profondeur; cette assertion semble démentie par un pareil chiffre de production, très-élevé et très-remarquable si l'on tient compte des difficultés contre lesquelles les exploitants ont à lutter et qui proviennent principalement d'une législation minière défectueuse. Le pire des maux est que les compagnies n'obtiennent que des bénéfices pécuniaires bien inférieurs à ceux que laisseraient présumer les valeurs en or et argent qu'elles produisent. On peut affirmer que la réunion des différentes compagnies, qui exploitent un même filon, amènerait une ère de prospérité durable dans le comté de Gilpin.

#### § 2. — Filons argentifères du comté de Clear Creek.

*Historique.* — La découverte des filons d'argent groupés autour de la petite ville de Georgetown date de 1859. Elle

fut faite par des mineurs de Central City qui, à la suite de la reconnaissance du filon Gregory, dans le comté de Gilpin, se mirent à explorer le pays. En apprenant l'existence de nouveaux filons, les chercheurs d'or fouillèrent le district en tout sens, établirent des moulins d'amalgamation pour or, et pendant trois ans ne purent obtenir aucun résultat; tous alors déclarèrent les filons sans valeur et émigrèrent: Georgetown fut abandonné. En 1866, c'est-à-dire sept ans seulement après la découverte, on parut s'apercevoir que le minerai, quoique non aurifère, pouvait avoir une valeur au point de vue de l'argent, et on commença à les travailler pour en tirer ce dernier métal. Actuellement vingt ou vingt-cinq mines sont exploitées produisant environ de 18 à 20 tonnes par jour, de la valeur moyenne de 1.100 à 1.150 fr. par tonne; soit de 11 à 12.000 fr. par jour.

Georgetown compte 1.500 à 2.000 habitants, vivant exclusivement du produit des mines; elle est à une altitude de 2.569 mètres au dessus du niveau de la mer, au fond d'une vallée étroite de 150 à 300 mètres de largeur, et dominée par des montagnes abruptes de 1.400 à 1.500 mètres de hauteur. De ces sommets on aperçoit au sud la cime neigeuse de Gray's Peak qui s'élève à 4.322 mètres au-dessus du niveau de la mer. Ces altitudes formidables indiquent les difficultés à vaincre dans la construction de la voie ferrée qui reliera Georgetown aux prairies, et les frais élevés des transports pour les mines.

Le pays est très-pittoresque, mais il ne produit rien en dehors des minerais d'argent; tous les objets de première nécessité sont tirés de Denver. De magnifiques forêts couvraient autrefois les versants de cette vallée du torrent South Clear Creek; elles tendent à disparaître aussi complètement que dans le comté de Gilpin. Les travaux de mine sont cause en partie de cette dévastation, et de fréquents incendies y ont contribué; mais l'insouciance du bûcheron,

qui coupe deux arbres quand un seul lui suffirait, est le pire des fléaux. Cette destruction irréfléchie est telle qu'en plein pays forestier le prix du bois a doublé en moins de huit ans.

*Roches.* — Les filons peuvent être répartis en deux groupes correspondant respectivement au mont Sherman ou Republican et au mont Leavenworth. Cette dernière montagne se sépare du Front Range auprès de Gray's Peak, et se dirige à l'est pendant environ 13 kilomètres, puis, faisant un détour presque à angle droit vers le nord, prend cette direction sur 1.400 ou 1.500 mètres jusque dans la vallée de Georgetown où elle s'arrête; c'est sur ce dernier coude que sont répartis les filons. La montagne Sherman est parallèle au Leavenworth et située sur sa gauche, en remontant du sud au nord.

Comme dans le comté de Gilpin, on trouve autour de Georgetown des granits, des gneiss et des schistes anciens. Dans le gneiss le mica est ordinairement noir, bien orienté et de petite dimension; le quartz et le feldspath ont au contraire une allure très-irrégulière. Tantôt ils disparaissent presque complètement, tantôt ils forment dans la masse des chapelets dont les grains atteignent jusqu'à la grosseur d'une noix; on dirait de petits filons dans du mica. Les teintes de ces minéraux sont variables; le blanc et le rose prédominent. Sur la montagne Sherman, ces gneiss forment des strates de direction N.-O. plongeant au N.-E. Ils reposent sur des granits de toutes variétés, depuis le granit noir à grain fin passant au quartzite avec disparition graduelle du mica, jusqu'au granit rose à cristaux énormes de quartz, feldspath et mica. Le contact des gneiss et des granits est difficile à relever, l'intrusion du granit entre les feuilletés de gneiss amenant de grandes confusions. Le granit en gros cristaux se trouve souvent en veines dans le gneiss. Les filons métallifères se trouvent dans les deux roches; ils coupent, en direction, les strates de la dernière.

Il est surprenant de ne trouver aucune mention de l'amphibole dans les travaux publiés par les géologues américains sur le comté de Clear Creek. En remontant le ravin qui forme au sud le pied du mont Leavenworth, on rencontre à environ 1.500 mètres de Georgetown, sur la gauche, des masses schisteuses d'un blanc verdâtre renfermant de gros cristaux de quartz et amphibole. Ces roches sont orientées N. 65° à 70° E., et plongent de 54° vers le S.-E. Sur la montagne Sherman, près du filon Coldstream, affleure une masse considérable d'amphibole noire, encaissée dans des granits à gros cristaux; elle est coupée elle-même par un étroit filon métallique.

*FILONS DU MONT LEAVENWORTH.* — On prétend avoir trouvé 150 filons sur les 1.500 mètres de cette montagne dirigés vers le nord. Il est probable qu'il faut entendre par là que des filons, en nombre difficile à préciser, ont été coupés et plus ou moins exploités sur 150 points différents. Chaque mine a la prétention d'être ouverte sur un filon distinct et les travaux ne sont pas encore assez développés pour qu'on puisse constater l'identité d'un même filon dans différentes mines.

Deux directions paraissent prédominantes: le N. 50 à 55° E. et l'E.-O. Les filons Equateur, Simpson, Gilpin courent sur la première; les filons Ocean Walve, Alabama, O. K., Welsh sur la seconde. Le filon Colorado Central fait exception; sa direction est N. 42 à 45° E. A l'affleurement les filons plongent au nord, puis à une faible profondeur se redressent presque verticalement. Près de la surface le toit seul est bien défini; en profondeur, c'est au contraire le mur qui est le plus distinct et c'est lui que suivent les matières minérales,

Les filons N. 50 à 55° E. sont les plus anciens; ils constituent des veines assez larges sur lesquelles l'eau et l'air ont agi à une profondeur notable, en décomposant la gangue et

oxydant les minerais. Les filons E.-O. sont moins puissants, moins altérés, et ont produit jusqu'à ce jour des minerais rendant à l'amalgamation une quantité d'argent plus considérable que celle produite par les minerais des filons N. 55° E.; ce fait tient probablement à ce qu'ils renferment moins de galène et de blende. Quelques-uns de ces filons E.-O. paraissent être simplement des branches des filons N. 55° E.; d'autres en sont clairement indépendants, et les coupent d'une façon nette, mais sans les rejeter.

Les produits actuels de ces mines peuvent être considérés comme des minerais de plomb et de zinc argentifères, auxquels sont mêlés des minerais d'argent proprement dits, sulfure, arsénure et antimoniure. On trouve aussi des pyrites de cuivre et de fer, du carbonate de cuivre, etc. Il est probable, d'après l'expérience acquise dans les mines de la montagne Sherman, qu'en profondeur la proportion des minerais d'argent diminuera graduellement, tandis que celles de la galène et de la blende argentifères augmenteront; on a déjà constaté sur le Colorado Central l'envahissement du filon par ce dernier minéral.

Le minerai se présente tantôt en poches, tantôt en mouches disséminées dans la gangue, tantôt enfin en filets massifs, minces, atteignant un maximum de 0<sup>m</sup>,30 de puissance sur le Colorado Central. La gangue est une matière quartzreuse et feldspathique, comme dans le comté de Gilpin, souvent onctueuse au toucher; les veines ont des salbandes argileuses; quelques filets d'argile en certains points traversent la masse.

Par suite de la présence des minerais d'argent proprement dits, les matières extraites sont fort riches. Ainsi, dans le premier trimestre de 1873, la mine Colorado Central a produit les lots suivants :

Poids du lot.	Teneur aux 100 kilog.
1.801 kilog.	3.414 gr.
1.521 —	4.952 —

La teneur la plus faible était celle d'un lot de 1.571 kilogrammes, tenant 1.559 grammes aux 100 kilogrammes. Ces minerais sont ceux de première classe; ceux de seconde ont une teneur de 850 grammes aux 100 kilogrammes et ceux de la troisième, 308<sup>e</sup>,7. Tout minerai de teneur inférieure à 300 grammes est laissé de côté.

La puissance des filons varie de quelques centimètres à 2 mètres; cette dernière dimension est rarement atteinte. Des travaux de recherches ont montré qu'à une profondeur de 100 mètres le Colorado Central dépassait 6 mètres; mais cette puissance est loin de représenter celle de la masse minérale contenue dans la veine, qui précisément est assez pauvre en ce point.

Parmi les nombreuses galeries de recherches qui percent la montagne, la plus importante est le tunnel Marshall. Son orifice est à 15<sup>m</sup>,20 au-dessus du torrent Leavenworth et à 100 mètres au-dessous de l'affleurement du Colorado Central. Il est dirigé sur le N. 43° O. Ses dimensions sont 2<sup>m</sup>,128 × 2<sup>m</sup>,756. D'après le projet, sa longueur totale sera de 1.162 mètres, et il traversera la montagne Leavenworth en entier; on a déjà terminé 395 mètres; on emploie une machine à air comprimé pour percer les trous de mine. Jusqu'à ce jour le tunnel a coûté de 35 à 40 dollars par pied, soit de 528<sup>e</sup>,28 à 603<sup>e</sup>,70 par mètre courant.

S'il est permis de douter qu'un pareil travail soit nécessaire pour l'exploitation actuelle des mines, il donnera incontestablement des renseignements précieux sur l'allure des gîtes et la conformation de la montagne Leavenworth. Dans son parcours, il a rencontré les veines métalliques suivantes :

Filon W. B. Astor; exploité à la surface.	
— Bull dog, coupé à 45 <sup>m</sup> ,60 de l'orifice du tunnel; exploité.	
— n° 1.	} Trop faibles et trop pauvres pour être exploités.
— n° 2.	
— n° 3.	

- Filon n° 4. } Puissance de 2<sup>m</sup>,432; stérile au point de découverte; une galerie de quelques mètres poussée vers l'est a montré un rétrécissement considérable et une stérilité complète.
- Équateur, coupé à 191 mètres de l'orifice du tunnel; exploité.
  - Square and Compass, coupé à 321<sup>m</sup>,61 de l'orifice du tunnel; exploité.
  - Colorado Central; exploité.
  - n° 5. } Très-faible, contenant des veinules de galène et blende.
  - n° 6. } Très-faibles et pauvres.
  - n° 7. }
  - n° 8. Faible; filets de galène.
  - n° 9. Ce filon paraît être dirigé N.-S.

On pensait, en juillet 1873, ne pas être loin du filon O. K. et trouver ces deux filons O. K. et n° 9 se réunissant près du tunnel. Sur les filons Colorado Central et Équateur, on ouvre des cheminées qui, partant du niveau du tunnel, iront rejoindre les travaux supérieurs; ces travaux, jusqu'à présent, n'ont montré que des portions stériles des filons.

Depuis leur découverte, ces mines ont produit environ 15 millions de francs. Les travaux ont été si irréguliers jusqu'à ce jour que les exploitants actuels sont forcés, bon gré mal gré, de restreindre leur production pour s'occuper de l'aménagement. La production journalière actuelle ne dépasse pas une valeur de 7.000 francs, le nombre des mineurs étant environ deux cent cinquante. La somme des travaux exécutés dans toutes les mines est estimée à 2.128 mètres de puits, 3.040 mètres de galeries de niveau et 2.432 mètres de travers bancs.

FILONS DU MONT SHERMAN OU REPUBLICAN. — De même que sur le Leavenworth, on prétend avoir trouvé sur le mont Sherman une quantité considérable de filons. Une partie seulement sont travaillés et les travaux sérieux ne portent que sur un nombre encore plus restreint. Plusieurs

filons sont orientés E.-O.; d'autres N. 50 à 55° E.; quelques autres enfin courent sur le N. 60 à 68° E.

Jusqu'à ce jour la puissance des filons n'a pas dépassé 1 mètre ou 1<sup>m</sup>,60; elle tombe à quelques millimètres; une puissance de 0<sup>m</sup>,30 à 0<sup>m</sup>,40 est communément rencontrée. — Le plongement est presque vertical, tantôt au nord, tantôt au sud. Une des épontes, sinon les deux, est ordinairement bien définie et facile à suivre. Les minerais sont des galènes et des blendes riches en argent, mélangées à des minerais d'argent proprement dits, mais en petite quantité.

Les filons Terrible, Coldstream, Pelican, Silver Plume sont les plus riches. Les deux premiers sont les plus développés; ils sont travaillés avec intelligence, et semblent avoir le plus d'avenir; voici à leur sujet quelques détails.

1° *Filon Terrible.* — Le gîte se compose d'une série de petites veines tantôt courant parallèlement, tantôt convergeant les unes vers les autres et se réunissant. Une galerie à travers bancs a permis de compter jusqu'à sept de ces filets métalliques ayant chacun une puissance de 0<sup>m</sup>,025 à 0<sup>m</sup>,05. En un des points du gîte où leur nombre est réduit à trois, le plus épais a 0<sup>m</sup>,574; c'est le maximum de puissance qu'on ait rencontré jusqu'à ce jour. Les épontes, là où elles existent, sont très-mal définies; le plus souvent il n'y en a pas du tout et le remplissage, sur une longueur très-restreinte, passe graduellement à la roche encaissante qui est le granit. Lorsque les épontes existent, il y a apparence d'une salbande argileuse très-mince. L'ensemble des veines a une direction et une inclinaison nettes; il court sur le N. 61° 31' E.; d'abord vertical, il plonge sous un angle de 78° jusqu'à la profondeur de 30 mètres, puis sous un angle de 72°.

Les filets métalliques ne se trouvent que très-rarement au centre du gîte; ils sont groupés irrégulièrement de part et d'autre de son axe longitudinal, près de l'endroit où de-

vraient se trouver les épontes. Ils ne sont continus que sur une faible distance. Un filet commencera en pointe aiguë et se terminera même après s'être renflé et aminci successivement. A sa suite, un peu latéralement, ou du côté opposé par rapport à l'axe longitudinal, commencera une autre lentille de même allure.

Les minerais se composent principalement de galène, blende, pyrite de fer et cuivre pyriteux, tous minéraux argentifères, auxquels sont mêlés par occasion des minerais d'argent proprement dits. L'or existe, mais en petite quantité; après concentration, on en a trouvé jusqu'à 23 grammes aux 100 kilog. dans les pyrites. Dans chacun des filets métalliques, on rencontre tous ces minerais mélangés sans ordre apparent, se succédant quelquefois dans la direction longitudinale, mais ne présentant pas de rubanement. Les différents filets sont séparés par des masses de gangue. Lorsque les filets ne sont pas massifs, le quartz forme la gangue unique et se trouve toujours sur les bords. Comme matière accessoire, il faut signaler le carbonate de chaux cristallisé sous forme de *dents de cochon*. La teneur en argent de la galène surpasse toujours celle de la blende de 150 à 200 grammes par tonne.

Voici différentes sections transversales du gîte :

Section au troisième niveau, d'après M. Schirmer (*fig. 9*, Pl. V). En partant du toit, on trouve en *a* une masse de gangue, puis une veinule, *c*, avec noyaux de galène à gros cristaux, renfermée entre deux bandes, *b*, contenant des pyrites, un peu de blende et de fahlerz; *c* a une puissance de 0<sup>m</sup>,05; *b*, de 0<sup>m</sup>,05 à 0<sup>m</sup>,1. Une seconde veinule, plus puissante (0<sup>m</sup>,15 à 0<sup>m</sup>,20), contient des pyrites, de la galène, de la blende et des minerais d'argent proprement dits. En *a*, se retrouve de la gangue stérile. Cette première portion du gîte est séparée de la suivante par une veine argileuse, *s*, très-mince. Elle s'appuie sur une masse de gangue contenant des fragments de quartz, de 0<sup>m</sup>,60

d'épaisseur, *e*; une seconde argile *s* borde cette masse *e*. Entre elle et le granit du mur, on trouve entre deux bandes de gangue une veinule analogue à *b* et riche en minerai d'argent et d'une puissance de 0<sup>m</sup>,025. Les portions minérales ont donc une puissance totale de 0<sup>m</sup>,275 à 0<sup>m</sup>,375.

Au quatrième niveau, le minerai est renfermé dans deux veinules principales (*fig. 11*, Pl. V) : la première, *a*, nettement délimitée, la deuxième, *b*, lançant des ramifications dans la gangue *c*. Elles sont concentrées près du mur proprement dit; *d* est un mince filet minéral contenant principalement de la blende.

Au cinquième niveau (*fig. 10*, Pl. V), en allant du toit au mur, on trouve, entre les roches encaissantes *aa*, un filet de 0<sup>m</sup>,039 de minerai mélangé; une première bande de gangue légèrement minéralisée *c*, de 0<sup>m</sup>,50 de puissance; un deuxième filet de minerai massif, ayant une puissance de 0<sup>m</sup>,15, puis 0<sup>m</sup>,50 de gangue *e* et 0<sup>m</sup>,075 de minerai. Enfin en *f*, est un dernier filet minéral de 0<sup>m</sup>,14 de puissance entre deux masses de gangue; les portions minérales occupent 0<sup>m</sup>,278 sur une épaisseur totale de 1<sup>m</sup>,50 environ comprise entre les deux parois de roche encaissante. Le granit, qui la forme, est de structure variable; tantôt il est à grain fin, et sa couleur est grise; quelquefois il est plus grossier et présente une teinte rose. Ce granit à teinte rose est même parfois composé de cristaux très-volumineux de quartz, mica, et feldspath, accolés les uns aux autres et de la grosseur du poing; quand son grain est de finesse moyenne, il est considéré comme un bon indice de richesse. Parmi ces roches encaissantes, certaines parties seraient exploitables dans un pays où la main-d'œuvre serait moins élevée, tant elles sont imprégnées de minéraux.

Les travaux ont été commencés sur la portion supérieure du gîte qui a été, pour ainsi dire, écrémée sans aucune méthode. Depuis peu de temps, la mine a passé entre les mains d'une compagnie anglaise, et le nouveau directeur,

M. Teal, a introduit un système d'exploitation méthodique; il en est résulté d'abord des bénéfices financiers, puis un ordre dans les différentes branches de l'exploitation, qu'il est rare de rencontrer dans les mines d'Amérique.

Les travaux supérieurs comprennent deux puits : l'un foncé sur la limite est de la propriété et poussé jusqu'à la profondeur de 80 mètres : c'était un puits de recherche; l'autre, foncé plus à l'ouest, atteint la même profondeur; il servait à l'extraction, et n'est plus utilisé aujourd'hui que pour l'aérage, comme le précédent. Ce puits a desservi trois galeries de niveau : la première est à une profondeur de 37<sup>m</sup>,48 au-dessous de la surface et a été poussée à 27<sup>m</sup>,36 vers l'ouest; la deuxième, à 58 mètres de profondeur, poussée vers l'ouest, à 33<sup>m</sup>,40; la troisième, à 70<sup>m</sup>,82, conduite du même côté à 80<sup>m</sup>,43. A l'est ces trois galeries vont jusqu'au premier puits de recherche, c'est-à-dire qu'elles ont un développement de 37<sup>m</sup>,10.

On a constaté un appauvrissement constant entre ces deux puits de l'ouest à l'est. A la profondeur de 80 mètres, on a arrêté l'extraction par le puits précédent et mené un travers banc qui, partant du jour, vient couper le gîte à peu près au-dessous du deuxième puits, un peu plus à l'ouest. Cette galerie, qui sert aujourd'hui à l'extraction du minerai et à l'épuisement des eaux, a 101<sup>m</sup>,31 de long; elle est ouverte sur 2<sup>m</sup>,287 de hauteur et 1<sup>m</sup>,976 de largeur. Elle a été creusée au moyen d'un appareil à air comprimé, le *Burleigh drill*, travaillant sous une pression de 15 à 18 kilog. et donnant 300 coups par minute. Le trou percé par le drill avançait de 0<sup>m</sup>,025 par minute, et la galerie de 0<sup>m</sup>,39 en moyenne par vingt-quatre heures. Le mètre courant est revenu à 606<sup>f</sup>,48; ce prix de revient n'aurait pas dépassé 529<sup>f</sup>,39 si l'on avait travaillé à bras d'homme, mais l'emploi de la machine a fait gagner un temps considérable.

Le quatrième niveau a tracé le gîte vers l'ouest sur une

longueur de 116<sup>m</sup>,73, et à l'est jusqu'au puits de recherche; de ce côté on a rencontré le même appauvrissement que dans les niveaux supérieurs; à environ 15 mètres du puits de recherche, on a reconnu une petite veine de direction N. 25° E., plongeant au N. sous un angle de 40° seulement, paraissant riche en galène. A l'ouest on a suivi le gîte sur une longueur de 79 mètres; un changement marqué d'orientation s'est produit, la veine exploitée courait sur la nouvelle direction N. 85° E. Un appauvrissement progressif puis une stérilité complète s'étant manifestés, l'avancement a été abandonné au bout de 30 mètres et l'on a repris alors la galerie au point où la déviation s'était produite; en la poussant dans la direction N. 60° E., on a retrouvé la veine riche principale. La galerie a été arrêtée à une distance de 116 mètres du tunnel en attendant la préparation des niveaux inférieurs.

En même temps qu'on poussait cette quatrième galerie de niveau, on fonçait à 5 ou 6 mètres à l'ouest de l'ancien puits d'extraction, et suivant l'inclinaison du gîte, un nouveau puits qui a atteint une profondeur de 37 mètres au-dessous du tunnel. A 18 mètres au-dessous de la galerie n° 4, un cinquième niveau a été ouvert, et un sixième amorcé à la profondeur de 37 mètres. — Les travaux ont ainsi atteint une profondeur totale de 120 mètres environ.

Le puits incliné a 4<sup>m</sup>,256 sur 3<sup>m</sup>,544; il est divisé en deux compartiments, dont l'un sert à l'épuisement des eaux et à la circulation des ouvriers, l'autre à l'extraction : ce dernier a 2<sup>m</sup>,13 sur 1<sup>m</sup>,52. Le puits est boisé par des cadres distants de 1<sup>m</sup>,50 à 2 mètres; trois poteaux ronds, de 0<sup>m</sup>,40 de diamètre, sont disposés perpendiculairement à l'inclinaison du puits et encastrés dans la roche. Ils sont reliés par des planches; entre ces planches et la roche est introduite une matière de remplissage. Sur ces trois poteaux transversaux en est établi un quatrième longitudinal. Dans la portion réservée à l'extraction, une

série de planches protège ces cadres contre le frottement de la benne; dans l'autre compartiment, des planchers sont établis de distance en distance pour soutenir les tuyaux de vapeur et de conduite d'eau de la pompe.

L'extraction se fait au moyen du petit tonneau connu dans le Cornwall sous le nom de *Kibble*. Les recettes intérieures sont disposées de la façon suivante (fig. 12, Pl. V). Une cloison A est installée dans le puits; la benne, accrochée par l'ouvrier à son passage, glisse contre elle et arrive en A, sole de la recette taillée dans le roc de façon qu'un homme puisse s'y tenir. Les wagons s'arrêtent en C, extrémité de la galerie de niveau; leur contenu est versé sur la plaque en fonte C' et réuni en A, où l'ouvrier charge le kibble à la pelle. — Le kibble, arrivant à l'orifice du puits, un ouvrier accroche l'anneau de fond, et le renverse dans un petit wagon de surface.

Une petite pompe placée au niveau de la cinquième galerie épuise quatre fois par vingt-quatre heures un réservoir de 7<sup>m.c.</sup>,849; c'est donc un épuisement de 30 à 52<sup>m.c.</sup> d'eau par jour.

Le service du puits est fait par une petite machine à vapeur, placée dans une excavation pratiquée au-dessous de l'ancien puits d'extraction.

*Données économiques.* — La compagnie propriétaire n'exploite à son compte que les niveaux nos 4 et 5. Les niveaux supérieurs sont exploités par des ouvriers formant de petites associations, et qui payent à la compagnie une redevance du quart ou du tiers des minerais qu'ils extraient. Ce système, appelé *lease* ou *location*, est très-répandu, aussi bien dans le comté de Gilpin qu'autour de Georgetown; les compagnies de mines y trouvent de grands avantages économiques dans un pays où tout est très-cher; mais il est peu favorable à une exploitation méthodique et régulière.

Les mineurs sont payés comme suit :

Pour le fonçage	} 757',05 par mètre courant (4 <sup>m</sup> ,56 sur 3 <sup>m</sup> ,648).
des puits :	
Pour les galeries	} 241',535 par mètre courant (2 <sup>m</sup> ,128 sur 1 <sup>m</sup> ,824).
de niveau :	
Aux chantiers d'abatage : 90',64 par mètre courant.	

Les mineurs qui sont aux chantiers doivent remplir les wagons et la benne; tous fournissent la poudre, la bougie et les outils. Un ouvrier dépense par mois environ 14<sup>k</sup>,528 de poudre et 5<sup>k</sup>,675 de bougie et peut gagner de 459<sup>f</sup>,79 à 482<sup>f</sup>,81. En général les mineurs s'associent au nombre de quatre : deux travaillent le jour, deux la nuit.

*Préparation mécanique.* — Le minerai est soumis dans la mine même à un premier triage sommaire. En arrivant au jour, il passe à un scheidage qui donne trois classes et du stérile jeté. Ce travail emploie parfois six hommes, mais irrégulièrement, car un homme peut scheider dans sa journée jusqu'à 8 tonnes de minerai. Autrefois on ne faisait que deux classes de minerai; la première, tenant en moyenne 2.282 grammes aux 100 kilog., était expédiée et vendue à Liverpool d'après le système et les prix d'achat anglais; (on paye le plomb, l'argent et l'or; on ne fait pas de déduction pour le zinc quand il n'y a pas plus de 7 p. 100). La deuxième classe, tenant en moyenne 512 grammes aux 100 kilog., était vendue dans le pays. On laissait de côté tout minerai tenant moins de 170 grammes aux 100 kilog.

Au printemps de 1873, on installa un petit atelier de préparation mécanique qui donna les meilleurs résultats au mois de mai, puisqu'une dépense de 900 piastres produisit 6.000 piastres de gain; et encore les cribles sont-ils mus à bras d'hommes. M. Teal a donné, en construisant ce premier atelier, un exemple que les mineurs du pays seraient bien de suivre (\*).

(\*) Depuis j'ai appris que, par les soins de M. Collom, un atelier beaucoup plus considérable avait été installé à Idaho, petit bourg voisin de Georgetown. Il ne fonctionnait pas au moment de ma visite et je ne puis donner sur lui aucun renseignement.

La préparation porte spécialement sur le minerai de troisième classe produit par le scheidage. Ce minerai passe d'abord sur une grille dont les ouvertures ont 0<sup>m</sup>,005 de côté; les matières qui ne traversent pas cette grille sont soumises à un nouveau triage à la main, après un débouillage, rendu facile par la nature de la gangue. Dans ce triage on fait deux classes, l'une jetée, l'autre vendue comme minerai de troisième classe au moment actuel, et qui, plus tard, sera broyée et traitée plus complètement. Les produits fins du débouillage passent dans des appareils appelés *troughs* dont il sera parlé plus loin.

Les matières qui traversent la grille sont envoyées à des cribles à secousse au nombre de cinq : les trois premiers avec toiles métalliques à quatre trous par centimètre carré; les deux autres à onze trous. Toutes les matières passent d'abord aux trois premiers cribles; on y fait trois classes :

- 1° Stérile; jeté.
- 2° Minerai tenant en moyenne 560 gr. aux 100 kilog.; il est vendu dans le pays.
- 3° Minerai tenant en moyenne 1.298 gr. aux 100 kilog.: expédié en Angleterre.

Les fonds de cuve passent aux deux autres cribles; on en retire aussi trois classes :

- 1° Matière pauvre, contenant de 17 à 20 gr. aux 100 kilog.; concentrée de nouveau.
- 2° Blende, tenant 85 p. 100 de blende et 690 ou 700 gr. d'argent aux 100 kilog.; elle est vendue à une usine d'amalgamation, qui ne paye que l'argent contenu dans le minerai.
- 3° Galène à 75 p. 100 de plomb et 750 gr. d'argent aux 100 kilog.; elle est expédiée en Angleterre.

D'une façon générale, on expédie en Angleterre tout minerai contenant plus de 250 grammes aux 100 kilog.

Les fonds de cuve des deux derniers cribles, passent au *tye*, caisson en bois ayant une inclinaison de 0<sup>m</sup>,164 par mètre. On en retire :

1° De la galène qu'on expédie en Angleterre et qui tient :

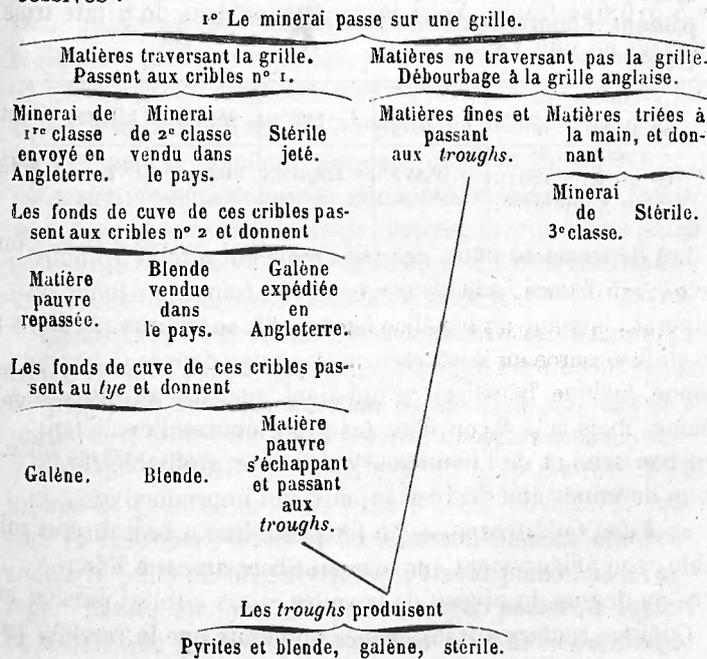
Argent. . . . .	1.095 <sup>s</sup> ,37	} aux 100 kilog.
Or. . . . .	54 <sup>s</sup> ,00	
Et plomb. . . . .	45 p. 100	
Zinc. . . . .	6 p. 100	

2° De la blende presque pure tenant 911 grammes d'argent aux 100 kilog.

Toutes les matières fines qui s'échappent avec l'eau des différents appareils circulent dans des *troughs*, vastes auges en bois, d'où l'on retire un mélange de blende, pyrites et galène dans les proportions suivantes :

Blende et pyrites. . . . .	40
Galène. . . . .	20
Gangue. . . . .	40
	100

Le tableau suivant résume les diverses opérations successives :



Les minerais préparés sont séchés, mis en sac et expédiés. Cette petite laverie emploie 15 hommes et gamins, payés en moyenne 13<sup>f</sup>,75 par journée de huit heures; elle passe de 15 à 20 tonnes par jour. Quand on aura établi des cribles mécaniques et autres légères améliorations en voie d'exécution, on pourra réduire le personnel à 6 ouvriers et les résultats deviendront très-satisfaisants. Le travail sera forcément suspendu d'octobre à mai; les hivers sont si rigoureux que la glace envahit quelquefois jusqu'à 50 pieds du tunnel d'extraction, et qu'il faut avoir des hommes spécialement occupés à l'enlever.

L'exploitation de cette mine Terrible emploie en tout une soixantaine d'hommes, dont 20 ou 25 mineurs.

*Production et prix de revient.* — Depuis la date de sa découverte, en mars 1870, jusqu'en juin 1873, cette mine a produit une quantité de minerai de la valeur approximative de 3.016.612 francs. Voici la production pour le trimestre finissant en juin 1873 :

	1 <sup>re</sup> CLASSE.	2 <sup>e</sup> CLASSE.	3 <sup>e</sup> CLASSE.	RÉSIDUS.	TOTAL.
Poids. . . .	20 <sup>l</sup> ,861	45 <sup>l</sup> ,35	227 <sup>l</sup> ,657	131 <sup>l</sup> ,515	425 <sup>l</sup> ,383
Valeur. . . .	81.604 <sup>f</sup> ,20	29.885 <sup>f</sup> ,45	31.326 <sup>f</sup> ,00	6.665 <sup>f</sup> ,10	152.480 <sup>f</sup> ,75

Les dépenses pendant ces trois mois ont atteint le chiffre de 64.375 francs, soit en moyenne 150 francs par tonne de minerai, laissant un bénéfice brut de 88.000 francs. Je cite ce chiffre, parce qu'il est rare qu'une mine dans le Colorado donne quelque bénéfice, ce qui tient, non pas au gîte lui-même, mais à la façon dont les propriétaires l'exploitent. Du bon sens et de l'honnêteté rendraient profitables beaucoup de mines américaines aujourd'hui improductives.

2<sup>o</sup> *Filon Coldstream.* — Le filon est situé à l'est du Terrible; son affleurement sur le mont Sherman est à 240 mètres au-dessus du niveau de la vallée.

Quoique renfermant les mêmes minéraux que le Terrible,

le Coldstream en diffère sous plusieurs rapports. Le mur manque de netteté; mais le toit est régulier et bien défini. Le minerai ne forme pas, comme dans le Terrible, des filets métalliques; lorsque le filon est riche, une masse métallique compacte, ayant jusqu'à 1<sup>m</sup>,30 d'épaisseur, suit le toit ou la région que devrait occuper le mur; le filon, s'appauvrissant, la masse s'amincit et disparaît presque complètement, ne formant plus au milieu de la gangue qu'une veinule très-mince. La puissance moyenne du filon ne dépasse pas 0<sup>m</sup>,30.

Près de la surface, le gîte, riche en minerai d'argent proprement dit, était très-couché sur l'horizon. En profondeur, quoique les travaux n'aient pas dépassé 140 ou 150 mètres, l'inclinaison se trouve être d'environ 45° seulement; la galène et la blende argentifères deviennent les minerais prédominants, la première étant toujours beaucoup plus riche en argent que la seconde. Dans les niveaux inférieurs, le filon est pourri par places, près du toit, et l'on y trouve de gros cristaux de galène ayant plusieurs centimètres de côté et recouverts d'une mince pellicule de silice amorphe. La gangue est la même que celle du filon Terrible.

La portion supérieure du gîte a été travaillée par les inventeurs sans aucune méthode; depuis, la propriété a passé en d'autres mains et on la développe régulièrement. Les travaux actuels forment l'ensemble suivant :

Une galerie d'extraction, à 110 mètres au-dessous de l'affleurement, part du jour et suit le gîte sur une longueur de 76 mètres dans la direction N. 68° E. A 30 mètres à partir de l'orifice de cette galerie, un puits incliné descend à une profondeur verticale de 30 à 40 mètres. A 15 mètres de profondeur, une galerie a été ouverte et mesure 15 mètres à l'ouest et 30 mètres à l'est où elle rencontre le puits de découverte, qui sert aujourd'hui à l'aériage. Enfin, au fond du puits, on a poussé à l'ouest et à l'est une galerie ayant environ 60 mètres de chaque

côté. On travaille actuellement au premier et au troisième niveau. Dans la portion est de ce dernier, le minerai est très-blendeux et tient de 187<sup>gr</sup>,86 à 256<sup>gr</sup>,37 d'argent aux 100 kilog. Au milieu de la masse zincifère qui varie de 0<sup>m</sup>,10 à 0<sup>m</sup>,40, se trouvent de petites veinules de très-belle galène en cristaux, à 55 p. 100 de plomb et 998<sup>gr</sup>,20 d'argent aux 100 kilog.

C'est dans cette portion est que le filon est pourri. Il s'appauvrit sensiblement en prenant la direction N. 85° E., déjà signalée comme pauvre dans le filon Terrible. Dans la portion ouest de cette même galerie le minerai ne présente plus que 0<sup>m</sup>,10 de puissance. A partir du puits, le filon était considérablement appauvri; il redevient plus riche au bout de la galerie, la blende, ayant une teneur de 427<sup>gr</sup>,8 à 598 grammes aux 100 kilg., est le minerai prédominant.

On voit que ces minerais sont riches; sans parler des minerais de surface sur lesquels les renseignements font défaut, on peut citer comme exemple de richesse une masse minérale abattue au deuxième niveau; l'essai pris sur 12 tonnes a donné: argent 1.035<sup>gr</sup>,63, or 5 grammes aux 100 kil., et 20 p. 100 de plomb.

A l'entrée même du tunnel d'extraction, on a découvert une veine métallique dirigée N. 70 à 75° E; les travaux sont à peine commencés sur cette découverte toute récente; mais, d'après des faits observés au deuxième niveau de la mine précédente, il serait possible qu'on n'eût là qu'une ramification du filon Coldstream.

Le minerai sortant de la mine est divisé en trois classes:

1 <sup>re</sup> classe.	{ Galène et blende }	tenant de 1.000 à 2.870 gr. d'argent aux 100 kil.	
2 <sup>e</sup> classe.	{ Galène et blende }	tenant de 598 à 1.000 <sup>gr</sup> aux 100 <sup>k</sup>	{ et moins de 15 p. 100 de blende,
3 <sup>e</sup> classe.	{ Galène et blende }	tenant de 309 à 598 <sup>gr</sup> aux 100 <sup>k</sup>	{ et environ 35 p. 100 de blende.

La première classe est expédiée à Freyberg, Allemagne; la deuxième est vendue dans le pays; la troisième n'a pas encore trouvé de débouché. Au printemps de 1874, on doit installer un petit atelier de préparation mécanique sur le modèle de celui du Terrible.

La mine est travaillée par *lease*, les concessionnaires donnant au propriétaire le quart du minerai qu'ils extraient. Quant aux fonçages et percements:

Un puits de 1 <sup>m</sup> ,50 sur 2 mètres a coûté par mètre courant plus de . . . . .	2.500 francs.
Une galerie de niveau de 2 <sup>m</sup> ,10 sur 1 <sup>m</sup> ,80 a coûté par mètre courant plus de . . . . .	7.500 francs.

Parmi les filons voisins des deux précédents, je citerai comme ayant fait preuve de richesse: *Brown*, situé au-dessus du Terrible, courant sur le N.60° E., plongeant presque verticalement, un peu vers le sud; le *United States Coin*, plus haut sur la montagne que le précédent, plongeant aussi au sud, mais sous un angle très-élevé, et courant sur l'E.-O.; le *Lilly and Roc*, encore plus haut, dirigé N. 55° E., et plongeant au sud sous un angle de 80°; le *Pelican, Silver Plume*, etc.

Un fait est à noter dans tous ces filons aussi bien que dans ceux du mont Leavenworth, c'est la régularité de leur allure: le seul exemple d'accident connu se trouve dans la mine Silver Plume. Le filon y est dirigé presque exactement est-ouest, plongeant de quelques degrés seulement vers le sud. Il a été découvert dans le gneiss et suivi par une galerie de niveau jusqu'au contact du granit. Suivant cette ligne de contact orientée S.-E.-N.-O., le filon avait été rejeté de 22 mètres vers le sud; une veinule d'argile de 0<sup>m</sup>,025 de puissance y constituait le remplissage.

## EXPLOITATION ET PRODUCTION.

Lorsqu'on arrive du comté de Gilpin où l'exploitation se fait exclusivement par puits et galeries, on est frappé du nombre incroyable de travers bancs qui ont été ouverts autour de Georgetown; on peut dire qu'il y en a un par tête d'habitant. Certaines mines sont exploitées exclusivement au moyen de galeries de ce genre, bien que la profondeur de leurs travaux et le peu d'eau qu'elles renferment ne semblent pas justifier les dépenses d'un système aussi coûteux. Ce qui est encore moins justifiable, c'est l'emploi de ces tunnels comme travaux de recherche. Au lieu d'être des travaux auxiliaires de l'exploitation, ce sont des travaux préliminaires, et les quatre cinquièmes d'entre eux sont parfaitement inutiles. C'est aux lois minières qu'il faut faire remonter la cause de cette *fièvre de tunnel*; l'individu qui dans une pareille galerie de recherche coupe un filon acquiert des droits sur ce filon, à moins qu'il ne soit bien prouvé que la même veine appartient déjà à une autre Compagnie. L'identité n'est pas toujours facile à constater et des mineurs peu scrupuleux en profitent; ils percent une galerie de recherche dans une direction telle qu'elle aille couper un filon connu et exploité à une profondeur plus grande que celle atteinte par les travaux antérieurs. Le filon recoupé, ils engagent un procès avec la compagnie exploitante, dans l'espérance, sinon de prendre possession de la propriété, au moins d'effrayer la compagnie et de l'amener à un compromis leur assurant une indemnité pécuniaire suffisante pour leur faire abandonner la réclamation. Ce genre d'escroquerie est assez florissant dans les mines des États et territoires de l'Ouest.

Les nombres suivants montrent les progrès de la production du comté de Clear Creek depuis 1867, date de l'origine des exploitations régulières pour argent.

En 1867	on a produit une somme de	68.968',80
En 1868	— —	422.248',50
En 1869	— —	1.191.861',80
En 1870	— —	1.294.545',20
En 1871	— —	3.995.596',60
En 1872	— —	6.912.455',60
En 1873	(six premiers mois de l'année)	5.593.757',55

Il est probable que la production totale de l'année 1873 sera moindre que celle de l'année précédente, par suite de la crise financière qui a éclaté à New-York au mois de septembre dernier et qui s'est fait sentir dans tous les États où circule le papier-monnaie (\*).

*Résumé.* — On s'est borné, dans la première partie de ce travail, à décrire trois des nombreux groupes de filons argentifères exploités aux États-Unis; ailleurs on a résumé les caractères des gîtes de l'Utah, et ces descriptions suffisent pour montrer combien sont variés les roches, les filons et les minerais dans lesquels on rencontre l'argent. L'exploitation de ce métal exige des travaux de mines sérieux; elle est aussi difficile que l'exploitation des placers de la Californie était simple. Résumons ici ses traits principaux et l'influence qu'ont sur elle les conditions auxquelles elle est soumise, tout en réservant pour la seconde partie l'étude de celles de la métallurgie.

L'intelligence du mode de structure des filons est la première difficulté contre laquelle aient à lutter les chefs des exploitations, et, pour la plupart d'entre eux, elle est insurmontable; ils ne peuvent s'en rendre maîtres par manque soit de connaissances techniques, soit d'expérience. On a vu que le Comstock est un gîte situé au con-

(\*) Dans son numéro de janvier 1874 le *Mining Review* de Georgetown évalue la production totale du Colorado, pendant l'année 1873, à la somme de 17.781.300',70, dans laquelle le comté de Gilpin entre pour 6.622.529',20 et Clear Creek pour 5.627.106',20.

tact de la syénite et du grüstein; son minerai est à teneur moyenne, mais abondant; le gîte est immense et les richesses irrégulièrement distribuées en apparence; c'est au hasard seul qu'on doit leur découverte. Les filons du Colorado sont dans le granit et le gneiss; minces et réguliers, ils s'écartent peu d'un plan vertical; leurs minerais, galène et blende argentifère, ont des teneurs élevées et sont peu abondants. Les filons d'Austin sont couchés dans le granit et se conforment plus ou moins au plongement et à la direction de ses strates; ils contiennent des sulfarséniures et des sulfo-antimoniures très-riches, mélangés à d'autres minéraux complexes; mais ils sont très-minces, et en les décrivant on a multiplié à dessein les détails pour bien montrer à quel point ils sont disloqués. Ce mode de structure compliqué se traduit dans les prix de revient de la tonne de minerai par des frais d'exploration qui, à Austin, sont supérieurs à la moitié des frais d'exploitation proprement dits, et sur le Comstock atteindraient à peu près la même valeur si l'on faisait entrer en ligne de compte, dans les dépenses annuelles, les sommes enfouies dans les travaux des mines qui sont restées improductives jusqu'à ce jour. Mais, dans le premier cas, la teneur élevée du minerai compense sa rareté, et, dans le second, son abondance rachète sa faible richesse. La régularité des filons du Colorado diminue considérablement les frais d'exploitation; mais la nature des minerais est telle que la plus grande partie doit être expédiée en Europe pour être traitée avec profit; les frais de transport étant élevés, on est obligé d'abandonner du minerai riche, qui, s'il pouvait être traité dans le pays ou préparé mécaniquement, donnerait de beaux bénéfices. Ici les difficultés métallurgiques contre-balancent les avantages d'une exploitation relativement facile et économique des filons.

Aucune mine d'argent n'a encore atteint une profondeur suffisante pour que l'eau puisse y causer des embarras sé-

rieux; il faut excepter le Comstock, dans l'exploitation duquel l'épuisement des eaux joue un rôle considérable; comme on l'a vu, le tunnel Sutro résoudra cette question.

A ces obstacles naturels s'en ajoutent d'autres qui sont locaux: un des plus importants est le prix élevé et l'incertitude de la main-d'œuvre, qui forme les 0,55 et quelquefois jusqu'aux 0,70 des frais d'exploitation. Sous ce rapport, les conditions sont les mêmes pour tous les exploitants; elles deviennent encore plus dures pour les exploitations un peu éloignées du chemin de fer du Pacifique. A l'ouest des Rocheuses, un mineur dit de première classe gagne rarement moins de 20 francs, et un mineur dit de deuxième classe moins de 15 francs par journée de huit heures.

Ces salaires ne représentent pas toujours d'une façon exacte les frais de main-d'œuvre: quand on ouvre une mine, et que le pays est encore presque désert, les compagnies sont obligées de construire des hôtels où elles logent et nourrissent leurs ouvriers; dans ce cas, le salaire est diminué de 5 francs par jour, mais il reste toujours des frais de construction, entretien, etc., à reporter sur les frais généraux. La plupart des mineurs de première classe ne seraient en Europe que des ouvriers ordinaires; ils n'ont pas de traditions et sont essentiellement nomades. Un mineur cherche du travail quand il n'a plus l'argent nécessaire pour entreprendre des explorations; dès que la saison redevient favorable et qu'il a ramassé une somme suffisante, il part pour tenter à nouveau la chance, généralement à la recherche d'un placer. Qu'il ait une occupation bien rémunérée, si le bruit d'une découverte de mines riches lui arrive, il quitte tout pour le nouvel Eldorado; c'est ainsi qu'en 1869 la découverte des mines de White Pine dépeupla Austin presque complètement. Les meilleurs ouvriers sont ceux qui viennent du Cornwall et du Canada; mais ils sont loin d'avoir la même valeur que dans les mines de leur pays natal. On a essayé d'employer des Chinois; ces malheureux

parias des États-Unis travaillent fidèlement et ne demandent que des salaires très-modérés; ils ont montré de très-solides qualités de mineurs; les ouvriers blancs les ont presque partout expulsés par force dans la crainte d'une concurrence aussi redoutable.

Comme la main-d'œuvre, les matériaux sont à des prix élevés. Les bois coûtent de 0<sup>f</sup>,47 à 0<sup>f</sup>,70 par mètre courant d'équarrissage déterminé, c'est-à-dire presque aussi cher qu'en France, malgré le voisinage de la Sierra Nevada pour le Comstock, et des Rocheuses pour le Colorado; dès qu'on s'écarte un peu des pays boisés, leur prix augmente rapidement: ainsi à Austin on paye 2 francs et 2<sup>f</sup>,25 le mètre courant. Cette augmentation est produite par les frais de transport très-onéreux dans tous les districts; le transport par voitures coûte 1<sup>f</sup>,25 par tonne et par kilomètre, à Austin, où les mules appartiennent à la compagnie des mines. Tous les matériaux viennent de San Francisco pour le Nevada et des États de l'Est pour le Colorado. En Nevada on paye la poudre ordinaire de 1<sup>f</sup>,50 à 2<sup>f</sup>,80 le kilogramme; la dynamite, dont l'emploi se généralise mais ne remplace pas complètement celui de la poudre, de 14 à 25 francs le kilogramme; le fer, 144 francs, et l'acier, 262 francs les 100 kilogrammes.

On conçoit dès lors que l'exploitation des métaux précieux soit seule possible dans de telles conditions; elle-même n'est cependant pas toujours fructueuse pour des causes diverses qui s'ajoutent aux précédentes. Trois grands groupes de compagnies par actions se livrent à cette exploitation; ils ont leurs sièges respectifs à San Francisco, à New-York et à Londres. On pourrait regarder la frontière du Nevada et de l'Utah comme la limite des champs d'action des compagnies de New-York et de San Francisco; les premières exploitent le pays qui est à l'est, les autres le pays qui est à l'ouest de cette ligne; les compagnies anglaises, très-nombreuses, sont répandues un peu partout.

De ces différentes sociétés, les unes exploitent leurs mines régulièrement et avec bénéfice: c'est la très-faible minorité; les autres ont des capitaux insuffisants, ou bien ont épuisé leur capital en payant une mine quatre ou cinq fois sa valeur; d'autres enfin sont formées pour spéculer simplement ou pour acheter et revendre des découvertes nouvelles soit aux États-Unis, soit à l'étranger. Les Anglais et les New-Yorkais ont été particulièrement malheureux dans ces affaires; souvent ils ont été trompés par des agents malhonnêtes, mais en maintes circonstances c'est à leur précipitation et à leur ignorance de l'état des choses qu'ils doivent faire remonter leur malheur. Ainsi la mine Emma (Utah), à peine explorée, a été vendue à Londres un million de livres sterling, parce qu'en l'ouvrant on avait eu la chance de tomber sur un amas de minerai riche. Il y a bien d'autres exemples de ventes à des prix aussi exorbitants.

Ainsi le prix d'achat de la mine est fréquemment hors de proportion avec sa valeur actuelle et les travaux qui l'ont développée, en sorte que la compagnie est grevée dès le début de l'exploitation; presque invariablement à ses embarras financiers s'ajoutent des embarras judiciaires qui l'obligent à suspendre les travaux et à déboursier de nouvelles sommes se chiffrant quelquefois par millions. J'ai déjà parlé à ce sujet de l'imperfection des lois minières des États-Unis. On ne peut nier que ces lois, dans un certain sens, ne soient favorables au développement du pays, puisqu'elles encouragent les recherches en donnant à l'inventeur le droit de propriété sous certaines conditions légales peu difficiles à remplir. Le morcellement de propriété qu'elles occasionnent peut aussi avoir une influence heureuse sur la rapidité des travaux; il est certain, par exemple, que le Comstock est un gîte suffisamment étendu pour occuper l'activité de plusieurs compagnies; mais il est une exception, et, si les lois ne sont pas nuisibles à l'exploitation de ses richesses, il est permis de croire qu'elles l'ont été et

pourraient l'être à celle de filons disloqués, comme les filons d'Austin; elles le seront tant qu'elles effraieront les capitaux étrangers par des perspectives de procès. Le mal est devenu si évident que, depuis peu d'années le Congrès a pris la matière en main et réformé bien des points vicieux; il reste à prendre bien d'autres dispositions parfaitement signalées par M. le commissaire des mines, R. W. Raymond; elles viendront dans un temps assez rapproché. Aussi ne peut-on pas considérer la législation actuelle comme définitive, et il est inutile, pour cette raison, d'en détailler davantage les défauts.

En résumé, l'exploitation des minerais d'argent est entravée et très-fréquemment rendue infructueuse par la situation des mines dans des contrées sauvages et désertes, par la structure même des gîtes imparfaitement comprise, le prix élevé de la main-d'œuvre et des matériaux, l'organisation vicieuse des compagnies et des lois minières insuffisantes. Elle est donc en présence de difficultés réelles, mais que l'avenir réduira. Quand la population sera plus dense dans ces États du Far West, les communications deviendront plus faciles, les prix baisseront et l'expérience améliorera les lois. L'exploitation des mines deviendra ce qu'elle est déjà en Pennsylvanie, une industrie sérieuse et régulièrement assise, et l'on ne verra plus, ce qui est commun au moment actuel, quelques rares exploitations rapportant des bénéfices à côté d'un grand nombre d'autres qui exploitent à perte.

## DESCRIPTION RAISONNÉE

DE

## QUELQUES CHEMINS DE FER A VOIE ÉTROITE

Par M. CH. LEDOUX, ingénieur des mines.

On a établi depuis quelques années, surtout à l'étranger, un grand nombre de chemins de fer à voie étroite. Celle-ci est maintenant adoptée à peu près exclusivement par l'Amérique du Nord sur les nouvelles lignes qui s'y construisent dans l'Ouest; à la fin de 1875, la longueur des chemins de ce genre en exploitation, la plupart à voie de 3 pieds (0<sup>m</sup>,912), était de 928 milles et demi (1.568 kilomètres) aux États-Unis, de 436 milles (736 kilomètres) au Canada; celle des chemins du même type en construction s'élevait à 2.961 milles (5.001 kilomètres) dans le premier de ces deux pays et à 555 milles (600 kilomètres) dans le second. On sait que la Norvège, l'Inde, l'Australie ont admis sur une partie de leur réseau la voie 1<sup>m</sup>,067. Enfin tout le monde connaît le petit chemin de Festiniog (pays de Galles), à voie de 0<sup>m</sup>,61, les lignes du Haut et du Bas Flénu, à voie de 1<sup>m</sup>,20, et celle du pays de Waës (Anvers à Gand), à voie de 1<sup>m</sup>,15, qui transportent des voyageurs et des marchandises et qui tous trois constituent des entreprises très-rémunératrices pour les capitaux engagés.

En France, la voie étroite n'a guère été employée jusqu'ici que sur des chemins de fer industriels. Pourtant son application aux lignes d'intérêt local a été discutée récemment, et, sans poser de principes absolus, beaucoup de bons esprits pensent qu'il conviendrait dans un grand nombre de cas de donner la préférence à la voie réduite qui permet l'établissement de lignes modestes, appropriées aux besoins

limités qu'elles ont à desservir, peu coûteuses et par conséquent ne grevant pas le budget des communes et des départements de dépenses aussi peu en rapport avec les ressources de ces derniers qu'avec les résultats financiers de l'exploitation. Si l'on persiste dans les anciens errements, la plupart des chemins de fer secondaires qui restent encore à établir en France ne peuvent donner de produits suffisants pour couvrir l'intérêt du capital engagé, quand on y comprend les dépenses de construction. Aussi compte-t-on, pour faire face à ces dernières, sur les subventions des contrées intéressées, et il est admis que le capital ainsi immobilisé ne doit pas produire d'intérêts. De plus, sous prétexte de chemins de fer départementaux, on cherche trop souvent à créer des lignes de transit, destinées à faire concurrence à celles qui constituent les grands réseaux. Par suite, les anciennes compagnies manifestent ordinairement une hostilité assez fondée contre ces nouveaux chemins jetés au travers de leurs lignes, et qu'elles craignent avec raison d'être obligées de racheter plus tard fort cher et d'exploiter dans des conditions désavantageuses. Elles rendent donc aussi difficiles qu'elles le peuvent l'échange du matériel et l'usage de leurs gares pour les raccordements, de sorte que le plus souvent le transbordement est nécessaire entre les lignes principales et les chemins secondaires (\*). L'avantage le plus important de l'unité de voie disparaît donc en fait dans la plupart des cas. Il est clair qu'une ligne à voie réduite ne pouvant guère desservir qu'un trafic local, ne soulèverait pas les mêmes répugnances.

L'économie qui résulte pour la construction de la réduction de la voie s'élève à 33 p. 100 au moins. Les faibles vitesses auxquelles on marche permettent l'emploi d'un matériel léger, qui rend le rapport de la charge utile au point

(\*) Le chemin de fer des Dombes ne se raccorde pas à Lyon avec le réseau de la Méditerranée et est desservi dans cette dernière ville par une gare spéciale.

mort bien plus favorable que sur la voie large. L'ensemble de l'exploitation est d'ailleurs monté sur un pied plus modeste et les dépenses afférentes (bien entendu quand il s'agit d'un trafic peu considérable) sont moins élevées.

Les considérations qui militent en faveur de l'application de la voie étroite à un assez grand nombre de chemins de fer secondaires, et que nous venons à peine d'indiquer, ont été exposées avec une grande netteté par MM. Thirion et Bertera (*Observations sur le projet de loi des chemins de fer départementaux*. Paris, 1865). Notre intention n'est pas de traiter à nouveau ce sujet; nous voudrions seulement montrer, par la description raisonnée de plusieurs lignes à voie réduite, fonctionnant dans des contrées et dans des conditions d'exploitation bien différentes les unes des autres, le parti qu'on peut tirer de ces petits chemins économiques et fournir en même temps aux ingénieurs qui auraient des travaux de ce genre à diriger, des données et des renseignements pratiques qui leur soient de quelque utilité.

Nous étudierons successivement les chemins de fer d'Ergastiria (Grèce), de Mokta el Hâdid (Algérie), de Rochebelle et de Cessous et Trébiau (Gard). Accessoirement et comme comparaison avec les précédents, nous donnerons quelques indications sommaires sur les chemins de Mondalzac (Aveyron) et de Saint-Léon (Sardaigne) qui ont déjà fait l'objet de publications plus ou moins complètes.

---

## PREMIÈRE PARTIE.

### CHEMIN DE FER D'ERGASTIRIA.

---

#### CHAPITRE I.

##### DESCRIPTION DES LIEUX ET CONDITIONS D'ÉTABLISSEMENT DU CHEMIN DE FER.

L'usine d'Ergastiria est située sur la côte orientale du Laurium, province de l'Attique (Grèce), à 11 kilomètres

environ du cap Colonne ou cap Sunium. Ce promontoire forme l'extrémité d'une chaîne de collines, dirigée dans son ensemble à peu près nord-sud, et dont l'altitude moyenne est de 250 à 300 mètres; les points les plus élevés sont à 400 mètres au-dessus de la mer. Une autre chaîne, parallèle à la précédente, mais plus basse, court le long du rivage oriental. La direction nord-sud est donc celle des vallées principales qui sont larges et à pentes relativement faibles. A la hauteur d'Ergastiria et de Thérîkô, la chaîne centrale se rapproche notablement de la côte Est et donne naissance à des ravins transversaux à pentes beaucoup plus rapides.

La constitution géologique et la nature des gîtes métallifères du Laurium ressemblent singulièrement à celles de la Sardaigne. Le sol se compose d'une alternance de mica-schistes et de calcaires métamorphiques. Ceux-ci sont interstratifiés dans les schistes et y forment plusieurs étages bien nets; ils constituent toujours les sommets les plus élevés. Leur direction générale est à peu près la même que celle de la chaîne principale, et ils inclinent légèrement à l'est et à l'ouest de la ligne de faite. Ils ont une structure cristalline prononcée, et sont ordinairement gris-clair et zônés, parfois aussi d'un blanc éclatant, comme les marbres du Pentélique, de l'Hymette et de l'Acropole d'Athènes qui appartiennent à la même formation. Ils fournissent d'excellents matériaux de construction et un ballast passable. Les micaschistes sont tantôt durs et quartzeux, tantôt argileux.

En plusieurs points ces terrains ont été traversés par des roches éruptives : à Plakâ, près de Petraki, sur la chaîne centrale, est un îlot de granit; à Thérîkô et à 2 kilomètres au sud d'Ergastiria, sur la chaîne secondaire, on trouve des pointements de diorite.

La végétation est clair-semée; elle se compose de bouquets de pins, entremêlés de quelques chênes verts, qui n'offrent aucune ressource pour la construction. Les quanti-

tés de pluie qui tombent en automne et en hiver sont considérables; mais l'eau est absorbée presque immédiatement dans les fissures des calcaires et se rend à la mer par des canaux souterrains, de sorte que les ruisseaux sont à sec pendant presque toute l'année. Les ouvertures des ouvrages d'art peuvent donc être très-faibles. Les sources sont rares et le manque d'eau n'est pas une des moindres difficultés contre lesquelles ont à lutter les entreprises industrielles dans ce pays.

Les gisements de minerai sont situés à plusieurs niveaux différents, au contact des schistes et des calcaires. Ils sont formés de galène argentifère disséminée plus ou moins irrégulièrement dans une gangue de fer carbonaté, avec de la blende, des sulfures d'antimoine, d'arsenic, de fer et de cuivre. On a rencontré aussi des gîtes de calamine qui sont certainement destinés à prendre une grande importance. Les minerais de plomb argentifère ont été exploités pendant une longue série de siècles jusqu'au commencement de l'ère chrétienne.

Les anciennes mines sont comprises presque toutes entre la vallée centrale de Korphona et la côte orientale. Sur ce vaste espace, le terrain est criblé d'ouvertures de puits et de galeries et d'immenses quantités de résidus de triage et de lavage s'étendent au fond des vallées ou sur les flancs des collines. Ces amas, semblables à ceux qui ont été longtemps exploités aux environs de Carthagène, ont reçu le nom espagnol de *terreras*; ils sont appelés en grec *ekboladés*. Les emplacements des anciennes fonderies sont indiqués par de nombreux dépôts de scories, dont les principaux sont marqués sur la carte (*fig. 1, Pl. VI*) et portent les noms de Mandra Sotirkô, Plaka, Therikô, Ergastiria, Pasha, Panorama Lagrâna, Megala Pephka, Berzekô, Camaresa, Sinterini, Barbaliaki et Carvalos.

L'usine d'Ergastiria a été fondée en 1864, pour le traitement des scories antiques. Elle est située au fond de la

baie du même nom, en face de l'île de Makronisi, sur l'emplacement d'un ancien scorial. Elle comprend dix-huit fours à manche, dont douze en marche constante. Chacun de ces fours passe de 30 à 35 tonnes de scories par vingt-quatre heures, ce qui donne pour la consommation totale de l'usine 400 tonnes environ par jour. Les scories tiennent 10 à 11 p. 100 de plomb et rendent en moyenne 8 p. 100. Les scories de Lagrana et de Panorama sont apportées par mer à l'usine, au moyen de barques. Les autres scoriaux ont été reliés à Ergastiria par un réseau de 66 kilomètres de routes empierrées qui ont coûté de 8.000 à 9.000 francs par kilomètre. Le transport était fait par deux cents charrettes attelées chacune d'un cheval, portant 1.200 à 1.300 kilogrammes, et parcourant de 28 à 30 kilomètres par jour. Le prix variait suivant les points de 0<sup>f</sup>,50 à 0<sup>f</sup>,60 par tonne et par kilomètre. On parvenait ainsi, quoique avec peine, à assurer l'alimentation de l'usine, et le service a marché de cette façon jusqu'en 1869.

Dès 1865 on avait découvert les ekboladès ou terreras, et des essais poursuivis avec persévérance avaient démontré la possibilité d'en tirer parti.

Ces minerais peuvent être divisés en trois catégories :

1° Minerais argileux pauvres, tenant 6 à 7 p. 100 de plomb qu'on ne peut enrichir par le lavage, très-réfractaires et inutilisables ;

2° Minerais argileux plus riches, contenant de 100 à 150 kilogrammes de plomb et de 150 à 250 grammes d'argent à la tonne, et qu'on peut passer directement au four à manche en mélange avec les scories ; les minerais de cette catégorie sont en très-petite quantité ;

3° Minerais en fragments plus ou moins gros, tenant en moyenne 6 à 7 p. 100 de plomb et 100 à 120 grammes d'argent par tonne, et que leur état physique permet d'enrichir par la préparation mécanique. La galène qui se trouvait primitivement dans ces minerais a été oxydée avec le temps

par les agents atmosphériques, et la matière plumbeuse est comme disséminée dans toute la masse. Aussi le lavage ne donne-t-il qu'un enrichissement très-imparfait et au prix de pertes très-considérables ; on a reconnu par des expériences nombreuses que l'on ne pouvait en grand dépasser la teneur de 17 à 18 p. 100 de plomb et qu'il fallait 5 tonnes de terreras pour obtenir une tonne de minerai enrichi.

Un grand atelier de préparation mécanique fut projeté pour traiter par jour 500 tonnes d'ekboladès et pour fournir à la fonderie 100 tonnes de minerai lavé.

Il est clair que ce traitement ne pouvait être avantageux qu'à deux conditions : 1° que le mélange avec les scories riches permît de passer au four à manche des minerais aussi pauvres ; 2° que le minerai brut fût amené à la laverie à un prix extrêmement bas. La seconde de ces conditions exigeait impérieusement la construction d'un chemin de fer. En effet, les charrettes suffisaient à peine au transport des 400 tonnes de scories qu'exigeait l'usine, et lors même qu'on eût doublé le nombre des équipages, l'état des routes n'aurait pas permis de les faire circuler utilement. La construction d'une voie ferrée fut donc décidée, et nous fûmes chargé d'étudier les conditions techniques d'établissement de la voie et du matériel roulant.

Les principaux terreras utilisables sont situés à Berzekô, Camaresa et Sintérini, dans le haut de la vallée désignée sur la carte sous le nom de Korphona, à l'ouest de la chaîne centrale du Laurium. Il existe en outre aux points ci-dessus désignés d'importants amas de scories. Le chemin de fer, partant d'Ergastiria, devait donc aboutir à Berzekô en passant par Camaresa. De ce dernier point, un embranchement se serait ultérieurement détaché vers Sintérini et Barbaliaki. On desservait ainsi, non-seulement les terreras et les principaux scoriaux, mais encore les puits de recherches de mines de Camaresa et de Berzekô qui paraissent avoir beaucoup d'avenir. Le tonnage à transpor-

ter dans un seul sens était de 750 tonnes par jour, soit 500 tonnes de terreras et 250 tonnes de scorées.

Le tracé était à peu près indiqué par celui de la route qui relie Berzekô à l'usine et qui franchit la chaîne centrale au col de la Rotonde, à la cote 170<sup>m</sup>,96. Le point de départ était à la cote 3<sup>m</sup>,60, le point d'arrivée à la cote 87,30. Il fallait que le travail fût achevé en un an, par suite que la longueur du souterrain nécessaire pour le passage du faite ne dépassât pas 300 mètres. La vallée que l'on devait suivre pour atteindre le col était presque droite et ne permettait pas un grand développement. On se décida, en conséquence, à accepter une rampe de 35 millimètres pour la section comprise entre l'usine et le col, où l'on ne devait remorquer que des wagons vides, et une pente de 26 millimètres au maximum pour la section de Berzekô à la Rotonde, sur laquelle la charge circulait en remonte.

La largeur de voie adoptée était celle du chemin de fer de Moktâ el Hâdid, 1 mètre de bord en bord intérieur des rails.

Enfin, pour réduire autant que possible les dépenses de construction, on admit des courbes d'un rayon minimum de 60 mètres sur la première section, de 70 mètres sur la seconde.

Telles étaient les conditions techniques du tracé, dont l'étude fut confiée à M. Tur, ancien conducteur des ponts et chaussées.

## CHAPITRE II.

### VOIE.

#### § 1. — Tracé.

On trouvera, *fig.* 2 et 3, Pl. VI, une partie du plan et le profil en long du tracé. Celui-ci part de l'usine à la cote 3<sup>m</sup>,60. La voie est en rampe de 0<sup>m</sup>,002 sur 393<sup>m</sup>,55, jusqu'à l'extrémité de la gare de l'usine. Elle commence ensuite à s'élever par des rampes de 9 millimètres sur 128<sup>m</sup>,80 et de

22 millimètres sur 440<sup>m</sup>,43. A partir de ce point jusqu'au col, la rampe est constante et égale à 35 millimètres sur une longueur de 3.847<sup>m</sup>,13. Le chemin suit la rive droite de la vallée, dont il épouse la forme au moyen de courbes fréquentes de 60 mètres de rayon. Le souterrain par lequel la voie franchit le col a 267<sup>m</sup>,50 de longueur; il a deux pentes inverses, l'une de 0<sup>m</sup>,026 vers la mer, l'autre de 0<sup>m</sup>,002 sur l'autre versant. Le point le plus élevé du tracé est à la cote 154,90, à 4.992<sup>m</sup>,91 de l'origine.

A la sortie du souterrain, on a ménagé une voie de garage sur une partie en pente de 0<sup>m</sup>,002.

Le chemin gagne ensuite Camaresa et Berzekô, avec des pentes variant de 0<sup>m</sup>,0175 à 0<sup>m</sup>,026. La vallée étant large, on a pu se développer plus à l'aise que sur l'autre versant; le rayon des courbes est au minimum de 70 mètres et dépasse ordinairement ce chiffre. Le point d'arrivée à Berzekô est à la cote 87, à 8.500 mètres de l'origine.

Au point kilométrique 5742,55 se détache l'embranchement destiné à desservir les grands terreras de Camaresa, et qui devait être poussé plus tard jusqu'à Sinterini et Barbaliaki. La construction de cet embranchement a été arrêtée par ordre du gouvernement grec, lorsque des difficultés s'élevèrent entre lui et la compagnie au sujet de l'exploitation des ekboladès. La longueur construite n'est que de 200 mètres.

Sur l'une et l'autre section, les courbes et contre-courbes successives sont séparées par un alignement droit d'au moins 25 mètres.

La longueur totale du chemin, y compris les embranchements, est de 9.200 mètres, savoir :

	mètres.
Ligne principale. . . . .	8.500
Embranchements dans l'usine. . . . .	500
Embranchement de Camaresa. . . . .	200
Ensemble. . . . .	9.200

Ces 9.200 mètres se répartissent de la manière suivante :

	VOIE PRINCIPALE.		Embranche- mont de Camaresa.	Embranche- ment de l'usine.	TOTAL.
	1 <sup>re</sup> section. — De l'usine à la tête sud du souterrain.	2 <sup>e</sup> section. — De la tête sud du souterrain à Berzekò.			
	mètres.	mètres.	mètres.	mètres.	mètres.
Alignements droits. . . . .	2.142,34	1.445,13	149,75	264,50	4.001,72
Développement des courbes de 50 <sup>m</sup> de rayon. . . . .	—	—	—	235,50	235,50
— de 60 — . . . . .	1.741,35	—	—	—	1.741,35
— de 70 — . . . . .	335,05	1.062,98	50,25	—	1.448,28
— de 80 — . . . . .	171,00	70,00	—	—	241,00
— de 90 — . . . . .	—	110,00	—	—	110,00
— de 100 — . . . . .	221,30	98,70	—	—	320,00
— de 120 — . . . . .	146,91	—	—	—	146,91
— de 140 — . . . . .	—	414,98	—	—	414,98
— de 150 — . . . . .	216,50	136,50	—	—	353,00
— de 200 — . . . . .	109,26	78,00	—	—	187,26
Totaux. . . . .	5.083,71	3.416,29	200,00	500,00	9.200,00

Un embranchement de 650 mètres devait relier l'atelier de préparation mécanique projeté avec la voie principale. L'atelier n'ayant pas été exécuté, par suite de l'interdiction de l'exploitation des terreras, l'embranchement n'a pas été établi.

La gare d'Ergastiria comprend, outre les embranchements aux fours :

Une voie de garage de. . . . .	mètres.	240
Une voie d'évitement de. . . . .	100	
Embranchements aux dépôt et ateliers. . . . .	200	
Il y a à Berzekò une voie de garage de. . . . .	160	
— à Camaresa — . . . . .	100	
— à la Rotonde (col) — . . . . .	100	
Ensemble. . . . .	900	

### § 2. — Construction.

Les travaux ont été dirigés par M. Collet, sous-chef de section au chemin de fer de Paris à Lyon et à la Méditerranée. Commencés le 20 mai 1870, ralentis pendant les désastreux événements de 1870-1871, ils ont été terminés en octobre 1871, date de la mise en exploitation du chemin.

Le recrutement des ouvriers a présenté de grandes diffi-

cultés. Les Grecs continentaux répugnent au dur travail du terrassier et du mineur, et les chefs de chantier ayant un peu d'expérience manquaient absolument. On possédait quelques mineurs espagnols qui furent employés au souterrain et l'on fit venir des Piémontais, bons ouvriers, qui formèrent quelques ouvriers grecs. Les terrassiers et les maçons furent recrutés principalement à Milo et parmi les Maniotes.

Le nombre total des ouvriers employés ne dépassa pas 300 et fut en moyenne de 200.

Une partie des terrassements dut être exécutée en régie faute de tâcherons capables d'accepter une entreprise.

### § 3. — Terrassements et souterrain.

Les fig. 4, 5, 6, Pl. VI, donnent les profils-types de la voie unique en remblai et en déblai et celui de la double voie. La plate-forme en remblai a 3 mètres de largeur; en déblai avec les deux fossés, 4<sup>m</sup>,60. Vu la grande pente du chemin on a pu, dans la plupart des tranchées, ne ménager pour l'écoulement des eaux qu'un seul fossé, placé du côté de la montagne; la largeur de la plate-forme, y compris le fossé, est alors réduite à 3<sup>m</sup>,80.

Sur la première section (de l'usine au col), les terrains traversés étaient la terre végétale, le micaschiste plus ou moins dur et le marbre dur. Le talus était généralement de  $\frac{1}{2}$ , et a varié de  $\frac{1}{4}$  à  $\frac{1}{4}$  et même  $\frac{1}{5}$ .

Les prix payés par mètre cube ont été ordinairement de 3 francs dans le micaschiste et de 5 francs dans le marbre.

Sur la deuxième section, on a traversé des micaschistes assez tendres et des terreras. Les prix payés ont été en moyenne de 2 francs par mètre cube.

Le matériel employé se composait de deux wagons de terrassement, de 150 brouettes, d'une certaine quantité de charrettes fournies par l'usine, enfin d'un nombre suffisant de pelles, pioches, masses, aciers, forges, etc.

Le cube des terrassements (non compris le souterrain), s'est élevé à 25.000 mètres cubes environ.

La dépense totale a été de 94.886<sup>f</sup>,33, soit 3<sup>f</sup>,795 par mètre cube, ou 10.315<sup>f</sup>,73 par kilomètre de voie principale.

*Souterrain.* — Le souterrain a été percé dans le mica-schiste dur. La section est donnée par la *fig. 7*, Pl. VI; elle est de 11<sup>m</sup>,54. On a utilisé pour le percement deux puits anciens, situés l'un à 39 mètres de la tête sud, l'autre à 120 mètres de la tête nord. On avait donc six points d'attaque, qui ont été bientôt réduits à cinq par la jonction des galeries partant de la tête sud et du puits voisin.

Le travail a commencé le 24 mai 1870. La rencontre des deux galeries du sud a eu lieu le 24 septembre; celle des galeries nord le 7 janvier 1871; enfin la jonction définitive entre les deux galeries nord et sud a été opérée le 12 février suivant. L'avancement moyen, par front d'attaque en bonne marche, était de 8 à 9 mètres par mois. L'élargissement et le défoncement en grande section ont été terminés à la fin d'avril. La longueur étant de 267<sup>m</sup>,50, le cube total des déblais est de 3.086<sup>m</sup>,950, auxquels il faut ajouter 245 mètres cubes de déblais exceptionnels maçonnés.

Les revêtements complets avec voûtes n'ont été exécutés que sur 40<sup>m</sup>,85 de longueur; les pieds-droits sont en outre maçonnés sur 30<sup>m</sup>,75.

La *fig. 7*, Pl. VI, montre la coupe de l'ouvrage. Sa hauteur dans œuvre est de 5<sup>m</sup>,40; la largeur égale la hauteur. Le cube du mètre courant est de 11<sup>m</sup>,54.

Le matériel se composait de huit wagons, de deux ventilateurs à bras, d'une forge, et des masses, fleurets, bourroirs, etc., nécessaires.

Le prix total du travail s'est élevé à 75.290<sup>f</sup>,66, ainsi répartis :

1° Percement et travaux accessoires (puits, baraques, forges, etc.) . . . . .	francs. 65.757,76
2° Revêtements (têtes comprises) . . . . .	5.490,00
3° Wagons, forge, outils, ventilateurs. . . . .	4.042,90
Ensemble. . . . .	75.290,66

Le prix de revient du mètre courant a donc été de 281<sup>f</sup>,46.

#### § 4. — Ouvrages d'art.

A part la gare de l'usine, établie au-dessus du sol naturel avec des murs de soutènement, et qui comprend six pontceaux de 5 à 4 mètres d'ouverture, les ouvrages d'art sont très-peu importants. Ils comprennent dix-sept aqueducs dallés de 0<sup>m</sup>,40 à 1 mètre d'ouverture, deux aqueducs en plein cintre de 1 mètre, deux passages en plein cintre de 2<sup>m</sup>,50, les murettes et la canalisation des têtes du souterrain, et quelques murs de soutènement. Ils ont coûté ensemble, et non compris la gare d'Ergastiria, 15.917<sup>f</sup>,31.

#### § 5. — Gare d'Ergastiria.

Les fours sont réunis par groupes de six, dans trois grands hangars. Le plancher de chargement est à la cote 5<sup>m</sup>,15, le niveau des rails à la cote 5<sup>m</sup>,60. Il n'a pas été possible d'augmenter cette dernière, par suite de l'obligation de faire passer les wagons sous les arceaux de la galerie de condensation des fumées. Chacun des hangars est desservi par une voie parallèle à sa longueur, reliée par une plaque tournante à une voie qui s'embranché sur la ligne principale.

Cette disposition a exigé des murs de soutènement assez considérables, le sol naturel étant seulement à la cote 1<sup>m</sup>,40. Pour assurer la circulation des charrettes et des vagonnets dans l'usine, on a dû ménager cinq ponts en tôle de 3 mètres d'ouverture et un pont de 4 mètres. Les *fig. 8*, 9, 10, 11, Pl. VI, donnent le dessin de ces ouvrages. Chaque pont se compose de quatre poutres en tôle reliées deux à deux et comprenant entre elles une poutre en chêne de 0<sup>m</sup>,20 sur 0<sup>m</sup>,20 d'équarrissage qui supporte le rail. Les poutres

de rive, qui ne portent qu'un plancher formant passage des deux côtés de la voie, sont en chêne et ont 0<sup>m</sup>,22 sur 0<sup>m</sup>,14 d'équarissage. Les poutres en tôle sont à double T et formées d'une âme de 0<sup>m</sup>,008 d'épaisseur et de 0<sup>m</sup>,22 de hauteur, et de quatre cornières ayant 0<sup>m</sup>,070 de hauteur, 0<sup>m</sup>,070 de largeur et 0<sup>m</sup>,009 d'épaisseur. Elles pèsent 53 kilog. le mètre courant et ont coûté 40 francs les 100 kilog. rendues à Marseille. Elles ont 5<sup>m</sup>,60 de longueur pour l'ouverture de 3 mètres et 4<sup>m</sup>,60 pour l'ouverture de 4 mètres. Les poutres de rive et les poutres du milieu sont reliées entre elles par quatre entretoises en bois qui supportent en même temps le plancher et par deux semelles en tôle placées sous les entretoises médianes.

Les machines pouvant être accidentellement appelées à circuler sur l'un de ces ponts, les dimensions des poutres porteuses ont été calculées en vue de résister à cette charge.

Leur poids maximum est de 23 tonnes; elles ont trois essieux à peu près également chargés et espacés de 1<sup>m</sup>,07 et 1<sup>m</sup>,15.

Les conditions d'équarrissage se calculent de la manière suivante, L étant la longueur de la poutre,

$v$  sa demi-hauteur,

6  $p$  le poids total de la machine,

E le coefficient d'élasticité du fer,

I le moment d'inertie de la poutre par rapport à un axe horizontal passant par son milieu,

$\rho$  le rayon de courbure en un point quelconque de la poutre,

$\lambda$  la distance variable de l'essieu extrême le plus rapproché de l'essieu médian à l'une des extrémités de la poutre.

Tant que  $\lambda > L - 1<sup>m</sup>,07$ , c'est-à-dire lorsqu'il n'y a qu'un seul essieu sur la poutre (*fig. 12, Pl. VI*), on a, en prenant pour axe des  $y$  la verticale passant par l'essieu,

$$\frac{EI}{\rho} = p \cdot \frac{L - \lambda}{L} (\lambda - x) \quad (1)$$

l'effort moléculaire maximum  $R_1$  a lieu pour  $x = 0$ ,  $\lambda = \frac{L}{2}$

$$R_1 = \frac{pvL}{4I} \quad (1)$$

Pour que R puisse atteindre cette valeur, il faut que  $L < 2<sup>m</sup>,14$ . Si  $L > 2<sup>m</sup>,14$ , le maximum de R a lieu pour  $\lambda = L - 1,07$ .

Quand  $\lambda$  est compris entre  $L - 1,07$  et  $L - 2,20$ , c'est-à-dire quand il n'y a que deux roues sur la poutre (*fig. 13*), on a, en prenant pour axe des  $y$  la verticale passant par l'essieu de gauche,

$$p_1 = \frac{2p}{L} (L - 0,535 - \lambda),$$

et pour  $x$  compris entre 1,07 et  $1,07 + \lambda$

$$\frac{EI}{\rho} = p_1(1,07 + \lambda - x) = \frac{2p}{L} (L - 0,535 - \lambda) (1,07 + \lambda - x),$$

$$\text{d'où} \quad R = \frac{2pv}{LI} (L - 0,535 - \lambda) (1,07 + \lambda - x),$$

et pour  $x$  compris entre 0 et 1,07

$$\frac{EI}{\rho} = p_1(1,07 + \lambda - x) - p(1,07 - x),$$

$$\text{d'où} \quad R = \frac{2pv}{LI} \left[ 0,535L - 2 \cdot 0,535^2 + (L - 3 \cdot 0,535)\lambda - \lambda^2 - \left( \frac{L}{2} - 0,535 - \lambda \right) x \right].$$

Si  $L < 3,33$ , le maximum de R a lieu pour deux valeurs de  $x$  et de  $\lambda$ , savoir :

$$x = 1,07, \lambda = \frac{L - 0,535}{2} \quad \text{et} \quad x = 0, \lambda = \frac{L - 3 \cdot 0,535}{2};$$

il est égal dans les deux cas et l'on a

$$R_2 = \frac{pv}{2LI} (L - 0,535)^2 \dots \quad (2)$$

Si  $L > 3,33$  et  $< 3,865$ , le maximum de R a lieu seulement pour  $x = 0$ ,  $\lambda = \frac{L - 0,535}{2}$  et il est égal au précédent..

Enfin si  $L > 3,865$ , le maximum de  $R$  a lieu pour  $x = 1,07$   
 $\lambda = L - 2,20$ , et l'on aura

$$R_2 = 3,33 \frac{pv}{LI} (L - 2,20).$$

Enfin, si  $\lambda < L - 2,20$ , c'est-à-dire si les trois roues se trouvent ensemble sur le pont (*fig. 14*), on a, en prenant toujours pour axe des  $y$  la verticale passant par l'essieu médian et remarquant que la section la plus fatiguée sera toujours placée du côté de l'essieu extrême le plus rapproché de l'essieu médian, pour  $x$  compris entre  $1,07$  et  $1,07 + \lambda$

$$p_1 = \frac{3p}{L} (L - 1,09 - \lambda),$$

$$\frac{EI}{\rho} = \frac{3p}{L} (L - 1,09 - \lambda) (1,07 + \lambda - x)$$

ou 
$$R' = \frac{3pv}{LI} (L - 1,09 - \lambda) (1,07 + \lambda - x),$$

et pour  $x$  compris entre  $0$  et  $1,07$

$$\frac{EI}{\rho} = \frac{3p}{L} (L - 1,09 - \lambda) (1,07 + \lambda - x) - p(1,07 - x),$$

d'où 
$$R'' = \frac{3pv}{LI} \left[ \frac{2}{3} L - 1,07 - 1,1663 + (L - 2,16)\lambda - \lambda^2 - \left( \frac{2}{3} L - 1,09 - \lambda \right) x \right],$$

le maximum de  $R$  a toujours lieu pour  $x = 0$   $\lambda = \frac{L - 2,16}{2}$

et l'on a

$$R_3 = \frac{pv}{4LI} (3L^2 - 4,40L + 0,0012). \quad (5)$$

En discutant les valeurs relatives de  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ , suivant les valeurs de  $L$ , on trouve que :

Quand  $L$  est compris entre  $0$  et  $1,8254$ , l'effort maximum de la poutre  $= \frac{pvL}{4I}$  ;

Si  $L$  est compris entre  $1,8254$  et  $2,2594$ , l'effort maximum  $= \frac{pv}{2LI} (L - 0,555)^2$  ;

Enfin si  $L > 2,2594$ , l'effort maximum  $= \frac{pv}{4LI} (3L^2 - 4,40L + 0,0012)$ .

Appliquant ces résultats au pont de 3 mètres d'ouverture, la résistance de l'âme en bois étant négligée, on a

$$I = 0,0000848, \quad v = 0,11, \quad p = 3.800,$$

d'où  $R \text{ max.} = 1,1501 \frac{pv}{I} = 5^t,60$  par mill. carré.

Sur le pont de 4 mètres d'ouverture, on ne fait circuler que des wagons pesant au plus 8.650 kilog. et portés sur deux essieux espacés de  $1^m,45$ . Il faut appliquer dans ce cas la formule (2) en remplaçant  $0,535$  par  $0,725$  ; on a alors

$$R = \frac{pv}{2LI} (L - 0,725)^2 = 1,3407 \frac{pv}{I} = 3^t,75 \text{ par mill. carré.}$$

#### § 6. — Ballastage.

Le ballast a été presque partout composé de micaschiste ou de calcaire concassé. Aux environs de l'usine on a employé des scories de rejet (*gâtchas*).

L'épaisseur de la couche de ballast est de  $0^m,30$ , le cube par mètre courant de  $0^m^3,645$ , le prix par mètre cube de  $3^t,09$ . La quantité totale de ballast est d'environ 7.000 mètres cubes. La dépense totale a donc été de  $21.664^t,80$ .

#### § 7. — Rails. Éclisses. Crampons. Selles.

On a adopté sans modification le type du rail du chemin de fer de Moktâ el Hâdid (Algérie), qui est représenté *fig. 1*, Pl. VII. Ses dimensions principales sont :

	millimètres.
Hauteur . . . . .	90
Largeur du champignon . . . . .	48
Épaisseur de l'âme . . . . .	12
Largeur du patin . . . . .	75

La largeur de la voie de bord en bord des rails étant de 1 mètre, sa largeur d'axe en axe est donc de  $1^m,048$ .

Le profil du rail se prête bien à l'éclissage, l'inclinaison des parties sur lesquelles s'appuie l'éclisse étant de  $125^{\circ},42'$ . Il est moyennement élancé, le rapport de la hauteur à la demi-largeur du patin est de 2,4. Dans le type du rail PM du chemin de fer de Lyon (hauteur 130, largeur du pied 130), ce rapport est de 2; il est de 2,60 dans le type P.L.M. du même chemin (hauteur 130, base 100), de 2,38 dans le rail du Nord (hauteur 125, base 105), de 2,42 dans le rail de l'Est (hauteur 120, base 99); il atteint 2,71 dans le troisième type du rail de Cologne Minden. (hauteur 124, base 91,4) (\*).

Le chemin de fer de Moktâ étant à grandes courbes, on pouvait redouter, en adoptant le même type de rail sur le chemin d'Ergastiria, où les courbes sont excessivement roides, qu'il ne se produisit une tendance au déversement sur la file extérieure. Cette crainte ne s'est pas vérifiée, les rails extérieurs des courbes sont toujours restés dans leur position normale, ce qui prouve que la largeur du patin est bien suffisante. La tendance au déversement était d'ailleurs combattue par un dévers considérable et par la forte inclinaison du rail vers l'intérieur de la voie.

Les rails d'Ergastiria sont en acier Bessemer. Ils pèsent  $20^{kil},500$  le mètre courant. Ils ont été fabriqués à l'usine de Bességes (Gard). La longueur normale des barres est de  $5^m,50$ . Par suite de conventions particulières, 10 p. 100 d'entre elles n'avaient que  $4^m,50$  ou 5 mètres de longueur. Le prix était de 22 francs la tonne prise en gare de Bességes.

Les stipulations techniques du marché étaient les suivantes :

« Les conditions relatives à la qualité du métal et au travail du laminage seront les mêmes que celles qu'accepte

(\*) Couche, *Exploitation des chemins de fer*, tome 1, page 65.

« la compagnie de la Méditerranée pour les rails en acier Bessemer que lui fournit l'usine de Bességes.

« Les barres devront être parfaitement rectilignes, exemptes de criques, gerçures, pailles, manque de métal ou autres défauts: les opérations du dressage des barres, du coupage et du dressage des sections extrêmes, du perçage des trous d'éclisses seront conduites comme pour les rails de même nature fournis à la compagnie de la Méditerranée.

« Le perçage des encochès pourra se faire à l'emporte-pièce. Chaque barre portera quatre trous d'éclisses et quatre encoches. Le bord supérieur du champignon à l'extrémité de chaque barre sera légèrement chanfriné.»

*Travail du métal dans le rail.* — La section du rail Moktâ est de  $2.575^{mm^2},64$ . Le centre de gravité est à très-peu près au milieu de la hauteur; sa distance à la base est de  $45^{mm},28$ . La plus grande distance à la fibre neutre,  $v$ , se trouve donc à la partie inférieure du patin et elle est égale à  $45^{mm},28$ . Le moment d'inertie de la section,  $I$ , est de  $0,0000026109$ . On a  $\frac{v}{I} = 17342$ .

Si l'on considère le rail comme un solide posé sur deux appuis et encastré aux deux extrémités, la fatigue maximum a lieu au droit des appuis et est égale à  $\frac{4}{27} \frac{vPa}{I}$ , expression dans laquelle  $P$  représente la charge mobile,  $a$  la portée.

Sur le chemin de fer d'Ergastiria, le poids maximum des locomotives, ayant leurs soutes remplies, est de 22.965 kilogrammes; la charge la plus forte est sur l'essieu d'arrière et est de 7.845 kilogrammes. La portée la plus grande est de  $0^m,72$ . La fatigue maximum du métal a lieu à la partie inférieure du patin, qui travaille par compression; elle est de  $7^t,25$  par millimètre carré.

Comme on le verra tout à l'heure, ce chiffre de  $7^t,256$  est

encore bien éloigné de celui qui produit la rupture ou même seulement une déformation permanente.

Si l'on considère une des portées de joint et si l'on admet que l'une seulement des sections extrêmes soit encastrée, l'autre étant libre, la fatigue maximum est donnée par l'expression  $0,1928 \frac{vPa}{I}$ . Dans l'espèce,  $a = 0,60$  et la fatigue maximum =  $7^k,869$  par millimètre carré.

Des expériences de M. Fairbairn, citées par M. Couche (*Exploitation des chemins de fer*, tome I, page 482), ont montré que l'acier résiste beaucoup mieux à l'écrasement qu'à la rupture par traction, et que ces deux résistances sont dans le rapport de 156 à 74; soit :: 2,1 : 1.

La conséquence logique de ce fait est de donner au rail une forme telle que les fibres extrêmes, travaillant par compression, soient plus éloignées du centre de gravité que celles qui travaillent par traction. Or si l'on considère un rail comme un solide porté sur deux appuis et encastré à ses deux extrémités, l'effort d'extension a lieu dans le champignon au droit des appuis, et, dans le pied, au milieu de la portée. Si la fatigue des fibres extrêmes était égale dans les deux positions, il y aurait lieu de placer le centre de gravité exactement au milieu de la hauteur; mais elle est plus grande au droit des appuis qu'au milieu ( $0,148 \cdot \frac{vPa}{I}$  dans un cas, et  $0,125 \frac{vPa}{I}$  dans le second). Il résulte de là que, théoriquement, il y a avantage à rapprocher le centre de gravité du sommet du rail, de telle sorte que les distances au sommet et à la base soient entre elles comme  $\frac{125}{148}$ . On obtiendrait de cette façon l'égalité des fatigues maximum des fibres travaillant par traction au droit de l'appui et au milieu de la portée et on les réduirait au minimum.

Examinons à ce point de vue les types de rails en acier Bessemer usités sur le réseau de la Méditerranée.

Le rail  $PM_2$ , pesant  $38^k,88$  le mètre courant, et ayant 130 millimètres de hauteur, a une section de  $4\,971^{mm^2},8$ ; le centre de gravité est au-dessous du milieu, à  $59^{mm},98$  de la base. La distance maximum à la fibre neutre des fibres travaillant par traction au droit des portées est donc  $70^{mm},02$ , tandis que cette distance n'est que de  $59,98$  pour celles qui travaillent par compression. Ces deux distances sont donc en sens inverse de celles qu'indique la comparaison des résistances de l'acier à la traction et à la compression.

Il est vrai que la fatigue maximum est encore tellement loin de la charge de rupture que cette considération est peu importante. Le moment d'inertie de ce type de rail est  $0,000011185$ . La portée maximum  $a = 0^m,80$ . Les machines pesant au plus 13 tonnes par essieu, on a  $R_{max} = 0,148 \cdot \frac{0,07002 \cdot 0,80 \cdot 6500}{0,000011185} = 4^{kn},82$  par millimètre carré, chiffre bien inférieur à celui qui est généralement accepté même pour le fer.

Le rail PM, grâce à sa large base, à son poids et au grand nombre de traverses qui le supportent (huit par barre de 6 mètres), fournit une voie excellente. Mais on peut se demander si l'on ne pourrait pas conserver à peu près au même degré cet avantage, tout en réduisant notablement le poids de la matière et la quantité des traverses, comme l'a fait le chemin de fer du Nord, qui a diminué jusqu'à 30 kilogrammes le poids de ses rails en acier avec des portées de 1 mètre.

Le rail PLM a 128 de hauteur, 100 millimètres de largeur au pied, 14 millimètres d'épaisseur à l'âme. Sa section est de  $0,0041$ . Il pèse  $34^k,73$  le mètre courant. Le centre de gravité est à  $65^{mm},05$  de la base et à  $62,95$  du haut du champignon. Le rapport de ces deux longueurs est de  $0,9677$ , un peu plus grand que le rapport  $\frac{125}{148}$  ou  $0,8446$ . Le moment d'inertie de ce type de rail  $I = 0,0000889$ ; la

fatigue maximum pour  $a = 1$ ,  $P = 6500$  est égale, au droit des appuis, à  $0,148 \cdot \frac{6500 \cdot 0,06505}{0,00000889} = 7^k,04$ , et elle est

supportée par compression. La fatigue maximum des fibres travaillant par traction est de  $0,148 \cdot \frac{6500 \cdot 0,06295}{0,00000889}$  ou

$6^k,67$  au droit des appuis et de  $0,125 \cdot \frac{6500 \cdot 0,06505}{0,00000889}$  ou

$5^k,94$  au milieu de la portée. La différence entre ces deux efforts est faible; la position du centre de gravité est donc favorable. Avec des portées de  $0,80$ , la fatigue maximum des

fibres travaillant par traction  $= 0,148 \cdot \frac{6500 \cdot 0,80 \cdot 0,06295}{0,00000889}$

$= 5^k,54$ . Ainsi, eu égard aux différences des résistances de l'acier par traction et par compression, le rail PLM, bien moins pesant que le rail PM, travaille dans des conditions presque aussi bonnes que ce dernier.

Dans le rail Moktâ, le centre de gravité étant à très-peu près au milieu de la hauteur, la différence entre les efforts par traction des fibres extrêmes au droit de la portée et au milieu est loin d'être négligeable. Elle est de  $7^{kil},164$  au droit de la portée, de  $6^{kil},122$  au milieu. Pour arriver à l'égalité de fatigue, il faudrait que le centre de gravité fût à une distance de la base égale à  $90 \cdot \frac{148}{275} = 48^{mm},79$ .

Nous avons étudié le profil d'un rail en acier ayant le même poids que le rail Moktâ et présentant une résistance supérieure par suite d'une meilleure utilisation du métal.

Il est représenté *fig. 2, Pl. VII*. Ses dimensions générales sont :

Hauteur. . . . .	98
Épaisseur du champignon. . . . .	48
Épaisseur de l'âme. . . . .	11
Largeur du patin. . . . .	75

La section est de  $2.595^{mm^2},240$ , le poids par mètre courant pour la densité de  $7,82$  est de  $20^{kil},295$ . Le centre de gravité est situé à  $51^{mm},13$  de la base. Le rapport des distances des fibres extrêmes au centre de gravité

$\frac{v}{v'} = \frac{51,13}{46,87} = 1,091$ . Pour avoir l'égalité des efforts par

extension dans la partie située au droit des appuis et dans la partie située au milieu de la portée, il faudrait que l'on

eût  $\frac{v}{v'} = \frac{148}{125} = 1,184$  ou  $v = 53^{mm},116$   $v' = 44^{mm},88$ . Ce

résultat ne pouvait être obtenu qu'en affaiblissant le pied outre mesure. Du reste, la différence est faible et le rap-

port  $\frac{v}{v'}$  se rapproche suffisamment du nombre théori-

que  $1,184$ .

Le moment d'inertie du rail  $= 0,00000316078$ .

$$\text{Le rapport } \left\{ \begin{array}{l} \frac{v}{I} = \frac{5113 \cdot 10^6}{316078} = 16176, \\ \frac{v'}{I} = \frac{4687 \cdot 10^6}{316078} = 14828. \end{array} \right.$$

Le tableau suivant donne la comparaison des efforts maxima supportés par les fibres extrêmes du type de rail étudié et du type Moktâ, soit au droit des appuis, soit au milieu de la portée, en supposant celle-ci égale à  $0,72$  (a) et la charge mobile de  $3922^{kil},5$  (P.).

	$\frac{v}{I}$	$\frac{v_1}{I}$	I	EFFORT MAXIMUM d'extension par millimètre carré		EFFORT MAXIMUM de compression par millimètre carré	
				au droit des appuis	au milieu de la portée	au droit des appuis	au milieu de la portée
				$0,148 \frac{VPa}{I}$	$0,125 \frac{VPa}{I}$	$0,148 \frac{VPa}{I}$	$0,125 \frac{V_1Pa}{I}$
Rail Moktâ.	17,342	17,128	0,0000026109	kilog. 7,164	kilog. 6,122	kilog. 7,249	kilog. 6,046
Rail modifié.	16,176	14,828	0,00000316078	6,198	5,724	6,721	5,235

L'effort maximum d'extension supporté par les fibres extrêmes du nouveau type de rail est donc inférieur de près d'un kilogramme par millimètre carré à celui du rail Moktâ. La charge statique que le premier pourrait supporter avec le même effort maximum d'extension que le second serait de 4.531 kilog., soit 1.217 kilog. de plus par essieu.

Des expériences à la flexion et au choc ont été faites à l'usine de Bességes. Les premières ont été opérées sur des barres de 5<sup>m</sup>,50, placées sur des appuis espacés de 1 mètre, au moyen de la machine dite du chemin de fer de Lyon. Après la rupture l'une des moitiés était placée sur deux appuis espacés de 1<sup>m</sup>,10 et supportés par un enclume du poids de 10.000 kilog.; elle était soumise au choc d'un mouton de 200 kilog. tombant d'une hauteur variable. On voit par les chiffres contenus dans le tableau ci-joint que la rupture à la flexion a eu lieu sous des charges variant de 18 à 31 tonnes, la charge moyenne de rupture étant de

23<sup>t</sup>,1. Si la formule  $R_{\max.} = 0,25 \cdot \frac{Pva}{I}$ , établie pour les

charges qui ne produisent pas de déformation permanente, était encore applicable au moment de la rupture, elle donnerait pour l'effort de rupture 94<sup>kil</sup>,13 par millimètre carré sur les fibres les plus fatiguées. Pour la charge minimum de 18 tonnes, l'effort serait de 73<sup>kil</sup>,28 par millimètre carré, et pour la charge maximum de 31 tonnes, de 126<sup>t</sup>,10.

Toutes les épreuves n<sup>os</sup> 1 à 15 ont été faites sur des parties de rail non encochées. Les épreuves n<sup>os</sup> 1', 1'' et 3' ont été faites sur les mêmes barres que les épreuves n<sup>os</sup> 1 et 3, mais en plaçant au milieu de la portée la partie encochée. Les flèches restent sensiblement les mêmes que pour les barres non encochées, jusqu'aux charges de 14 tonnes. Mais la charge de rupture est toujours plus faible qu'avec les rails non encochés. Elle descend à 16 tonnes pour le rail n<sup>o</sup> 1 qui, non encoché, ne rompt qu'à 23 tonnes et à 18 tonnes, au lieu de 23 tonnes pour le rail n<sup>o</sup> 3.

Dans le tableau des épreuves à la flexion, la troisième colonne de chaque numéro donne le coefficient d'élasticité

E calculé d'après la formule  $f = \frac{1}{48} \frac{Pa^3}{EI}$  dans laquelle  $f$

représente la flèche. Ces calculs, comme ceux qui ont servi à déterminer la fatigue maximum R, ne donnent évidemment qu'une indication assez vague, puisqu'ils supposent que l'on peut appliquer au métal déjà déformé des formules établies pour de faibles efforts moléculaires.

Les déformations persistantes sensibles, correspondant à des flèches permanentes de 0<sup>mm</sup>,5 et au-dessus ne commencent en général qu'au delà des charges de 10.000 kilogrammes, correspondant à une fatigue maximum des fibres extrêmes de 40<sup>k</sup>,73 par millimètre carré.

Jusqu'à l'établissement d'une flèche permanente, le coefficient d'élasticité est en moyenne de 1,56 et ne s'écarte pas sensiblement de ce chiffre. Quand les flèches permanentes sont comprises entre 0<sup>mm</sup>,1 et 7<sup>mm</sup>,8, le coefficient d'élasticité est en moyenne de 1,78.

Les flèches sont rarement proportionnelles aux charges; ordinairement elles diminuent plus vite que celles-ci n'augmentent.

Dans le tableau des épreuves au choc, les lettres H et B indiquent les parties de rail correspondant à la partie supérieure ou à la partie inférieure des lingots d'acier.

Sur dix-huit épreuves, il y eut une rupture avec une hauteur de chute de 1<sup>m</sup>,50, deux sous une hauteur de 2 mètres, six sous une hauteur de 2<sup>m</sup>,50, une sous une hauteur de 5 mètres; enfin trois des barres ont résisté sous une hauteur de chute de 3<sup>m</sup>,50.





## ÉPREUVES A LA FLEXION.

( Rails encochés. )

CHARGES.	N° 1'		N° 1''		N° 3'	
	FLÈCHES		FLÈCHES		FLÈCHES	
	M'	P	M	P	M	P
3 000	1,5	0,0	1,5	0,0	1,8	0,0
4 000	1,7	0,0	1,8	0,0	1,9	0,2
5 000	1,7	0,0	2,0	0,2	2,4	0,2
6 000	2,4	0,0	2,2	0,2	2,5	0,2
7 000	2,6	0,0	2,8	0,2	3,0	0,2
8 000	3,0	0,1	3,2	0,3	3,3	0,2
12 000	5,1	0,6	4,0	0,5	3,8	0,9
14 000	5,9	1,1	4,0	0,5	3,8	0,9
	Cassé 16"		Cassé 16"		Cassé 18"	

Les essais n° 1' et 1'' ont été faits sur la même barre que l'essai n° 1; l'essai n° 3' sur la même barre que l'essai n° 5.

## ÉPREUVES AU CHOC.

HAUTEURS de chute du mouton.	N° 4		N° 5		N° 6		N° 7		N° 8		N° 9		N° 10		N° 11		N° 12	
	FLÈCHES		FLÈCHES		FLÈCHES		FLÈCHES		FLÈCHES		FLÈCHES		FLÈCHES		FLÈCHES		FLÈCHES	
	H	B	H	B	H	B	H	B	H	B	H	B	H	B	H	B	H	B
0,80	5	6	4	4	8	8	6	7	8,5	6,5	5	6	4,5	0,5	4,5	4	7	7
1,00	12	12	8	9	16,5	15	13	14	16	15	13	15	11	12	9	8	14	17
1,	19	20	13	13	27	21,5	19	20	26,5	24	19	20	18	19	12	»	25	23
1,50	30	»	16,5	Cassé	40	29	32	29,5	34,5	31	29	30	27	11	17,4	»	38	30
1,75	»	Cassé	»	»	»	38	»	»	»	»	»	»	»	»	»	Cassé	»	»
2,00	Cassé	»	Cassé	»	Cassé	48	»	»	»	»	»	»	»	Cassé	Cassé	»	»	45
2,50	»	»	»	»	Cassé	»	Cassé	Cassé	»	»	»	Cassé	Cassé	»	»	Cassé	Cassé	»
300	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	Cassé
3,50	»	»	»	»	»	»	Résisté	»	»	»	Résisté	Résisté	»	»	»	»	»	Cassé

Les numéros de ce tableau correspondent à ceux du tableau précédent.

*Éclisses.* — Les éclisses ont la forme indiquée par la *fig. 1*, Pl. VII. Elles ont 388 millimètres de longueur, 55 millimètres de hauteur, 13 millimètres d'épaisseur. Elles sont percées de quatre trous ovoïdes, dont les centres sont à 46 millimètres et 136 millimètres des extrémités. Les trous ont 23 millimètres dans le sens horizontal et 17 millimètres dans le sens vertical; elles pèsent 1<sup>k</sup>,950. Elles sont en fer et ont été payées 250 francs la tonne en gare de Bességes. On a adopté sans modification le type des éclisses du chemin de fer de Mokta el Hâdid.

Le moment d'inertie de l'éclisse  $I' = 0,00000012691$ ,  
la demi-hauteur  $V' = 0,0265$ ,  
d'où  $\frac{V'}{2I'} = \frac{265 \cdot 10^6}{2538} = 102586$ .

Pour les rails, on a vu que  $\frac{V}{I} = \frac{4528 \cdot 104}{2611} = 17342$ .

Le rapport de ces deux quantités  $\frac{102586}{17342} = 5,91$ , et est supérieur à celui qui est admis sur la plupart des chemins de fer.

La portée de joint étant de 0<sup>m</sup>,60, le travail du métal des fibres extrêmes du rail, au droit de la portée, et en supposant l'encastrement des deux bouts, serait de 0,148.3922.0,60.17342 ou 6<sup>k</sup>,054 par millimètre carré. Le travail de l'éclisse serait donc 6<sup>k</sup>,054.5,91 ou 35<sup>k</sup>,779, chiffre qui n'est évidemment jamais atteint, car il dépasse la charge de rupture du fer, et l'on n'a jamais eu à Ergastiria d'éclisses cassées en service. Si l'on suppose que le rail agisse comme un solide posé sur deux appuis et encasté au droit de l'un d'eux, le travail de la section non encastée est nul. En réalité, la fatigue de l'éclisse est intermédiaire entre celles qui résultent de l'une et de l'autre de ces hypothèses, à cause de la flexibilité des appuis.

Quoi qu'il en soit, les éclisses Ergastiria sont trop

faibles; il eût été préférable de les faire en acier Bessemer, d'augmenter leur équarrissage, de réduire la portée de joint à 0<sup>m</sup>,50 environ et peut-être de placer le joint en porte-à-faux. Toutefois, avec les courbes si roides du chemin de fer, le joint en porte-à-faux présente l'inconvénient de faire travailler les éclisses dans le sens horizontal, et nous pensons que, somme toute, il vaut mieux le conserver appuyé.

La *fig. 2*, Pl. VII, représente l'éclisse du rail de 20 kilogrammes modifié. Elle a 15 millimètres d'épaisseur au milieu, 19 millimètres d'épaisseur vers l'extrémité, 64 millimètres de hauteur. Sa section est de 1.026<sup>mm</sup>,94. La longueur étant de 0<sup>m</sup>,338, le poids de l'éclisse en acier, non percé, serait de 1.026,94.0,338.7,82 ou 3<sup>k</sup>,116. Le poids de la pièce percée de quatre trous de mêmes dimensions que ceux de l'éclisse Mokta est de 2<sup>k</sup>,972.

Le moment d'inertie  $I' = 0,000000340782$ ,

Le rapport. . . . .  $\frac{V'}{2I'} = 46951$ .

Pour le rail. . . . .  $\frac{V}{I} = 16176$ .

Le rapport de ces deux quantités  $\frac{V'}{2I'} = 2,90$ , et est

très-favorable.

Dans l'hypothèse de l'encastrement absolu, l'effort maximum des fibres extrêmes du rail au droit des appuis d'une portée de joint serait de 0,148.3922,5.0,60.16176 ou 5<sup>k</sup>,634 par millimètre carré.

La fatigue maximum des fibres de l'éclisse serait de 5,634.2,90 ou 16<sup>k</sup>,34. Ce chiffre de 16<sup>k</sup>,34 est un maximum qui ne serait jamais atteint, de sorte que les éclisses de ces dimensions donneraient toute sécurité.

Le travail du métal est un peu moindre dans les éclisses

du chemin de la Méditerranée. La portée de joint est seulement de 0,60 et celui-ci est en porte-à-faux.

L'éclisse est la même pour les types PM et PLM. Elle est en acier Bessemer et a 84 millimètres de hauteur, 18 millimètres d'épaisseur au milieu, 21 aux extrémités.

Son moment d'inertie  $I' = 0,0000073815$ .

Le rapport. . . . .  $\frac{V'}{2I'} = 28455$ .

Pour le rail PM<sub>2</sub> on a  $I = 0,000011185$ .

$$V = 70,02,$$

$$\frac{V}{I} = 62,60.$$

Le rapport  $\frac{V'}{2I'} = 4,545$ . Le travail du métal dans le rail au milieu de la portée est 0,125 . 0,60 . 6500 . 6260 ou 3<sup>k</sup>,05 par millimètre carré.

Le travail du métal dans l'éclisse serait de 13<sup>k</sup>,86.

Avec le rail PLM (A), on a  $I = 0,00000889$ ,

$$V = 65,05,$$

$$\frac{V}{I} = 7317,$$

$$\frac{V'}{2I'} = 5,889.$$

L'effort moléculaire maximum dans le rail est

0,125 . 0,6 . 6500 . 7317 ou 5<sup>k</sup>,57 par millimètre carré.

La fatigue maximum de l'éclisse est de

$$5,57 \times 3,889 = 13<sup>k</sup>,87,$$

chiffre égal à celui que nous avons trouvé pour l'éclisse du rail PM<sub>2</sub>.

*Boulons.* — Les boulons ont un diamètre de 15 millimètres, une longueur totale de 78; la partie filetée a 35 millimètres. Ils portent près de la face intérieure de la tête un ergot destiné à empêcher qu'ils ne tournent pendant le serrage. L'écrou est hexagonal; il a 16 millimètres de hauteur. Les boulons avec leur écrou et leur rondelle pèsent 225 grammes. Ils ont coûté 617<sup>f</sup>,50 la tonne rendus en gare à Marseille, goudronnés et emballés.

Le rail porte deux trous d'éclisse dont le diamètre est de 24 millimètres et dont les centres sont placés à 56 et à 146 millimètres de l'extrémité de chaque barre. Le diamètre de 24 millimètres est trop fort et pourrait sans inconvénients être réduit à 21 ou 22 millimètres.

La position respective des centres des trous des éclisses et des trous correspondants des rails est établie pour un jeu normal de 4 millimètres entre deux rails contigus.

*Crampons.* — Les crampons (*fig.* 4 et 5, Pl. VII) sont carrés; ils ont 148 millimètres de hauteur et 12 millimètres de côté. Ils sont taillés en biseau à l'extrémité inférieure. Ils pèsent 195 grammes et ont coûté 56<sup>f</sup>,50 les 100 kilogrammes, goudronnés et emballés, en gare de Bességes.

Pour empêcher le cheminement longitudinal des rails, on a pratiqué dans le pied quatre encoches disposées symétriquement et placées sur les barres de 5<sup>m</sup>,50 à 0<sup>m</sup>,58 et à 2<sup>m</sup>,01 de chaque extrémité, sur les barres de 5 mètres à 0<sup>m</sup>,58 et 1<sup>m</sup>,87, sur les barres de 4<sup>m</sup>,50 à 0<sup>m</sup>,52 et 1<sup>m</sup>,92 des extrémités. Leur profondeur était de 10 millimètres. On n'a jamais remarqué de tendance au cheminement, et nous croyons que l'on eût pu sans inconvénients réduire à deux le nombre des encoches. Comme elles affaiblissent notablement le rail, il eût mieux valu ne leur donner que 7 millimètres de profondeur.

*Selles et demi-selles.* — Les courbes du chemin étant extrêmement roides, on a cru utile, pour assurer la soli-

clarté des crampons et par suite empêcher l'élargissement de la voie, de placer sur les traverses de joint et sur celle du milieu, des selles et demi-selles; elles ont 6 millimètres d'épaisseur. Les selles ont 185 millimètres sur 200, et pèsent 1<sup>k</sup>,26. Elles sont percées de quatre trous pour le passage des crampons. Les demi-selles ont 185 millimètres sur 150 et pèsent 0<sup>k</sup>,970; elles sont percées de deux trous. Les trous ont 14 millimètres de côté. Elles ont coûté 28 francs les 100 kilogrammes en gare de Bességes.

Un assez grand nombre de selles se sont rompues en service dans les courbes de petit rayon. Il conviendrait donc d'augmenter leur épaisseur, et même de les faire en acier.

#### § 8. — Traverses.

Les traverses sont en chêne, équarries. Leurs dimensions sont :

	Longueur.	Largeur.	Épaisseur.
Pour les traverses intermédiaires.	1 <sup>m</sup> ,60	0 <sup>m</sup> ,18	0 <sup>m</sup> ,12
Pour les traverses de joint. . . . .	1,60	0,21	0,12

Elles ont été achetées à Trieste et ont coûté en moyenne 2<sup>f</sup>,952, rendues à Ergastiria.

Il y a huit traverses par barre de 5<sup>m</sup>,50. Leurs écartements sont :

0,60, 0,71, 0,72, 0,72, 0,72, 0,72, 0,71, 0,60.

Ainsi que nous l'avons dit plus haut, cette disposition est défectueuse. Il eût été préférable d'adopter un écartement de 0,74 pour les portées intermédiaires et de 0,55 pour les portées de joint. Avec une portée de 0<sup>m</sup>,74, la fatigue du métal dans le rail serait de 6<sup>k</sup>,78 par millimètres carré, et sur le joint, là où l'éclisse travaille, de 4<sup>k</sup>,85. — Avec le rail modifié, ces efforts seraient respectivement de 5<sup>k</sup>,61 et 4<sup>k</sup>,018.

Avec les barres de 5 mètres de longueur, on a mis huit traverses espacées de

0,60, 0,60, 0,65, 0,65, 0,65, 0,65, 0,60, 0,60.

Avec les barres de 4<sup>m</sup>,50, il y en a sept, espacées de

0,60, 0,64, 0,66, 0,70, 0,66, 0,64, 0,60.

Il eût été préférable de disposer les portées comme il suit :

Barres de } 5 mètres.	0,50, 0,66, 0,66, 0,70, 0,66, 0,66, 0,66, 0,50.
Barres de } 4 <sup>m</sup> ,50.	0,50, 0,70, 0,70, 0,70, 0,70, 0,70, 0,50.

*Entailles.* — Les entailles ont la largeur du patin (75 millimètres). L'inclinaison du rail étant de  $\frac{1}{12}$ , elles ont d'un côté 5 millimètres, de l'autre 11<sup>mm</sup>,25 de profondeur.

Les trous des crampons sont percés ronds avec 13 millimètres de diamètre et 105 millimètres de profondeur. Ils ne sont pas placés sur l'axe longitudinal de la traverse, mais à 15 millimètres de part et d'autre de ce dernier. Les traverses de joint portent quatre crampons; les axes des trous sont à 35 et 60 millimètres de part et d'autre de l'axe de la traverse.

Les traverses se sont très-bien comportées jusqu'ici malgré le climat. Toutes sont encore en bon état; les crampons y sont encore solidement fixés. On n'a eu depuis deux ans à changer que quelques traverses de joint, qui presentaient déjà des défauts au moment de la pose.

#### § 9. — Détails de la voie.

*Jeu de la voie.* — En alignement droit, la voie a 1 mètre de bord en bord des rails ou 1<sup>m</sup>,048 d'axe en axe. Le jeu est de 22 millimètres pour les roues des wagons, de 26 millimètres pour celles des locomotives dont les mentonnets

sont un peu plus minces. En courbe, on a augmenté l'écartement de 6 millimètres, de sorte que le jeu est porté à 28 millimètres pour les wagons et à 30 pour les machines.

*Dévers.* — Le dévers doit nécessairement être considérable dans des courbes d'un rayon aussi faible que celui qui a été admis sur le chemin d'Ergastiria. Il a eu effet pour objet, non pas seulement de s'opposer à la force centrifuge, mais encore et surtout de faciliter le mouvement des véhicules en courbe en ramenant constamment vers le centre de la courbe celle des roues d'avant qui attaque le rail extérieur plus élevé. On a adopté pour le calcul du dévers la formule  $\frac{V}{R}$ , admise sur le réseau de la Méditerranée, mais en réduisant aux  $\frac{2}{3}$  les résultats obtenus, pour tenir compte de la différence de largeur des voies (1 mètre au lieu de 1<sup>m</sup>,45). Dans cette formule V est supposé égal à 20. Les dévers calculés ainsi pour les diverses courbes sont les suivantes :

RAYONS. mètres.	DÉVERS. mètres.
200. . . . .	0,067
150. . . . .	0,089
140. . . . .	0,095
120. . . . .	0,111
100. . . . .	0,155
90. . . . .	0,148
80. . . . .	0,167
70. . . . .	0,190
60. . . . .	0,222

Ces surélévations étant considérables ont été réparties sur des courbes de raccordement suivant la méthode indiquée par M. Couche (*Exploitation des chemins de fer*, t. I, p. 252), en faisant  $\frac{1}{2} = 200$ .

Sur certains points de la première section, les alignements droits qui séparent les courbes et contre-courbes successives de 60 mètres de rayon n'ont que 25 mètres de

longueur. Le déplacement du point de tangence pour le rayon de 60 étant de 18<sup>m</sup>,61, il a fallu nécessairement le réduire à 11 mètres au plus afin de laisser 3 mètres au moins d'alignement entre les origines des courbes de raccordement opposées. Dans ce cas  $\frac{1}{2}$  doit être réduit à  $\frac{1}{124}$  au lieu de  $\frac{1}{200}$ . Malgré la petitesse de la plupart des rayons, l'entrée en courbe, grâce à cet artifice, est très-douce et se fait sans secousses et sans grippements.

Le dévers est réparti entre les deux rails, c'est-à-dire que la moitié est portée en surhaussement sur le rail extérieur et l'autre moitié en surbaissement sur le rail intérieur.

On a reconnu plus tard en service que les dévers de 0,222 et 0,19 pour les courbes de 60 et de 70 mètres étaient trop considérables : les deux soutes à eau de la machine communiquant l'une avec l'autre, le liquide se reportait sur celle d'entre elles qui se trouvait du côté intérieur de la courbe ; il en résultait sur les ressorts de suspension une inégalité d'efforts considérable, aussi nuisible à la conservation des bandages et de la voie qu'à la bonne marche du mécanisme. Le fléchissement était tel que la face inférieure des têtes de bielle touchait le ballast. On réduisit alors à 0<sup>m</sup>,160 tous les dévers qui dépassaient ce chiffre ; de cette façon, les inconvénients signalés ci-dessus disparurent.

Les rails étaient cintrés avant la pose. Les flèches correspondant aux divers rayons de courbes et aux trois longueurs de barres sont données par le tableau ci-joint :

RAYONS des courbes.	FLÈCHES DES BARRES DE		
	5 <sup>m</sup> ,50	5 <sup>m</sup> ,00	4 <sup>m</sup> ,50
mètres.	millimètres.	millimètres.	millimètres.
60	62	52	42
70	54	45	36
80	47	39	31
90	42	35	28
100	38	31	25
125	30	25	20
150	25	21	17

Le cintrage était effectué au moyen d'un cric sur des points espacés de mètre en mètre. Il s'est produit pendant l'opération plusieurs ruptures de barres; toutes ont eu lieu au droit des encoches.

L'obligation qu'on s'était imposée de mettre les joints sur les traverses a nécessité l'emploi d'un certain nombre de barres un peu plus courtes que les barres ayant la longueur normale de 5<sup>m</sup>,50. La sous-longueur est de 5<sup>m</sup>,40. Le rail extérieur est toujours composé de barres de 5<sup>m</sup>,50. Le rail intérieur est formé de barres de 5<sup>m</sup>,50 et de 5<sup>m</sup>,40 alternant dans les proportions indiquées par la colonne n° 4 du tableau ci-joint.

Par exemple, étant donnée une courbe de 60 mètres de rayon, la file de rails intérieure est formée comme suit :

Cinq barres de. . . . .	5,40
Une barre de. . . . .	5,50
Dix barres de. . . . .	5,40
Une barre de. . . . .	5,50
Dix barres de. . . . .	5,40
Une barre de. . . . .	5,50

et ainsi de suite pour finir par cinq barres de 5<sup>m</sup>,40.

(1) RAYON des courbes.	(2) RAPPORT des longueurs de l'arc extérieur et de l'arc intérieur.	(3) RAPPORT du nombre des barres de 5 <sup>m</sup> ,50 à l'extérieur et de 5 <sup>m</sup> ,40 à l'intérieur.	(4) MÊME RAPPORT exprimé en nombres entiers.
60	0,9834	1,10	11 pour 10
70	0,9858	1,28	13 pour 10
80	0,9876	1,46	29 pour 20
90	0,9890	1,65	33 pour 20
100	0,9900	1,83	9 pour 5
110	0,9909	2,01	2 pour 1
120	0,9917	2,19	11 pour 5
140	0,9929	2,55	51 pour 20
150	0,9933	2,73	27 pour 10
170	0,9941	3,10	31 pour 10
200	0,9950	3,65	73 pour 20

Les nombres de la colonne (3) étaient obtenus par le calcul suivant :

Appelons R le rayon de la courbe, n le nombre des barres de 5<sup>m</sup>,50 à l'extérieur, n' le nombre de barres de 5<sup>m</sup>,40 à l'intérieur, n'' le nombre de barres de 5<sup>m</sup>,50 à l'intérieur, on a

$$\frac{R - 0,50}{R + 0,50} \cdot n \cdot 5,50 = n' \cdot 5,40 + n'' \cdot 5,50,$$

$$n = n' + n'',$$

$$\text{d'où } \frac{n}{n'} = \frac{0,1}{5,5 \cdot \left(1 - \frac{R - 0,5}{R + 0,5}\right)} = \frac{R + 0,5}{55}.$$

Les barres de 5<sup>m</sup>,50 et 5<sup>m</sup>,40 étaient réservées pour la voie principale. Celles de 5 mètres et de 4 mètres pour les gares et les abords d'Ergastiria. Elles ont été employées séparément en alignement droit et concurremment en courbe, en admettant le joint en porte-à-faux.

#### § 10. — Changements et croisements de voie.

Si l'on appelle R le rayon de la courbe d'un changement de voie simple, e la largeur de la voie, d la longueur du changement,  $\alpha$  l'angle de croisement, on a

$$d = \sqrt{\left[2 \left(R + \frac{e}{2}\right) - e\right] e} = \sqrt{2Re},$$

$$\text{tang } \alpha = \frac{d}{R - \frac{e}{2}} = \frac{\sqrt{2Re}}{R - \frac{e}{2}}.$$

Sur le chemin d'Ergastiria R = 60, e = 1;

par suite d = 10<sup>m</sup>,954,  $\alpha = 10^{\circ} 26'$ .

La longueur de l'aiguille est déterminée par la condition que la distance entre le talon et le rail contre-aiguille soit égale à l'épaisseur des mentonnets 0,050 augmentée du

jeu de 0,022. L'épaisseur du rail étant de 0,048, la longueur de l'aiguille de la voie déviée

$$l = \sqrt{2 \left( R + \frac{e}{2} \right) (0,052 + 0,048)} = \sqrt{12,1} = 3^m,478,$$

celle de l'aiguille de la voie droite

$$l = \sqrt{2 \left( R - \frac{e}{2} \right) \cdot 0,1} = \sqrt{11,9} = 3^m,450.$$

On a fait

$$l = 3^m,60.$$

Les longueurs rabotées sont de 2<sup>m</sup>,265 pour le patin et de 1<sup>m</sup>,820 pour le champignon. Ce rabotage a été payé 20 francs par aiguille.

Les rails contre-aiguilles ont 4<sup>m</sup>,50 de longueur ; ils sont établis sur neuf traverses ayant 0<sup>m</sup>,22 de largeur, 0<sup>m</sup>,12 d'épaisseur et 1<sup>m</sup>,90 de longueur ; les portées intermédiaires sont de 0<sup>m</sup>,60, les portées de joint ont 0<sup>m</sup>,40 du côté de la pointe de l'aiguille et 0<sup>m</sup>,50 du côté du talon. Il y a douze coussinets de glissement pesant chacun 10<sup>k</sup>,250. Ils sont fixés sur les traverses au moyen de tirefonds ayant 19 millimètres de diamètre et 100 de hauteur, pesant 250 grammes et coûtant 62<sup>f</sup>,75 les 100 kilogrammes.

Voici le détail du poids et du prix des diverses pièces du changement de voie :

	POIDS.	PRIX	PRIX.
		aux 100 kilog.	
2 tringles de connexion et leurs pattes. . . . .	14 <sup>k</sup> ,30	120 <sup>f</sup> ,00	17 <sup>f</sup> ,16
2 platines de talon. . . . .	41,20	30,00	12,36
12 coussinets de glissement. . . . .	123,00	25,00	30,75
1 tringle de commande. . . . .	7,60	120,00	9,12
1 marmite et son levier (fonte). . . . .	56,00	80,00	44,80
1 contre-poids. . . . .	20,00	30,00	6,00
1 levier de contre-poids. . . . .	6,80	250,00	17,00
12 boulons de coussinet de glissement. . . . .	5,00	130,00	6,50
10 pattes de tringles de connexion et de commande. }			
A reporter. . . . .			143 <sup>f</sup> ,69

	POIDS.	PRIX.	PRIX.
		aux 100 kilog.	
Report. . . . .			143 <sup>f</sup> ,69
6 amarres en fer des rails sur les platines de talon. . . . .	5 <sup>k</sup> ,60	45 <sup>f</sup> ,00	2,52
4 vis à bois reliant les traverses de support. . . . .	2,60	120,00	3,12
2 aiguilles. { Acier employé, 150 kil. à 22 <sup>f</sup> ,074, 33 <sup>f</sup> ,11	}	}	73,11
{ Façon, 20 fr. par pièce. . . . .			
2 contre- { Acier employé, 101 <sup>k</sup> ,50 à 22 <sup>f</sup> ,074, 22 <sup>f</sup> ,40	}	}	46,40
{ aiguilles. { Façon, 12 fr. par pièce. . . . .			
52 tirefonds. . . . .	13,00	62,75	8,16
10 traverses à 2 <sup>f</sup> ,952. . . . .	"	"	29,52
1 support du levier. . . . .	"	"	6,00
Ensemble. . . . .			311 <sup>f</sup> ,52

*Croisement.* — La pointe est formée de deux bouts de rails ayant, l'un 1<sup>m</sup>,90, l'autre 1<sup>m</sup>,58 de longueur, assemblés par trois boulons suivant deux parties dressées. Les rails ayant une inclinaison de  $\frac{1}{12}$ , et le patin de la pointe étant horizontal, le rail qui forme cette dernière doit être légèrement tordu à son extrémité, de manière à donner l'horizontalité du pied (\*).

La longueur développée des pattes de lièvre et des contre-rails est de 2<sup>m</sup>,49.

L'ensemble du système est porté par douze traverses de 1<sup>m</sup>,95 sur 0<sup>m</sup>,21, lesquelles sont reliées entre elles par deux pièces de support de 2<sup>m</sup>,60 de longueur, assemblées à mi-bois.

Voici le détail des prix du croisement :

	POIDS.	PRIX	PRIX.
		aux 100 kilog.	
6 cales entre rails et contre-rails. . . . .	16 <sup>k</sup> ,000	30 <sup>f</sup> ,00	4 <sup>f</sup> ,80
5 cales entre la pointe et les pattes de lièvre. . . . .	14,400	30,00	4,32
A reporter. . . . .			9 <sup>f</sup> ,12

(\*) Les ateliers de Bességes ont fait pour le chemin de fer de Monteponi (voie d'un mètre) des pointes en acier Bessemer martelé, assemblées au moyen de deux boulons avec les deux rails convergents par une sorte de queue d'hironde formant cale. Elles font, dit-on, un très-bon service. Elles pèsent 50 kilog. et ont coûté (en 1870) 90 francs les 100 kilog. A ce prix, elles sont plus économiques que les pointes formées de deux rails assemblés.

	POIDS.	PRIX.	PRIX.
		aux 100 kilog.	
	Report.		
9 boulons desdites cales. . . . .	6 <sup>k</sup> ,000	130 <sup>f</sup> ,00	7 <sup>f</sup> ,80
1 platine en fonte dans les pointes du cœur. . . . .	18 <sup>k</sup> ,000	30 <sup>f</sup> ,00	5 <sup>f</sup> ,40
18 vis à bois de 200 millim. . . . .	19 <sup>k</sup> ,000	120 <sup>f</sup> ,00	10 <sup>f</sup> ,80
149 tirefonds. . . . .	37 <sup>k</sup> ,250	62 <sup>f</sup> ,75	23 <sup>f</sup> ,37
12 traverses à 3 <sup>f</sup> ,25. . . . .	"	"	39 <sup>f</sup> ,00
2 traverses de support à 6 francs. . . . .	"	"	12 <sup>f</sup> ,00
2 rails pour la pointe. {	Acier employé, 81 <sup>k</sup> ,2 à 22 <sup>f</sup> ,074 p. 100.	" "	57 <sup>f</sup> ,92
	17 <sup>f</sup> ,92		
	Façon. . . . .		40 <sup>f</sup> ,00
2 pattes de lièvre. {	Acier employé, 101 <sup>k</sup> ,5 à 22 <sup>f</sup> ,074 p. 100.	" "	52 <sup>f</sup> ,40
	22 <sup>f</sup> ,40		
	Façon. . . . .		30 <sup>f</sup> ,00
2 contre-rails. {	Acier employé, 101 <sup>k</sup> ,5 à 22 <sup>f</sup> ,074 p. 100.	" "	46 <sup>f</sup> ,40
	22 <sup>f</sup> ,40		
	Façon. . . . .		24 <sup>f</sup> ,00
Total. . . . .			264 <sup>f</sup> ,21

Ensemble pour un croisement et un changement de voie, tout compris, moins la pose. . . . . 575<sup>f</sup>,73

Le nombre des changements et croisements, pour tout le chemin, est de quinze.

#### § 11. — Plaques tournantes.

Trois plaques tournantes pour les wagons ont été placées sur les embranchements des fours. Leur diamètre est de 2<sup>m</sup>,25; la longueur utile des rails qu'elles supportent est de 1<sup>m</sup>,97. L'écartement des essieux étant de 1<sup>m</sup>,45, le diamètre des roues de 0<sup>m</sup>,60, la saillie des boudins de 0<sup>m</sup>,028, la longueur nécessaire pour que ceux-ci échappent pendant la manœuvre aux bouts des rails fixes, est de  $1,45 + 2\sqrt{0,028(0,656 - 0,028)} = 1<sup>m</sup>,714$ . Le jeu est donc de 0<sup>m</sup>,256, soit 0<sup>m</sup>,128 de chaque côté.

Les plaques sont en fonte; elles sont portées sur dix galets de roulement. Les rails sont formés par deux saillies venues de fonte avec le plateau.

Ces plaques pèsent 2.500 kilogrammes; elles ont coûté, rendues franco à Marseille, 1.068<sup>f</sup>,75.

*Plaques tournantes des machines.* — On avait pensé tout d'abord qu'il serait indifférent de faire circuler les machines sur la ligne, cheminée ou foyer en avant; mais on reconnut bientôt qu'à cause du jeu longitudinal de l'essieu d'avant, la première position était plus avantageuse au point de vue de la circulation dans les courbes de 60 mètres de rayon. On décida alors l'établissement aux deux extrémités de la ligne des plaques représentées *fig. 6, 7 et 8, Pl. VII.* Par suite de circonstances particulières, une seule a été exécutée, de sorte que l'on n'en fait presque pas usage. Elle a été construite à l'atelier de l'usine.

Elle se compose de deux poutres en tôle à double T formées d'une âme de 260 millimètres de hauteur et de 12 millimètres d'épaisseur, de quatre cornières de 70 de côté et de 9 millimètres d'épaisseur, et de deux plaques couvre-joint de 152 millimètres de largeur et de 8 millimètres d'épaisseur. Ces poutres sont soutenues par quatre galets de 0<sup>m</sup>,25 de diamètre, placés extérieurement. Une forte pièce en fonte, reliée aux longrines par quatre gros boulons, porte les coussinets en bronze qui reçoivent l'axe des galets. Pour combattre les effets du porte-à-faux, les extrémités des longrines sont réunies deux à deux par des entretoises.

Le cercle de roulement est formé par un rail circulaire; son diamètre est de 2<sup>m</sup>,50.

La cuve est en maçonnerie. L'arête circulaire supérieure est garnie d'un fer cornière.

La crapaudine est fixée par quatre forts crampons sur une pierre de fondation. Le rail circulaire sur lequel roulent les galets repose sur une charpente formée d'une couronne polygonale et de quatre croisillons.

Le diamètre de la plaque est de 2<sup>m</sup>,925; la longueur utile des rails de 2<sup>m</sup>,72. L'empattement des machines est

de 2<sup>m</sup>,20, le diamètre des roues de 0<sup>m</sup>,90, la saillie des boudins de 0<sup>m</sup>,037; la longueur nécessaire pour que les boudins échappent est de 2<sup>m</sup>,566. Le jeu est donc seulement de 0<sup>m</sup>,154, auxquels il faut ajouter l'espace libre entre la plaque et le bord supérieur de la cuve, 0<sup>m</sup>,025; en tout 0<sup>m</sup>,179. Ce chiffre est un peu trop faible; aussi les manœuvres sont-elles difficiles, et il faut beaucoup d'attention de la part des mécaniciens pour arrêter la machine exactement à la position qu'elle doit occuper pour que la plaque puisse tourner.

#### Résumé des dépenses d'établissement de la voie.

Nous pouvons maintenant donner le résumé des dépenses de premier établissement de la voie et du matériel fixe. La longueur de la voie principale, y compris les embranchements, est de 9.200 mètres; celle des voies de garage et d'évitement est de 900 mètres; la longueur totale des voies est donc de 10.100 mètres.

NATURE DES DÉPENSES.	DÉPENSES partielles.	DÉPENSES totales par article.	DÉPENSES par kilomètre de voie principale.	DÉPENSES par kilomètre de voie.
<b>1° Terrassements.</b>				
(Environ 25.000 mètres cubes à 3 <sup>f</sup> ,795.)				
	francs.	francs.	francs.	francs.
1 <sup>o</sup> Main-d'œuvre. . . . .	82.424,56	»	8.959,20	8.160,85
2 <sup>o</sup> Poudre et mèches. . . . .	6.653,97	»	723,26	658,85
3 <sup>o</sup> Matériel de transport, forges, pioches, pelles, masses, acier, fer, etc. . . . .	5,807,80	»	631,30	575,02
Total des dépenses de terrassement. . . . .	»	94.886,33	10.313,76	9.394,72
<b>2° Souterrain.</b>				
(267 <sup>m</sup> ,50 à 281 <sup>f</sup> ,46 le mètre.)				
1 <sup>o</sup> Percement et travaux accessoires, puits, bara- ques, etc. . . . .	65.757,76	»	»	»
2 <sup>o</sup> Revêtements (têtes comprises). . . . .	5.490,00	»	»	»
3 <sup>o</sup> Matériel (wagons, ventilateurs, forges, acier, etc.	4.042,90	»	»	»
Total des dépenses du souterrain. . . . .	»	75.290,66	8.183,80	7.454,52
<b>3° Ouvrages d'art.</b>				
1 <sup>o</sup> Murs de soutènement et ponts métalliques (à l'usage). . . . .	21.646,70	»	2.352,90	2.143,23
2 <sup>o</sup> Aqueducs, ponts en maçonnerie, murs, quai de Berzekó, fosses à piquer. . . . .	16.371,81	»	1.779,54	1.620,97
Total des dépenses pour ouvrages d'art. . . . .	»	38.018,51	4.132,44	3.764,20
<b>4° Ballastage.</b>				
(Environ 7.000 mètres cubes à 3,09 le mètre cube.)				
1 <sup>o</sup> Main-d'œuvre. . . . .	20.584,80	»	2.237,48	2.038,10
2 <sup>o</sup> Matériaux. . . . .	1.080,00	»	117,40	106,93
Total des dépenses de ballastage. . . . .	»	21.664,80	2.354,88	2.145,03
<b>5° Matériel de voie et pose.</b>				
1 <sup>o</sup> 411 <sup>f</sup> ,200 rails à 258 <sup>f</sup> ,91 (y compris le transport). .	106.463,79	»	11.572,15	10.540,97
2 <sup>o</sup> 7.500 éclisses de 1 <sup>f</sup> ,950 (14 <sup>f</sup> ,625 à 294 <sup>f</sup> ,04, y com- pris le transport). . . . .	4.300,33	»	467,43	425,78
3 <sup>o</sup> 15.000 boulons de 225 grammes (3 <sup>f</sup> ,375 à 647 <sup>f</sup> ,10, transport compris). . . . .	2.183,96	»	237,39	216,23
4 <sup>o</sup> 7.500 selles de 1 <sup>f</sup> ,115 (8 <sup>f</sup> ,362 à 324 <sup>f</sup> ,04, transport compris). . . . .	2.709,62	»	294,52	268,28
5 <sup>o</sup> 66.974 crampons de 0 <sup>f</sup> ,195 (13 <sup>f</sup> ,061 à 609 <sup>f</sup> ,04, transport compris). . . . .	7.954,67	»	864,64	787,59
6 <sup>o</sup> 16.738 traverses à 2 <sup>f</sup> ,932. . . . .	49.075,81	»	5.334,32	4.858,99
7 <sup>o</sup> Pose de la voie. . . . .	15.420,92	»	1.676,19	1.526,82
Total des dépenses de la voie. . . . .	»	188.109,10	20.446,64	18.624,66
A reporter. . . . .	»	»	45.431,52	41.383,13

NATURE DES DÉPENSES.	DÉPENSES	DÉPENSES	DÉPENSES	DÉPENSES
	partielles.	totales par article.	par kilomètre de voie principale.	par kilomètre de voie simple.
	francs.	francs.	francs.	francs.
<i>Report.</i> . . . . .	»	»	45.431,52	41.383,41
<b>6° Passages à niveau, maisons de garde, clôtures.</b>				
1° Maison de garde et baraque. . . . .	831,37	»	»	»
2° 5 barrières de passage à niveau. . . . .	817,51	»	»	»
3° 2.000 mètres de treillage à 0 <sup>m</sup> ,78 (transport compris). . . . .	1.560,00	»	»	»
Total pour l'article 6. . . . .	»	3.209,38	348,85	317,41
<b>7° Matériel fixe.</b>				
1° 14 changements et croisements de voie à 62 <sup>m</sup> ,17 l'un (transport compris). . . . .	8.696,38	»	»	1
2° Réservoirs et conduites d'eau. . . . .	3.240,13	»	»	1
3° Bascule. { Appareil (achat et transport). 1.105,45 Bâtiment et pose. . . . . 1.026,90	2.132,35	»	»	1
4° 3 plaques tournantes pour wagons à 1.128 francs (transport compris). . . . .	3.384,00	»	»	1
5° 1 plaque tournante pour les machines. . . . .	1.900,00	»	»	1
Total pour le matériel fixe. . . . .	19.352,86	19.352,86	2.103,57	1.911,41
<b>8° Frais généraux.</b>				
Frais d'études, direction des travaux pendant la construction (appointements du chef des travaux et des contre-mâtres). . . . .	38.990,00	38.990,00	4.238,04	3.800,00
Total général des dépenses pour la voie.	»	479.521,64	52.121,98	47.483,41

Ainsi, les dépenses totales d'établissement de la voie se sont élevées à 479.521<sup>f</sup>,64, soit 52.121<sup>f</sup>,98 par kilomètre de voie principale, ou 47.477<sup>f</sup>,41 par kilomètre de voie simple. L'infrastructure, y compris le ballast, a coûté 24.984<sup>f</sup>,88 ;

Le matériel de voie proprement dit et la pose, 20.446<sup>f</sup>,64 (18.624<sup>f</sup>,66 par kilomètre de voie simple) ;

Le matériel fixe, maisons de garde, clôtures, 2.103<sup>f</sup>,57 ;  
Les frais généraux 4.258<sup>f</sup>,04.

Ces chiffres sont certainement peu élevés, comparative-ment à ceux qu'eût atteints la construction d'un chemin à grande voie. Grâce aux courbes de petit rayon et aux fortes pentes, et malgré la nature très-accidentée du pays, on a

pu réduire au minimum le cube des terrassements : 25.000 mètres cubes non compris le souterrain, soit 2.709 mètres cubes par kilomètre de voie principale. Sur le chemin de Mondalazac, long de 7 kilomètres et à voie de 1<sup>m</sup>,10, le cube des terrassements s'est élevée à 24.525 mètres cubes soit 5.475 mètres cubes par kilomètre. Les travaux d'art sur la ligne ont été pour la même raison très-peu importants.

Enfin on n'a pas eu à faire à Ergastiria d'acquisition de terrain. La largeur moyenne de l'emprise étant de 7<sup>m</sup>,50, la surface totale occupée est de 6<sup>hect</sup>,5750.

En France, au prix moyen de 3.500 francs l'hectare, on aurait eu de ce chef une dépense de 22.512<sup>f</sup>,50.

Toutefois certaines circonstances locales et le manque absolu de ressources industrielles dans le pays ont augmenté très-notablement les dépenses.

Ainsi les terrassements, faute d'ouvriers expérimentés, ont coûté 3<sup>f</sup>,795 le mètre cube, tandis que dans une contrée civilisée, ils ne seraient pas revenus à plus de 2 francs (ils ont coûté 1<sup>f</sup>,75 à Mondalazac). La diminution eût été de 50.000 francs, soit 5.435 francs par kilomètre.

La traversée du faite par un souterrain long de 267<sup>m</sup>,50 a grevé la construction d'une dépense de 75.290<sup>f</sup>,66 qui eût été probablement plus faible si l'on avait eu de bons mineurs en nombre suffisant, et qui d'ailleurs, répartie sur 8.500 mètres de voie principale, grève lourdement le prix du kilomètre.

La gare de l'usine avec ses murs de soutènement, ses ponts métalliques, ses embranchements et ses plaques tournantes, a nécessité une dépense de 26.273<sup>f</sup>,04 ou 2.847 francs par kilomètre.

L'obligation d'acheter au loin tout le matériel sans exception a exigé des frais de transport considérables atteignant de 38 à 40 francs par tonne. Il est vrai que les fers étaient alors à des prix très-bas. L'augmentation du prix des fers compenserait aujourd'hui, et au delà, pour un

chemin construit en France, les frais de transport qu'on a eu à supporter à Ergastiria.

Enfin il a fallu envoyer de France et à grands frais tout le personnel nécessaire pour faire les études et diriger les travaux, de sorte que les frais généraux ont été très-élevés (4.224<sup>f</sup>,96 par kilomètre).

Si le chemin de fer eût été établi en France, exactement dans les mêmes conditions de tracé, on peut estimer que le prix de revient par kilomètre aurait été le suivant :

Acquisitions de terrain (0 <sup>h</sup> ,75, à 3,500 <sup>f</sup> l'hectare) . . . . .	francs. 2.625,00
Terrassements, 2,709 <sup>m</sup> à 2 <sup>f</sup> . . . . .	5.418,00
Souterrain 250 <sup>f</sup> le mètre courant. . . . .	7.246,57
Ouvrages d'art, y compris la gare (33.000 <sup>f</sup> ). . . . .	5.575,88
Ballastage, 758 <sup>m</sup> ,52 à 2 <sup>f</sup> . . . . .	1.517,04
Passages à niveau, maisons, etc. (2.800 <sup>f</sup> ). . . . .	303,41
(*) Matériel de voie. . . . .	17.774,95
Matériel fixe (plaques tournantes, changements et croisements de voie, réservoirs d'eau, bascule (18.865 <sup>f</sup> ,65). . . . .	2.044,28
Etudes et direction des travaux. . . . .	1.630,00
Total. . . . .	42.135,13

### CHAPITRE III.

#### MATÉRIEL PORTEUR.

##### § 1. — *Caisses.*

Les wagons sont représentés, *fig.* 9 à 12, Pl. VII. Ils ont été construits aux chantiers de la Buire.

Les dimensions intérieures de la caisse sont :

Largeur. . . . .	mètres. 1,700
Longueur. . . . .	3,620
Hauteur des côtés latéraux. . . . .	0,450
Hauteur des côtés d'avant et d'arrière. . . . .	0,700

(\*) On a supposé un transport moyen coûtant 12 francs par tonne en sus du prix de vente aux usines.

Le cube, en ne tenant pas compte du surcroît de hauteur, des côtés d'avant et d'arrière, est de 2<sup>m</sup>,769. Mais grâce à cette surélévation, la charge dépasse de 0,10 en moyenne le haut des côtés latéraux, et occupe un volume de 3<sup>m</sup>,384. Le poids moyen de la charge est de 6 tonnes.

Les côtés extérieurs sont à charnière comme ceux des wagons à ballast. Ils sont tenus par quatre ranchets dont l'extrémité inférieure est percée d'un œil qui passe dans un anneau formant charnière et fixé au châssis. Deux forts crochets placés sur les côtés d'avant et d'arrière maintiennent les volets relevés.

Ces volets tombants font un excellent service et facilitent singulièrement le déchargement. Le plancher et les côtés d'avant et d'arrière sont en planches de chêne de 0<sup>m</sup>,04 d'épaisseur. Les joints sont munis de languettes pour empêcher le tamisage.

Les volets, qui doivent être plus légers, sont en sapin et ont 0<sup>m</sup>,050 d'épaisseur.

##### § 2. — *Châssis.*

Le châssis est entièrement en fer. Sa longueur (non compris les tampons) est de 3<sup>m</sup>,70, et y compris les tampons, de 4<sup>m</sup>,55. Cette longueur, considérable eu égard aux faibles rayons des courbes, a été rendue nécessaire par l'emploi des volets tombants qui limitait la hauteur de la caisse. L'entr'axe des essieux étant de 1<sup>m</sup>,45, le porte-à-faux des longerons est de 1<sup>m</sup>,125. La demi-distance des essieux étant de 0<sup>m</sup>,725, il y a tendance au fléchissement du châssis en avant et en arrière. Mais la force de la poutre en U qui forme le longeron est suffisante pour qu'il ne se produise pas de déformation permanente dans ce sens. Le calcul suivant donne les conditions d'équilibre de la poutre.

Les réactions des quatre appuis, qui sont les extrémités des ressorts, sont toutes égales entre elles. Le solide est

une poutre rectiligne AB (*fig.* 13, Pl. VII), chargée d'un poids uniformément réparti sur toute sa longueur, encastree à une des extrémités, et reposant sur deux appuis en C et D. Prenons pour origine le point A, appelons  $a, b, c$ , les distances AC, CD, DB,  $p$  la charge par mètre courant, E le coefficient d'élasticité, I le moment d'inertie de la poutre,  $v$  sa demi hauteur, R l'effort maximum des fibres extrêmes,  $\rho$  le rayon de courbure, on a :

Pour  $x$  compris entre  $a + b$  et  $a + b + c$ ,

$$(1) \quad \frac{EI}{\rho} = p \cdot \frac{(a + b + c - x)^2}{2},$$

pour  $x$  compris entre  $a$  et  $a + b$ ,

$$(2) \quad \frac{EI}{\rho} = p \cdot \frac{(a + b + c - x)^2}{2} - Q(a + b - x),$$

pour  $x$  compris entre 0 et  $a$ ,

$$(3) \quad \frac{EI}{\rho} = p \cdot \frac{(a + b + c - x)^2}{2} - 2Q \left( a + \frac{b}{2} - x \right).$$

Les efforts des fibres extrêmes se déduisent de ces équations, et l'on a

$$Q \text{ étant égal à } \frac{p(a + b + c)}{2},$$

$$R_1 = \frac{pv}{2I} (a + b + c - x)^2,$$

$$R_2 = \frac{pv}{2I} [x^2 - (a + b + c)x + (a + b + c)c],$$

$$R_3 = \frac{pv}{2I} [x^2 + (c - a)(a + b + c)].$$

Pour  $x = a + b$ ,  $R_1$  est maximum et égal à  $\frac{p \cdot v \cdot c^2}{2I}$ .

Le maximum de  $R_2$  a lieu quand  $x$  est le plus petit possible et égal à  $a$

$$R_2 \text{ max.} = \frac{pv}{2I} [c^2 + b(c - a)].$$

Si  $c > a$ ,  $R_2 \text{ max.} > R_1 \text{ max.}$

Enfin le maximum de  $R_3$  a lieu pour  $x = a$ , et est égal au précédent.

On remarquera que si  $c = a$ ,  $R_3$  devient nul pour  $x = 0$ , ce qui était évident *a priori*.

Dans l'espèce, on a  $a = 0,3225$ ;  $b = 0,805$ ;  $c = 0,7225$ .

Le poids total du wagon vide, moins les roues, les essieux, les ressorts et les boîtes à graisse, est de 1.200 kilogrammes; celui de la charge de 6.000 kilogrammes. La charge totale sur la moitié du longeron est donc de 1.800 kilogrammes.  $p = 975$  kilogrammes. Les dimensions de la poutre en U sont 8 millimètres d'épaisseur à l'âme, 10 millimètres en moyenne aux ailes, 175 de hauteur totale, 60 de largeur aux ailes,  $I = 0,00011352$ . Elle pèse  $19^k,25$  par mètre courant.

La fatigue maximum a lieu à  $0^m,3225$  du milieu, et est égale à  $5^k,165$  par millimètre carré.

La flèche que prend la poutre sous la charge se calcule en intégrant deux fois les équations 1, 2 et 3, et en déterminant les constantes comme à l'ordinaire.

On a ainsi :

$$f = \frac{p(a + b + c)}{48EI} [6(a + b + c)^3 - (2a + b)^2(4a + 5b + 6c) - 3b^2(b + 2c)].$$

Dans l'espèce, pour  $E = 2.10^{10}$ ,  $f = 0^m,0022$ .

Les longerons sont reliés par quatre traverses intérieures formées de fers a double T et par les traverses de tête formées de fers en U. L'ensemble est consolidé par une croix de Saint-André formée d'une cornière simple. Le tout constitue un châssis, plus léger que le châssis en bois, très-rigide, et qui fournit un excellent service, surtout sous un climat extrême comme celui de la Grèce.

*Appareil de traction et de choc.* — L'appareil de traction et de choc est semblable à celui des chemins de fer ordinaires. Il se compose d'un ressort, de deux tampons

espacés de 0<sup>m</sup>,90 et d'une barre de traction terminée par un crochet et portant une chaîne à trois maillons. Il n'y a point de tendeur à vis. L'écartement des tampons est juste suffisant pour permettre à un homme de se placer entre eux pour accrocher les chaînes d'attelage. La disposition générale est d'ailleurs celle qui est usitée sur la plupart des wagons de chemins de fer; elle ne présente aucune particularité qui mérite d'être signalée.

La corde de fabrication du ressort est de 0,854, la flèche de fabrication 0,120, le rayon de fabrication 0,957, la charge d'aplatissement 3,817.

### § 3. — De l'attelage au point de vue des courbes.

Le jeu de la voie permet aux wagons d'osciller d'une certaine quantité autour de leur position normale et la largeur des tampons doit être telle qu'en aucun cas, deux tampons en contact ne puissent échapper l'un à l'autre, ce qui occasionnerait infailliblement le déraillement. Le jeu normal en courbe est de 0<sup>m</sup>,026; en supposant que l'usure des boudins atteigne 0<sup>m</sup>,015, le jeu total est porté à 0<sup>m</sup>,056. L'écartement des essieux est de 1<sup>m</sup>,45, mais il convient d'ajouter à cette distance la projection sur le plan du rail de la partie du boudin qui se trouve au-dessous de ce plan; cette projection est égale à  $2\sqrt{0,028(0,656-0,028)}$  ou à 0<sup>m</sup>,264, soit 0<sup>m</sup>,132 de chaque côté de l'essieu.

Nous avons représenté, *fig. 14*, Pl. VII, la position relative la plus défavorable de deux wagons en contact dans une courbe de 60 mètres de rayon. La distance maximum des axes des deux tampons en contact est de 0<sup>m</sup>,14; leur largeur étant de 0<sup>m</sup>,30, il reste un recouvrement égal à plus de la moitié de la largeur.

A la remonte, lorsque la machine tire, les tampons ne sont pas en contact et la traction tend à ramener les véhicules vers le centre de la courbe. Mais à la descente, ou

plus généralement, lorsque la machine retient le train qui s'appuie sur elle, les tampons entrent en contact et dans une courbe, deux d'entre eux seulement peuvent se toucher.

Il y a certainement un inconvénient à ce que la transmission des efforts s'opère ainsi par un seul tampon placé en dehors de l'axe. Le ressort de choc n'agit alors que par une de ses moitiés et le mouvement d'oscillation du véhicule autour de son axe de figure, mouvement qui facilite le passage en courbe, ne s'opère pas facilement. Toutefois cet inconvénient est atténué par le fait que tous les wagons sont munis de freins, de sorte que la pression des wagons les uns sur les autres à la descente est assez faible. Il est clair que ce défaut deviendrait bien plus sensible si l'on voulait remorquer les trains sur les rampes au moyen de deux machines placées l'une à l'avant, l'autre à l'arrière. Mais ce mode de procéder ne se concilie guère, quel que soit d'ailleurs le mode d'assemblage employé, avec la roideur des courbes.

L'attelage avec tampon unique est théoriquement préférable pour le passage dans les courbes de petit rayon; mais sa réalisation pratique présente des difficultés.

Par suite de la grande largeur à donner au tampon, il n'est pas aisé de conserver la barre de traction dans l'axe. Ainsi dans le wagon du chemin de fer de Mondalazac à Salles-la-Source, *fig. 1, 2 et 3*, Pl. VIII, il y a deux chaînes d'attelage placées à 0<sup>m</sup>,225 de part et d'autre de l'axe du tampon. C'est là une solution évidemment inférieure à celle d'une barre de traction unique et de deux tampons. Non-seulement il doit arriver souvent que les ouvriers oublient d'accrocher une des chaînes, mais encore la moindre différence dans leur longueur fait porter tout l'effort sur l'une d'elles et produit une traction oblique à l'axe de la voie; enfin dans les courbes une seule des deux chaînes travaille.

Sur la petite ligne dite rectification des eaux du Jura, en Suisse, il n'y a ni ressort de traction, ni ressorts de choc. L'attelage se fait par un maillon placé au-dessus du tampon. Les wagons ne doivent jamais changer de sens et sont disposés de manière qu'en face d'un tampon pourvu d'un maillon B se trouve toujours un tampon muni d'un simple crochet A. Les *fig. 4* et *5*, Pl. VIII, représentent l'attelage d'un wagon et de la machine. Pour faire l'attelage du côté A, on se sert du maillon fixé au crochet de traction de la machine C. Pour atteler du côté B, on emploie le maillon du wagon, qui se passe sur le crochet de traction de la machine. Il semble que dans ce système la chaîne doit souvent se décrocher. D'ailleurs l'absence de tout appareil élastique pour amortir les chocs suffirait pour le faire rejeter dans la plupart des cas. On pourrait toutefois munir le tampon d'un ressort spirale ou de rondelles en caoutchouc pour le choc et remplacer le crochet d'attelage fixé sur le tampon par une barre de traction reliée au wagon par l'intermédiaire d'un ressort.

Dans son *Traité des chemins de fer*, M. Couche a décrit le mode d'attelage des wagons norvégiens. Ces wagons, qui circulent sur une voie de 1<sup>m</sup>,067, n'ont qu'une barre d'attelage continue, reliée au châssis par l'intermédiaire d'un ressort spirale. Le tampon est placé à l'extrémité de la barre. Il est fendu à sa partie supérieure, et porte dans l'espèce de rainure ainsi ménagée un crochet de forme particulière qui se meut dans un plan vertical et vient saisir un goujon placé dans la rainure semblable du tampon du wagon opposé. Une petite chaîne, que l'on maintient avec une goupille, empêche le crochet de se soulever. L'ensemble est assez compliqué. C'est comme on le voit, un système analogue à celui du matériel suisse. Comme ce dernier, il exige dans les manœuvres une précision et un soin qu'on ne peut guère espérer atteindre sur un chemin de fer industriel.

En somme, tous les systèmes que nous venons d'énumérer présentent des inconvénients. L'attelage des wagons d'Ergastiria s'est bien comporté jusqu'ici; le matériel passe facilement dans les courbes, les manœuvres sont faciles et rapides.

Nous croyons qu'on l'améliorerait notablement en rapprochant encore davantage les deux tampons, garnis alors de ressorts spirales ou de rondelles de caoutchouc. Le ressort de traction serait alors du même genre et placé au milieu du châssis.

#### § 4. — Suspension.

Les ressorts de suspension sont formés de sept feuilles étagées, larges de 0,075, épaisses de 0<sup>m</sup>,010. Leur longueur développée est :

	mètres
Pour la 1 <sup>re</sup> feuille entre les points de contact.	0,850
— totale. . . . .	0,868
Pour la 2 <sup>e</sup> feuille. . . . .	0,810
Pour la 3 <sup>e</sup> — . . . . .	0,690
Pour la 4 <sup>e</sup> — . . . . .	0,570
Pour la 5 <sup>e</sup> — . . . . .	0,450
Pour la 6 <sup>e</sup> — . . . . .	0,350
Pour la 7 <sup>e</sup> — . . . . .	0,210
Le rayon de fabrication est. . . . .	1,00
La corde de fabrication. . . . .	0,805
La flèche de fabrication. . . . .	0,084
	kilog.
La charge normale. . . . .	1.800
La charge d'aplatissement. . . . .	4.090
La flexibilité par 1.000 kilogrammes. . . . .	0,205
L'étagement. . . . .	0,060

#### § 5. — Boîtes à huile.

L'huile étant une denrée qu'on peut se procurer facilement en Grèce et les chaleurs extrêmes de l'été rendant l'emploi de la graisse peu commode, on a adopté le premier de ces modes de graissage. L'ouverture d'introduction

est sur le côté; elle est fermée par un couvercle maintenu par un ressort. L'orifice est au même niveau que le bord inférieur de la fusée. Une pièce de bois portant à sa partie supérieure une mèche plate en coton, dont les bouts plongent dans l'huile, est appliquée contre la fusée par deux petits ressorts à boudin maintenus par deux *tetons* venus de fonte sur le fond de la boîte.

Le rayon de la fusée étant 35 millimètres, celui du coussinet est 36 millimètres. Le jeu longitudinal de l'essieu est de 2 millimètres. Le jeu dans les plaques de garde est de 8 millimètres.

La fermeture de la boîte du côté où sort l'essieu est obtenue par une rondelle en cuir. Enfin le joint des deux parties supérieure et inférieure de la boîte est rendue étanche par un morceau de cuir interposé.

Le fonctionnement de ces boîtes est très-bon et il n'y a pas de crachement sensible du côté de l'essieu. La seule chose qu'on puisse leur reprocher est la fragilité des parties dans lesquelles passe l'axe en fer du couvercle de l'orifice d'introduction de l'huile. Sur un assez grand nombre de boîtes, ces appendices se sont brisés.

#### § 6. — Essieux et roues.

Les *fig.* 6 et 7, Pl. VIII, montrent la disposition des essieux et des roues.

Les dimensions principales des essieux sont les suivantes :

Longueur totale. . . . .	1,60
Longueur des fusées. . . . .	0,158
Diamètre des fusées. . . . .	0,070
Longueur de la portée de calage. . . . .	0,130
Diamètre de la portée de calage. . . . .	0,100
Diamètre de l'essieu au milieu. . . . .	0,082

La fusée et la portée de calage sont réunies par une portée intermédiaire de 0,085 de diamètre et de 0,045 de

longueur. Entre les portées de calage, le corps de l'essieu est formé de deux troncs de cône de 0,300 de hauteur réunis par une partie cylindrique de 0<sup>m</sup>,240 de longueur.

On calcule facilement le travail moléculaire statique résultant de la charge appliquée sur les fusées. La longueur frottante du coussinet étant de 0<sup>m</sup>,148, le travail moléculaire maximum dans la section extrême de la fusée  $R_1$  est donné par l'expression

$$R_1 = \frac{P \cdot 0,148}{2} \cdot \frac{v}{I},$$

$v$  est égal au rayon  $r$  de la fusée, soit 0<sup>m</sup>,055 ;

$$I = \frac{\pi \cdot r^4}{4}, \quad P = 1.860 \text{ kilog.},$$

d'où

$$R_1 = 4^k,08.$$

Au droit de la portée de calage, la fatigue maximum du métal,

$$R_2 = \frac{4 \cdot 1860 \cdot (0,074 + 0,058)}{\pi \cdot 0,0425} = 4^k,07.$$

Les roues sont en fer, à moyeu de fonte fretté. Elles ont 0<sup>m</sup>,60 de diamètre au roulement. La largeur du moyeu est de 0<sup>m</sup>,130, son épaisseur de 0<sup>m</sup>,065, les deux frettes en fer ont 0<sup>m</sup>,0275 sur 0<sup>m</sup>,015. Les rais, au nombre de six, sont à deux branches réunies près de la jante; ils ont, ainsi que la jante, 0<sup>m</sup>,075 de largeur. Le bandage a 0<sup>m</sup>,052 d'épaisseur au roulement; la conicité est de  $\frac{1}{12}$ . Le bord extérieur est légèrement chanfrimé sur 0<sup>m</sup>,020 de longueur, suivant une conicité de  $\frac{1}{4,65}$ . L'épaisseur du boudin est de 0<sup>m</sup>,029, sa saillie de 0<sup>m</sup>,026. La distance entre les bandages est de 0<sup>m</sup>,925.

Outre la pression provenant de l'embattage, trois rivets, légèrement coniques, fixent le bandage sur la jante.

Le moyeu est claveté sur l'essieu au moyen d'une clavette de 10 millimètres de hauteur sur 19 de largeur, qui pénètre de 3 millimètres dans l'essieu.

Les essieux montés sur roues pèsent chacun 360 kilog. Ils ont été fabriqués à Montluçon par la société des forges de Châtillon et Commentry, et ont coûté 247<sup>f</sup>.75 en gare de Montluçon.

Il n'y a jamais eu encore de rupture d'essieux.

La roideur des courbes a naturellement produit une usure assez rapide des boudins des roues. La *fig. 8*, Pl. VIII, montre l'état actuel des bandages après un parcours de 10.000 kilomètres. L'usure des boudins est de 8 millimètres, celle des bandages de 4 millimètres.

Grâce à la grande épaisseur des bandages, on pourra leur rendre à peu près leur profil primitif en les tournant de manière à diminuer leur épaisseur de 13 à 14 millimètres, comme l'indique la ligne pointillée. Celle-ci sera encore de 0<sup>m</sup>,038, suffisante par conséquent pour fournir un parcours égal au premier. Le diamètre au roulement sera alors réduit à 0<sup>m</sup>,57.

Le parcours total d'un bandage sera donc de 20.000 kilomètres.

L'usure des bandages provenant en partie des frottements dus à la différence de parcours des roues calées sur le même essieu et circulant l'une sur le rail intérieur, l'autre sur le rail extérieur d'une courbe, on peut la diminuer en rendant l'une des deux roues folles sur l'essieu, comme on l'a fait à Mondalzac. On avait même étudié dans ce but, pour le chemin de fer d'Ergastiria, une disposition représentée *fig. 9*, Pl. VIII.

La difficulté d'obtenir un bon graissage du coussinet de la roue folle, la complication et l'affaiblissement qui en résultent pour le matériel, ont fait rejeter cette solution. D'ailleurs, ce qui souffre le plus dans les courbes, ce n'est pas la surface de roulement, mais surtout le boudin, et

l'usure de ce dernier ne serait pas atténuée par la disposition étudiée, de sorte qu'elle n'augmenterait probablement pas beaucoup la durée du bandage.

### § 7. — Freins.

Les wagons sont tous munis de freins, les uns à levier, les autres à vis. Les freins à levier sont appliqués sur les deux roues du même essieu. Cette disposition est incontestablement préférable à celle qui fait agir le frein sur une seule roue, et surtout à celle qui met en prise les deux roues placées d'un même côté du wagon. Le jeu de la boîte à graisse dans les plaques de garde est loin d'être négligeable, et il en résulte que les deux dernières dispositions ont pour effet de détruire le parallélisme des essieux au détriment de la conservation de la voie et des bandages, en même temps qu'elles soumettent les essieux à des efforts de torsion considérables. Les sabots sont en fonte. L'extrémité du levier s'engage dans une crémaillère fixée à la caisse. La longueur du grand bras de levier jusqu'au milieu de la poignée est de 2<sup>m</sup>,40, la longueur du petit bras de 0<sup>m</sup>,15. L'effort exercé sur la poignée est donc multiplié par le rapport  $\frac{240}{15}$  ou par 16. Admettant que cet effort soit de 30 kilogrammes, le coefficient de frottement étant supposé de  $\frac{1}{10}$  (minimum), la force retardatrice est 48 kilogrammes. Si le coefficient de frottement est de 0<sup>m</sup>,24 (maximum), cette force est de 115<sup>k</sup>,2. Prenant pour le coefficient moyen le chiffre généralement accepté de 0<sup>m</sup>,14, on trouve que la force retardatrice est de 77<sup>kil</sup>,2. La pente sur laquelle cette force suffit pour arrêter le wagon se calcule facilement, en admettant 4 kilogrammes par tonne pour la résistance au roulement; on a, en effet, le poids du wagon plein étant de 8.600 kilogrammes,

pente de 35 millimètres, l'effort à détruire est de  $8,6 \times 51$  ou de  $266^{kil},6$ . Le frein à levier diminue cet effort de  $77^{kil},2$ ; il reste  $189^{kil},4$  qu'il faut anéantir par des moyens plus puissants, c'est-à-dire par l'intercalation dans le train d'un certain nombre de freins à vis.

La disposition de ces derniers n'offre rien de particulier.

Ils se composent de quatre sabots en fonte, commandés par un arbre sur lequel la bielle de transmission agit par l'intermédiaire d'un levier dont les bras sont dans le rapport de 3 à 1. La bielle de relevage actionne la bielle de transmission par l'intermédiaire d'un levier coudé, dont les deux bras sont dans le rapport de 3 à 2. La manivelle de commande a  $0^m,20$  de rayon, le pas de la vis est de  $0^m,01$ . Appelant  $e$  l'effort exercé sur la manivelle, la pression exercée par les sabots sur les roues est  $e \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,20 \cdot 3,3}{0,01 \cdot 2} = 565,6 \cdot e$ .

L'effort nécessaire pour caler les roues est donné par l'équation

$$565,60 \cdot e = 8.710 \text{ kilog.}$$

$$(8.710 \text{ kilog., poids du wagon chargé),}$$

$$\text{d'où} \quad e = 15^k,4.$$

Le serre-frein se tient debout, sur une plate-forme extérieure de  $0^m,65$  de longueur et de  $0^m,45$  de largeur, placée extérieurement sur l'avant du wagon et à droite de l'axe de ce dernier, de manière que deux plates-formes opposées ne puissent se rencontrer lorsque les wagons sont en contact. Un garde-corps de  $0^m,90$  de hauteur entoure la plate-forme.

Les wagons à frein à levier pèsent 2.600 kilog.; les wagons à frein à vis 2.710 kilog. La charge étant de 6 tonnes, le rapport du poids utile au poids mort est pour les premiers 2.51, pour les seconds 2.21.

Les wagons à frein à main ont coûté 1.500 francs; ceux

$8,6(x - 4) = 77,2$ ; d'où  $x = 15^{mil},1$  par mètre. Sur une qui sont munis de frein à vis 1.590 francs, rendus à Marseille.

Le prix total du wagon, y compris les roues, est donc 1.995<sup>f</sup>,50 pour les premiers, 2.085<sup>f</sup>,50 pour les seconds. Ils ont été construits aux chantiers de la Buire à Lyon. Pour un transport annuel de 75.000 tonnes, il y a 40 wagons, dont 15 sont à freins à vis.

#### CHAPITRE IV.

##### LOCOMOTIVES.

##### § 1. — Renseignements généraux.

Les locomotives ont été construites dans les ateliers de MM. André Kœchlin et C<sup>ie</sup>, à Mulhouse, et ont coûté 30.000 francs. Elles ont été étudiées avec un soin tout particulier par l'éminent ingénieur qui dirige cet établissement, M. Beugnot. Elles appartiennent au type des machines-tenders du chemin de fer de Moktâ el Hâdid, mais renforcé comme dimensions, comme poids, comme surface de chauffe, et approprié au tracé accidenté de la ligne.

Leur ensemble est représenté *fig. 10 à 13, Pl. VIII.*

##### § 2. — Chaudière.

Les dimensions génériques sont les suivantes :

Timbre de la chaudière. . . . .	9 <sup>k</sup> ,00
Diamètre moyen du corps cylindrique. . . . .	1 <sup>m</sup> ,00
Épaisseur des tôles. . . . .	0,0115
Longueur de l'enveloppe du foyer. . . . .	1 <sup>m</sup> ,150
Largeur — . . . . .	0,790
Longueur de la grille. . . . .	0,980
Largeur — . . . . .	0,640
Surface — . . . . .	0 <sup>m2</sup> ,627

Nombre de tubes. . . . .	125
Diamètre intérieur des tubes. . . . .	0 <sup>m</sup> ,041
Épaisseur des tubes. . . . .	0 ,002
Longueur intérieure des tubes entre les plaques tubulaires. . . . .	2 ,920
Surface de chauffe du foyer. . . . .	4 <sup>m</sup> ,52
— des tubes. . . . .	45 ,26
— totale. . . . .	49 ,58
Volume d'eau dans la chaudière à 10 milim. sur le ciel du foyer. . . . .	1.200 litres.
Volume de vapeur correspondant à cette hauteur. . . . .	650 —
Volume total de la chaudière. . . . .	1.850 —

La boîte à feu est évasée dans le sens de la longueur pour augmenter la surface de grille. Le ciel est incliné d'avant en arrière suivant une pente de 35 millimètres par mètre, de manière à être horizontal lorsque la machine circule sur une pente égale. Cette disposition a pour effet d'atténuer l'inconvénient qui résulte de l'abaissement du niveau de l'eau au-dessus du foyer quand la machine descend une forte pente cheminée en avant. La circulation sur des pentes très-fortes exige un soin extrême dans l'alimentation. Pour peu que le mécanicien néglige de tenir son niveau d'eau très-élevé au moment où il aborde la pente, ou bien lorsque, marchant cheminée en arrière, il arrive sur un palier ou sur une rampe, le ciel du foyer se découvre et se brûle. C'est ce qui est arrivé une fois sur le chemin d'Ergastiria, au bas de la pente de 26 millimètres, à Berzekô.

L'alimentation est assurée par deux pompes et un Giffard. L'eau est renfermée dans deux bâches d'une capacité totale de 5 mètres cubes.

La puissance de vaporisation de la chaudière est remarquable; elle le doit surtout à la grandeur relative de la surface de chauffe directe (plus du  $\frac{1}{12}$  de la surface totale), ensuite au peu de longueur des tubes.

## § 3. — Mécanisme.

Les dimensions principales sont :

	mètres.
Diamètre des cylindres. . . . .	0,35
Course des pistons. . . . .	0,46
Écartement des cylindres d'axe en axe. . . . .	1,50
Diamètre de la tige du piston. . . . .	0,05
Épaisseur du piston. . . . .	0,08
Distance entre les fonds du cylindre. . . . .	0,56
Jeu entre la face du piston à l'extrémité de sa course et le fond du cylindre. . . . .	0,01
Longueur de la bielle motrice (commandant l'essieu d'arrière). . . . .	2,14
Diamètre des tourillons de la bielle motrice. . . . .	0,07
— des bielles d'accouplement. . . . .	0,09

La prise de vapeur est placée dans un dôme, à l'avant de la machine. Le changement de marche à vis porte sept crans de part et d'autre du point mort.

Enfin la machine est munie de l'appareil Lechâtelier pour la marche à contre-vapeur.

Tous les mécanismes sont en fer fin de riblons, cémenté au paquet, et, dans toutes les parties frottantes, trempé. Les tringles de piston et les glissières sont en acier fondu.

## § 4. — Distribution.

Section des lumières d'admission. . . . .	35/220
— d'échappement. . . . .	65/220
Volume des espaces nuisibles, côté avant. . . . .	0,003272
— côté des glissières. . . . .	0,002328
Inclinaison de la distribution sur l'horizontale. . . . .	4° 56'
Longueur des barres d'excentrique. . . . .	1 <sup>m</sup> ,45
Course des excentriques. . . . .	100 mil.
Angle d'avance. . . . .	30°
Rayon de la coulisse. . . . .	1 <sup>m</sup> ,550
Recouvrement extérieur. . . . .	24 <sup>mm</sup> ,5
Recouvrement intérieur. . . . .	5 mil.

Cette distribution a été étudiée au moyen du diagramme de Zeuner. On sait que ce diagramme consiste à exprimer le recouvrement du tiroir de part et d'autre de sa position moyenne par une équation de la forme

$$\xi = A \cos \omega \pm B \sin \omega + F,$$

dans laquelle A et B sont des constantes:  $\omega$  représente l'angle variable de la manivelle avec l'axe du cylindre,  $\xi$  la distance du tiroir à sa position moyenne, F une variable très-petite et négligeable.

On peut donc écrire l'équation ainsi :

$$\xi = A \cos \omega \pm B \sin \omega.$$

C'est l'équation, en coordonnées polaires, de deux cercles tangents de même rayon et passant tous deux par le pôle.

Si l'on considère la distribution quand le tiroir est à son maximum de course, c'est-à-dire quand l'excentrique commande directement la tige du tiroir, appelant  $r$  le rayon d'excentricité, on la demi-course du tiroir,  $\delta$  l'angle de calage, on a  $A = r \sin \delta$ ,  $B = r \cos \delta$ . Les coordonnées rectangulaires des centres  $C_3$  et  $C'_3$  des deux cercles tangents (fig. 1, Pl. XI) sont

$$a = \pm \frac{r \sin \delta}{2}, \quad b = \pm \frac{r \cos \delta}{2}.$$

Pour chaque position de la manivelle, le chemin parcouru par le tiroir, à partir de sa position moyenne, est représenté par la longueur du rayon vecteur mené du point  $o$  à la circonférence du cercle.

Si du même point  $o$ , comme centre, on décrit deux cercles ayant pour rayons, l'un le recouvrement extérieur  $g$ , l'autre le recouvrement intérieur  $f$ , les points où ces cercles rencontrent les cercles d'excentricité ayant leurs centres en  $C_3$

et  $C'_3$ , donnent les positions de la manivelle correspondant aux moments où les rebords extérieur et intérieur du tiroir démasquent les lumières; on a par conséquent ainsi le commencement et l'amplitude des périodes d'admission, de détente, d'échappement anticipé, de compression et d'admission anticipée. L'ouverture maximum d'admission =  $m$ ; l'avance linéaire =  $K$ ; on donne pour la course maximum du tiroir la position de la manivelle au commencement de la détente,  $op$  au commencement de l'échappement anticipé,  $oq$  au commencement de la période de compression.

En négligeant l'influence de l'obliquité de la bielle, on a les chemins correspondants parcourus par le piston en décrivant un cercle avec un rayon égal à la longueur de la manivelle et en projetant les rayons correspondants sur l'axe des  $x$ .

Sur la figure, on a supposé que le rayon de cercle de la manivelle est de  $0^m,10$  au lieu de  $0^m,115$ , de manière à rapporter les différentes périodes en centièmes de la course du piston.

Pour les autres marches du tiroir correspondant aux différentes positions de la coulisse, on détermine les coordonnées  $a$  et  $b$  des centres des cercles d'excentricité par les équations suivantes, dans lesquelles  $c$  représente la moitié de la longueur de la coulisse (supposée égale à la corde),  $u$  le relevage variable de la coulisse,  $l$  la longueur des barres d'excentrique.

$$a = \frac{1}{2} p \left( \sin \delta + \frac{c^2 - u^2}{cl} \cos \delta \right),$$

$$b = \frac{1}{2} \frac{ru}{c} \cos \delta.$$

Dans l'espèce,  $c = 0,125$ ,  $r = 0,050$ ,  $\delta = 30^\circ$ ,  $l = 1,45$ .

Au dernier cran (maximum d'admission).

$$u = c = 0,125, \quad a = 0,0125, \quad b = 0,0216.$$

Au point mort  $u = 0$ ,  $a = 0,01456$ ,  $b = 0$ .

On a déterminé de cette façon la position des centres d'excentricité  $C_1, C_2, \dots, C_3$  pour chacun des crans du changement de marche, et l'on en conclut les différentes phases de la marche du tiroir telles qu'elles sont indiquées sur la figure et consignées dans le tableau ci-après (\*).

NUMÉROS DES CRANS.	COURSE DU TIROIR (millimètres)	AVANCE LINÉAIRE à l'introduction (millimètres).		INTRO- DUCTION $L_1$		DÉTENTE $L_2$		ÉCHAPPE- MENT anticipé. $L_3$		ÉCHAPPEMENT $L'_1$		COMPRESSION $L'_2$		ADMISSION anticipée ou contre-pression $L'_3$	
		en millimètres.	p. 100 de la course.	en millimètres.	p. 100 de la course.	en millimètres.	p. 100 de la course.	en millimètres.	p. 100 de la course.	en millimètres.	p. 100 de la course.	en millimètres.	p. 100 de la course.	en millimètres.	p. 100 de la course.
8	100	0,37	25,5	348	75,5	93	20,5	19	4	417	91	43	9	0	0
7	92	1,50	21,5	322	70	112	24	26	6	404	88	55	12	0,5	0,5
6	81	2,50	16,75	276	60	145	31,5	39	8,5	382	83	77	17	1	0,2
5	73,5	3	12,5	230	50	175	38	55	12	359	78	99	22	2	0,4
4	68	3,25	9,5	184	40	205	44,5	71	15,5	329	71,5	128	28,5	3	0,5
3	63,5	3,75	7,25	138	30	227	49,5	95	20,5	302	55,5	152	34,5	6	1,5
2	60	4	5,5	92	20	242	53	126	27	262	57	187	43	11	2,5
1 point mort	57,5	4,50	4,5	34	7,5	232	50,5	194	42	195	42,5	232	57,5	33	7,5

Les tiroirs ont été réglés sur des avances égales au troisième cran (30 p. 100 d'admission). La construction du

(\*) Nous renvoyons les lecteurs que la construction de l'ingénieux diagramme de Zeuner pourrait intéresser, à l'ouvrage que cet auteur a publié sur cette question (*Traité de la distribution par tiroirs*, par Zeuner, professeur à l'École polytechnique de Zurich, traduction de Debize et Mérijot, ingénieurs des manufactures de l'État, Dunod, éditeur, 1869).

diagramme suppose que les avances sont égales deux à deux, quelle que soit la position de la coulisse; en réalité il n'en est pas ainsi, parce que le point d'attache de la bielle de suspension étant fixe, l'attache de la coulisse décrit nécessairement un arc de cercle autour de ce point comme centre, de sorte que le point de la coulisse qui commande la tige du tiroir décrit de petites oscillations de part et d'autre de la ligne qui joint l'axe de la tige au centre de rotation de la manivelle. Il en résulte une différence plus ou moins sensible dans les avances linéaires, au commencement de chaque course directe et inverse du piston. M. Zeuner a trouvé par le calcul que ces oscillations sont réduites au minimum quand la longueur de la bielle de relevage est égale à celle de la barre d'excentrique. Dans l'espèce cette longueur est beaucoup plus faible (0<sup>m</sup>,330). Toutefois les expériences directes montrent que la variation des avances linéaires qui en résulte est peu considérable et ne dépasse pas un demi-millimètre.

#### § 5. — Châssis.

Le châssis est formé de deux longerons découpés dans une feuille en fer fort; leur section moyenne est de 20 millimètres sur 220, leur écartement de 0<sup>m</sup>,828. Le porte-à-faux d'avant est de 1<sup>m</sup>,940, le porte-à-faux d'arrière de 2<sup>m</sup>,450. La largeur totale du tablier est de 2<sup>m</sup>,500. L'axe de la chaudière est à 1<sup>m</sup>,550 au-dessus des rails. La longueur de la machine entre tampons est de 7<sup>m</sup>,525. La hauteur totale du haut de la cheminée au-dessus des rails est de 5<sup>m</sup>,05.

La traverse d'avant est en fonte, la traverse d'arrière en tôle.

La hauteur de l'axe de traction au-dessus du rail est de 0<sup>m</sup>,675. Le ressort de traction a une flèche de fabrication de 0<sup>m</sup>,670.

§ 6. — *Roues et essieux.*

Les roues sont en fer forgé d'Arbel, les bandages en acier fondu de Krupp. Elles ont 0<sup>m</sup>,900 de diamètre en contact. La section des bandages au roulement est de 52 millimètres d'épaisseur sur 125 de largeur. La saillie du boudin sur le diamètre au roulement est de 0<sup>m</sup>,035 ou de 0,033 sur le profil du bandage.

La distance de l'essieu du milieu à l'essieu d'avant est de 1<sup>m</sup>,135.

La distance de l'essieu du milieu à l'essieu d'arrière est de 1<sup>m</sup>,075.

Empattement total 2<sup>m</sup>,20.

En tenant compte de la saillie des boudins, on voit que l'empattement réel, au droit du sommet du rail, est de  $2,20 + 2.0,18 = 2<sup>m</sup>,56$ .

§ 7. — *Circulation dans les courbes.*

Le jeu de la voie est de 0,028 en alignement droit, de 0,032 en courbe, à cause de l'augmentation de largeur de la voie. Dans ces conditions, l'empattement est assez faible pour permettre aux six roues de s'inscrire dans une courbe de 60 mètres, même sans jeu longitudinal des essieux et en supposant tout le système parfaitement rigide. Deux des roues du milieu étant appliquées sur le rail intérieur, il reste encore un jeu de 5 millimètres entre la roue d'avant de gauche et le rail extérieur et de 20 millimètres entre la roue de droite et le rail intérieur. Au droit de l'essieu d'avant le jeu total est donc de 25 millimètres. Mais ce résultat fut avec raison jugé insuffisant, et l'on se décida à donner à l'essieu d'avant un jeu longitudinal de 10 millimètres, au moyen des plans inclinés employés aujourd'hui sur un grand nombre de machines.

En conséquence de ce jeu, les tourillons commandant les bielles motrices et les bielles d'accouplement d'arrière sont sphériques, et les assemblages des bielles d'accouplement entre elles ont leur axe vertical.

Les traits pointillés de la *fig. 15*, Pl. VIII, représentent les positions extrêmes que peut prendre la machine de part et d'autre de l'axe de la voie en profitant du jeu longitudinal de l'essieu. On a représenté également les positions extrêmes correspondantes d'un wagon attelé à l'avant ou à l'arrière de la machine. On voit ainsi que par suite du porte-à-faux considérable du châssis, l'écart entre les positions extrêmes que peuvent occuper deux tampons en contact est considérable et que, dans le cas le plus défavorable, le recouvrement des deux tampons l'un sur l'autre est encore de 0<sup>m</sup>,13. Toutefois ce recouvrement est insuffisant à cause de l'usure des mentonnets qui augmente considérablement le jeu. Aussi a-t-on dû élargir de 0,10 le diamètre des tampons des machines.

L'usure des bandages surtout aux boudins est très-forte. Les *fig. 16* et *17*, Pl. VIII, montrent l'état des bandages d'une locomotive après un parcours de 20.000 kilomètres. On aurait pu les faire servir encore en les tournant suivant le profil pointillé. Comme on n'avait pas à l'usine de tour suffisamment grand pour ce travail, on a préféré changer les bandages. Ces résultats démontrent la nécessité :

1° D'un jeu longitudinal plus considérable de l'essieu d'avant ; ce jeu devrait être porté à 0<sup>m</sup>,05, chiffre correspondant à une amplitude d'oscillation telle que le boudin de la roue du milieu touche presque le rail extérieur d'une courbe de 60 mètres de rayon, tandis que le boudin de la roue d'arrière est appliqué contre le rail intérieur ;

2° D'un changement dans la position du point d'attache de la barre de traction.

Lorsque la machine remorque un train dans une courbe, l'effort de traction a une direction légèrement oblique à

l'axe de la machine; il tend constamment à éloigner l'avant de cette dernière du centre de la courbe et à faire mordre le rail extérieur par le boudin de la roue d'avant en appuyant le boudin de la roue d'arrière contre le rail intérieur. Au contraire, entre deux wagons attelés, l'effet inverse tend à se produire, parce que l'effort de traction qui a lieu à l'avant est supérieur à celui qui est transmis à l'arrière. Pour remédier aux mauvais effets de la direction oblique de l'effort de traction sur la marche de la machine, il faudrait que l'attache de la barre d'attelage fût placée un peu en avant du centre de figure de l'ensemble des roues et que l'ouverture de la traverse qui donne passage à cette barre eût une largeur au moins égale à l'amplitude des oscillations de la machine de part et d'autre de l'axe de la voie. Ce résultat serait atteint sans difficulté pour la barre d'attelage d'avant, qui fonctionne lorsque la machine marche cheminée en arrière; mais il ne peut être réalisé pour la barre d'attelage d'arrière, à moins de lui faire traverser le foyer. On pourrait tout au moins atténuer l'inconvénient que présente le mode actuel d'attache de cette dernière en reportant le ressort de traction en arrière tout près de l'enveloppe extérieure de la boîte à feu.

La position de l'attache de la barre d'attelage présente, à notre avis, une grande importance au point de vue du passage dans les courbes de petit rayon. Nous sommes persuadé que l'attache de la barre d'attelage près du centre de figure diminuerait dans une très-notable proportion, non-seulement l'usure des bandages, mais encore la résistance au mouvement de la machine dans ces courbes.

#### § 8. — Poids de la machine.

	kilog.
Poids de la locomotive à vide. . . . .	17.500
Poids de l'eau dans la chaudière et du combustible sur la grille. . . . .	1.465

	kilog.
Poids de l'eau dans les soutes. . . . .	5.000
Poids du charbon dans les soutes. . . . .	1.000
Poids maximum de la locomotive en charge. . . . .	22.965
Poids moyen —	21.000
Répartition ou charge d'après les pesées sur la bascule,	
essieu d'avant, poids sur rail. . . . .	7.420
essieu du milieu. . . . .	7.700
essieu d'arrière. . . . .	7.845

La répartition est donc satisfaisante. On remarquera toutefois que l'égalité approchée des poids sur les trois essieux a été obtenue en chargeant l'avant d'une lourde traverse en fonte. C'est là un expédient auquel il eût mieux valu ne pas avoir recours.

La répartition subit nécessairement en service des variations considérables, non-seulement à cause de l'action du mécanisme, mais encore à cause des fortes pentes qui reportent sur l'arrière ou sur l'avant une partie de l'eau de la chaudière et des soutes. On peut évaluer à 300 kilogrammes environ le poids de l'eau qui se déplace ainsi, soit vers l'avant, soit vers l'arrière. Le même effet se produit, mais avec une intensité plus grande, entre un côté et l'autre de la machine, à cause du dévers, dans les courbes. Sur un dévers de 16 centimètres, le poids d'eau qui passe d'une soute dans l'autre est de 240 kilogrammes. Il en résulte une surcharge de 1.700 kilogrammes sur les ressorts de suspension placés du côté du centre de la courbe. Pour obvier à cet inconvénient qui est sérieux, il suffirait de fermer la communication entre les soutes par un robinet que le mécanicien tiendrait habituellement fermé et n'ouvrirait qu'après avoir alimenté.

#### § 9. — Puissance de traction. Consommation d'eau et de combustible.

La puissance de traction d'une machine, c'est-à-dire le poids brut qu'elle peut remorquer, est égal au travail total T

qu'elle peut développer sur un mètre de parcours, diminué de la résistance  $R$  due au mécanisme, à la double condition que  $T - R$  soit plus petit que l'adhérence et que la chaudière puisse produire la vapeur nécessaire, eu égard à la vitesse de marche.

Une évaluation exacte du travail résistant  $R$  ne peut être obtenue qu'au moyen d'expériences directes faites sur chaque type de machines. Ces expériences n'ont pas été exécutées sur les locomotives Ergastiria. Nous prendrons le chiffre de 25 kilogrammes par tonne ordinairement adopté pour les machines à six roues accouplées; pour un poids moyen de 21 tonnes  $R = 525$  kilogrammes. On regarde ordinairement la résistance due au mécanisme comme constante, quel que soit le travail net de la machine. Cette hypothèse n'est pas exacte, mais les variations qui peuvent se produire dans la valeur de  $R$  sont trop faibles, eu égard au travail de la vapeur, pour qu'il y ait lieu d'en tenir compte.

En France, on admet le chiffre de  $\frac{1}{7}$  pour la valeur du coefficient d'adhérence. Sous le climat sec de la Grèce, on peut prendre  $\frac{1}{8}$  comme chiffre moyen. Le poids moyen étant de 21.000 kilogrammes, l'adhérence moyenne est de 3.500 kilogrammes.

Au moyen des résultats de la distribution que nous avons déterminés ci-dessus, nous pouvons calculer le travail de la vapeur sur les pistons pour chacune des positions du levier de changement de marche.

Soient :

$L_1$	la course du piston pendant l'introduction,
$L_2$	idem la détente,
$L_3$	idem l'échappement anticipé,
$L'_1$	idem l'échappement,
$L'_2$	idem la compression,
$L'_3$	idem la contre-pression ou l'admission anticipée exprimées en mètres,

$P_1$  la pression absolue de la vapeur d'admission exprimée en kilogrammes par centimètre carré,

$P_2$  la contre-pression supposée constante exprimée en kilogrammes par centimètre carré,

$S_1$  la surface du piston du côté avant, exprimée en centimètres carrés,

$S_2$  la surface du piston du côté arrière, exprimée en centimètres carrés,

$\lambda_1$  l'espace nuisible du côté avant rapporté à la longueur de course du piston,

$\lambda_2$  l'espace nuisible du côté arrière rapporté à la longueur de course du piston,

$\epsilon_1$  le travail exprimé en kilogrammètres de la vapeur sur la face avant du piston pendant une course,

$\epsilon_2$  le travail exprimé en kilogrammètres de la vapeur sur la face arrière du piston pendant une course.

On aura  $\epsilon_1$  et  $\epsilon_2$  par les équations

$$\epsilon_1 = \left\{ \begin{aligned} & S_1 P_1 \left[ L_1 + (L_1 + \lambda_1) \log \text{nep.} \frac{L_1 + L_2 + \lambda_1}{L_1 + \lambda_1} \right] + \\ & + S_1 P_2 L_3 - S_2 P_2 \left[ L'_1 + (L'_2 + L'_3 + \lambda_2) \log \text{nep.} \right. \\ & \left. \frac{L'_2 + L'_3 + \lambda_2}{L'_3 + \lambda_2} \right] - S_2 P_1 L'_3 \end{aligned} \right\},$$

$$\text{et } \epsilon_2 = \left\{ \begin{aligned} & S_2 P_1 \left[ L_1 + (L_1 + \lambda_2) \log \text{nep.} \frac{L_1 + L_2 + \lambda_2}{L_1 + \lambda_2} \right] + \\ & + S_2 P_2 L_3 - S_1 P_2 \left[ L'_1 + (L'_2 + L'_3 + \lambda_1) \log \text{nep.} \right. \\ & \left. \frac{L'_2 + L'_3 + \lambda_1}{L'_3 + \lambda_1} \right] - S_1 P_1 L'_3 \end{aligned} \right\}.$$

Si l'on admet, comme nous l'avons fait, que les différentes phases de la distribution soient identiques dans la course directe et dans la course inverse, hypothèse qui n'est pas exacte, mais qui se rapproche suffisamment de la

vérité, si l'on remplace en outre les espaces nuisibles  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  par leur moyenne arithmétique  $\lambda = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2}$ , le travail moyen par coup de piston

$$\varepsilon = \left\{ \frac{1}{2} (S_1 + S_2) \left[ P_1 \left[ L_1 + (L_1 + \lambda) \log \text{nep.} \frac{L_1 + L_2 + \lambda}{L_1 + \lambda} \right] + \right. \right. \\ \left. \left. + P_2 L_3 - P_2 \left[ L'_1 + (L'_2 + L'_3 + \lambda) \log \text{nep.} \frac{L'_2 + L'_3 + \lambda}{L'_3 + \lambda} \right] - P_1 L'_3 \right] \right\} \quad (1)$$

Cette formule est établie en admettant que la vapeur se comporte pendant la détente et la compression comme l'indique la loi de Mariotte, que les pressions  $P_1$  et  $P_2$  sont constantes, que dès le commencement de la période de l'échappement anticipé la pression  $P_1$  tombe à  $P_2$ , et que dès le commencement de l'admission anticipée  $P_2$  devient égal à  $P_1$ . Elle n'est pas rigoureusement exacte, mais elle fournit des résultats suffisamment approchés pour les besoins de la pratique.

Il convient de remarquer que, pendant la période de compression, la pression de la vapeur ne peut dépasser celle à laquelle elle a été amenée dans le cylindre, c'est-à-dire que la fonction  $\log. \text{nep.} \frac{L'_2 + L'_3 + \lambda}{L'_3 + \lambda}$  ne peut dépasser  $\log. \text{nep.} \frac{P_1}{P_2}$ .

Si  $\frac{L'_2 + L'_3 + \lambda}{L'_3 + \lambda} > \frac{P_1}{P_2}$ , on devra remplacer dans l'équation (1) les quantités  $L'_2$  et  $L'_3$  par les quantités  $L''_2$  et  $L''_3$ , déterminées par les conditions :

$$\begin{aligned} L''_2 + L''_3 &= L'_2 + L'_3, \\ \text{et} \quad L''_2 &= \frac{P_1 - P_2}{P_1} (L'_2 + L'_3 + \lambda), \\ \text{d'où} \quad L''_3 &= \frac{P_2 (L'_2 + L'_3) - (P_1 - P_2) \lambda}{P_1}. \end{aligned}$$

Le travail de la machine par mètre courant  $T$  est donné par l'équation  $T = \frac{4\varepsilon}{\pi D}$  (2),  $D$  étant le diamètre des roues.

La pression effective moyenne supposée constante pendant la course  $Q = \frac{2\varepsilon}{(S_1 + S_2)(L_1 + L_2 + L_3)}$  (3).

Le poids de vapeur dépensé par coup de piston  $\Pi$  est égal :

1° Au poids de vapeur fourni pendant l'introduction ou  $\frac{S_1 + S_2}{20.000} L \cdot \Delta$ ,  $\Delta$  étant le poids du mètre cube de vapeur à la pression  $P_1$  :

2° Au poids de la vapeur nécessaire pour porter la pression de l'espace nuisible de la pression  $1,033 \frac{L'_2 + L'_3 + \lambda}{L'_3 + \lambda}$  à la pression  $P_1$ , ce poids est égal à

$$\frac{S_1 + S_2}{20.000} \lambda \left( 1 - \frac{L'_2 + L'_3 + \lambda}{(L'_3 + \lambda) P_1} \cdot 1,033 \right) \Delta.$$

Cette expression ne peut être négative et elle doit être considérée comme nulle si  $\frac{L'_2 + L'_3 + \lambda}{(L'_3 + \lambda) P_1} \cdot 1,033 > 1$ ,

On a donc

$$\Pi = \frac{S_1 + S_2}{20.000} \Delta \left[ L_1 + \lambda \left( 1 - \frac{L'_2 + L'_3 + \lambda}{(L'_3 + \lambda) P_1} \cdot 1,033 \right) \right]. \quad (4)$$

Le travail d'un kilogramme de vapeur  $\theta = \frac{\varepsilon}{\Pi}$  (5). Le nombre de kilogrammes de vapeur dépensés par kilomètre  $K = \frac{1.000 T}{\theta}$  (6).

La consommation de combustible par kilomètre se détermine par les considérations suivantes. On admet généralement qu'un kilogramme de houille vaporise de 6 à 7 kilogrammes d'eau; vu la qualité médiocre de la houille

employée à Ergastiria, nous prendrons le chiffre le plus faible, 6 kilogrammes. La quantité de chaleur utilisée est donc  $6(606,5 + 0,305t - 20)$ ,  $t$  étant la température correspondant à la pression  $P_1$  et 20 la température de l'eau d'alimentation. On évalue ordinairement à un chiffre compris entre 30 et 50 p. 100 de la quantité de vapeur produite la quantité d'eau entraînée. La machine prime facilement sur les fortes pentes quand elle marche cheminée en arrière, parce que l'eau se porte alors sur l'avant du côté de la prise de vapeur. Nous admettons donc le chiffre de 50 p. 100. De là on déduit pour la quantité de charbon consommée par kilomètre

$$C = \frac{K}{6} + \frac{0,5 K(t - 20)}{6(606,5 + 0,305t - 20)}. \quad (7)$$

Les vitesses de marche de la machine correspondant aux diverses quantités de travail qu'on lui demande dépendent de la quantité de vapeur que la chaudière peut fournir. De nombreuses expériences faites au chemin de fer de Lyon ont montré que cette quantité n'augmente pas sensiblement avec la vitesse et qu'elle est d'environ 40 kilogrammes par mètre carré de surface de chauffe et par heure. En appliquant ce nombre aux machines Ergastiria, dont le foyer est relativement grand et les tubes très-courts, nous sommes certain de rester au-dessous de la vérité. La surface de chauffe totale étant de  $49^{\text{m}^2}, 58$ , la vaporisation par heure est de 1.983 kilogrammes. Les vitesses de marche correspondant aux diverses quantités de travail et exprimées en kilomètres seront données par l'équation

$$v = \frac{1.983}{K}. \quad (8)$$

$$\text{Dans l'espèce} \begin{cases} S_1 = 962, & S_2 = 942, & \frac{S_1 + S_2}{2} = 952, \\ \lambda_1 = 0,034, & \lambda_2 = 0,025, & \lambda = 0,030, \\ D = 0,90. \end{cases}$$

Les expériences faites sur le chemin de fer d'Orléans ont prouvé que, même aux grandes détentes, la pression dans le cylindre pendant l'admission est sensiblement égale à celle de la chaudière et la contre-pression égale à la pression atmosphérique, tant que la vitesse de marche ne dépasse pas un tour à un tour et demi par seconde. Nous donnons, *fig.* 15, Pl. VI, deux diagrammes qu'a bien voulu nous communiquer M. Deloy, ingénieur-inspecteur du matériel et de la traction au chemin de fer de Lyon, et qui ont été relevés par lui sur la ligne d'Orléans, sur des machines à marchandises, marchant à 35 p. 100 d'admission et à 8 atmosphères de pression dans la chaudière. Quand l'échappement est serré à fond, la contre-pression monte à  $1^{\text{atm}}, 5$ . Mais, pour le calcul des charges, on doit supposer l'échappement ouvert en grand.

La ligne pleine de la *fig.* 15, donne les contours du diagramme dont l'aire représente le travail réel d'une cylindrée de vapeur; la ligne pointillée, ceux du diagramme théorique dont l'aire est égale au travail  $\mathcal{C}$ , tel qu'il est fourni par la formule (1). On voit que l'aire du diagramme théorique est supérieure à celle du diagramme réel de la surface  $gbce'd'$ , mais qu'elle lui est inférieure de la surface des deux triangles curvilignes  $cdd'$ ,  $faa'$ . Il y a à très-peu près équivalence, et l'on peut accepter avec sécurité les résultats fournis par la formule (1), dans laquelle on fait  $P_1$  égal à la pression de la chaudière et  $P_2$  égal à la pression atmosphérique.

Le timbre des machines Ergastiria est de 9 kilogrammes, ce qui représente une pression absolue de  $10^k, 033$ . Pour laisser une certaine marge aux mécaniciens, nous admettons  $P_1 = 9$  kilog. La densité et la température de la vapeur correspondant à cette pression de 9 kilog. sont respectivement

$$\Delta = 4,300 \quad t = 174^\circ.$$

Introduisant ces données dans les équations ci-dessus, on obtient des résultats consignés dans le tableau suivant :

NUMÉROS des crans.	TRAVAIL de la vapeur par coup de piston. G	TRAVAIL brut de la machine par mètre parcouru. T	EFFORT de traction. T—R	PRESSION effective moyenne supposée constante pendant la course. Q	POIDS de vapeur dépensé par coup de piston. II	TRAVAIL d'un kilog. de vapeur. θ	POIDS de vapeur consommé par kilomètre. K	CONSOM- MATION de charbon par kilomètre. C	VITESSE en kilomètres par heure. V
				kilog.	kilog.		kilog.	kilog.	
8	3239	4580	4055	7,5	0,151	21450	214	40,0	9,2
7	3121	4417	3882	7,2	0,140	22314	198	37,0	10,4
6	2905	4108	3583	6,7	0,121	24008	171	32,0	11,5
5	2621	3706	3181	6,0	0,101	25950	143	26,7	13,1
4	2280	3224	2699	5,2	0,082	27804	116	21,7	17,1
3	1851	2617	2092	4,2	0,062	29855	87	16,3	22,1
2	1315	1859	1334	3,0	0,043	30581	61	11,4	32,1

Aux sixième, septième et huitième crans, l'effort de traction T—R est supérieur à l'adhérence moyenne. Le plus grand effort que la machine puisse développer est donc égal à son adhérence, 3.500 kilogrammes et est atteint par une marche très-voisine du sixième cran (admission 58 p. 100). Mais c'est là un maximum sur lequel on ne doit pas compter pour un service courant. Ordinairement on calcule le travail brut qu'une machine peut développer par la formule  $\frac{0,65pd^2l}{D}$ , dans laquelle  $p$  représente la pression effective dans la chaudière,  $d$  le diamètre des cylindres,  $l$  la course des pistons,  $D$  le diamètre des roues. On admet ainsi que la pression effective moyenne supposée constante pendant toute la course est égale à  $0,65 p$ . Dans l'espèce  $p=10$ ;  $0,65p=6,5$ . Pour obtenir cette pression moyenne de 6,5, il faudrait marcher avec une admission de 58 p. 100 environ, ce qui ne laisse pas

une marge suffisante pour parer aux accroissements accidentels de la résistance et n'assurerait pas une marche régulière.

L'effort de traction moyen que l'on peut demander avec sécurité à ces machines correspond à une admission de 40 p. 100 et est de 2.700 kilogrammes. La vitesse correspondante serait de 17 kilomètres à l'heure; la consommation de charbon par kilomètre, de 21<sup>k</sup>,7.

Pratiquement les machines remorquent :

Sur la rampe de 35 millimètres du versant de l'usine : en hiver, 12 wagons vides; en été, 14.

Sur la rampe de 26 millimètres de l'autre versant : en hiver, 6 wagons pleins; en été, 7, avec une vitesse de 12 kilomètres à l'heure.

Pour vérifier si ces résultats s'accordent avec ceux que fournit la théorie, il faut déterminer d'abord la résistance à la traction, soit en alignement droit, soit en courbe.

La proportion entre le diamètre des fusées et celui des roues restant la même, on peut admettre que la résistance à la traction sur palier en alignement droit est sensiblement la même sur la petite que sur la grande voie, pour des wagons également bien construits et graissés.

On compte généralement 3 kilogrammes par tonne pour la résistance à la traction d'un train de marchandises circulant en alignement droit à des vitesses modérées. C'est là le chiffre que nous adopterons.

La résistance en courbe demanderait à être déterminée par des expériences directes. Celles-ci manquant, nous allons essayer de l'apprécier approximativement par les considérations suivantes :

Cette résistance est due à deux causes principales qui sont : 1° le frottement provenant du parallélisme des essieux et de la différence de parcours de deux roues calées sur le même essieu et circulant l'une sur le rail intérieur, l'autre sur le rail extérieur; 2° le frottement et les chocs

des boudins et des bandages sur les rails et provenant soit de l'obliquité de la traction par rapport à l'axe de la voie, soit de la tendance de la roue d'avant à attaquer le rail extérieur de la courbe. — Si l'on cherche à se rendre compte du mouvement d'un wagon dans une courbe, on voit que l'ensemble des deux essieux occupant la position représentée par un trait noir (fig. 14, Pl. VII), le wagon pour avancer doit décrire autour de son centre de figure O, en glissant sur le rail, un arc de cercle tel que l'extrémité du boudin qui était en contact avec la face intérieure du rail extérieur se déplace de  $d'_1$  en  $d_2$ . Le contact du rail et du bandage se déplacera de l'arc  $i'_1 i_1$ . A partir de la position  $i_1$ , la roue cheminera en ligne droite, à cause du parallélisme des essieux jusqu'à ce que le boudin vienne en  $d'_2$  rencontrer le rail; là un nouveau déplacement se produit, le point de contact  $i'_2$  venant en  $i_2$  et ainsi de suite. Le chemin décrit par la roue est donc la ligne brisée  $i'_1 i_1, i_1 i'_2, i'_2 i_2, i_2 i'_3, i'_3 i_3$  etc., les parties  $i'_1 i_1, i'_2 i_2, i'_3 i_3$  etc. étant parcourues en glissant, les parties  $i_1 i'_2, i_2 i'_3, i_3 i'_4$  en roulant. La résistance additionnelle due à la différence de longueur des arcs intérieur et extérieur de la courbe et au parallélisme des essieux est donc égale au frottement de glissement qui s'opère sur les parties  $i'_1 i_1, i'_2 i_2, i'_3 i_3$  etc. — Or le rayon de ces petits arcs est égal à  $\sqrt{e^2 + d^2}$ ,  $e$  étant la demi-largeur de la voie d'axe en axe des rails,  $d$  le demi-écartement des essieux. L'angle  $\alpha$  est égal au déplacement angulaire du rayon R de la courbe, soit par mètre courant  $\frac{1}{R}$ .

L'amplitude du chemin parcouru par glissement est donc par mètre  $\frac{\sqrt{e^2 + d^2}}{R}$ , la résistance correspondante par tonne du poids circulant est  $1.000 f. \frac{\sqrt{e^2 + d^2}}{R}$ ,  $f$  étant le coefficient de frottement.

La composante de cette force suivant la tangente au rail  $1.000 f. \frac{e}{R}$  représente la résistance due à la différence de longueur des arcs intérieur et extérieur; la composante perpendiculaire à la précédente  $1.000 f. \frac{d}{R}$  représente la résistance due au parallélisme des essieux.

Quant à la deuxième cause d'augmentation de la résistance à la traction dans les courbes, le frottement et le choc des boudins sur les rails, elle dépend de la longueur des trains, du rayon des courbes, mais ne peut être analysée comme la précédente et doit être fournie par l'expérience.

Sur le réseau de la Méditerranée, on admet que la résistance additionnelle due au passage dans les courbes est inversement proportionnelle au rayon et indépendante de la vitesse, pourvu que le dévers soit suffisant. Les chiffres adoptés sont les suivants :

Résistance additionnelle exprimée en millièmes du poids des trains.

NATURE des trains.	NOMBRE moyen des wagons.	RAYON DES COURBES.					
		250	300	400	500	800	1000
Marchandises. . . . .	50	3	2,50	1,80	1,50	0,90	0,75
Voyageurs. . . . .	20	2,30	2,10	1,50	1,15	0,75	0,55
Express. . . . .	10	2,00	1,70	1,20	1,00	0,60	0,50

Si des nombres ci-dessus on retranche la résistance  $A'$  due au parallélisme des essieux et à la différence de longueur des rails, calculée d'après la formule  $1.000 f. \frac{\sqrt{e^2 + d^2}}{R}$ , on aura la résistance due aux autres frottements,  $A''$ .

On a :  $e = 0,75$ ,  $d = 1^m,36$  pour les wagons,  
 $1^m,80$  pour les voitures,  
 $2^m,00$  } pour les voitures à six roues  
des express.

Soit  $f = \frac{1}{6}$ .

On trouve ainsi, pour  $R = 250$  :

Marchandises . . . .	$A' = 1,00$	$A'' = 2,00$
Voyageurs . . . . .	1,50	1,00
Express . . . . .	1,40	0,60

Les nombres 2,0; 1,0; 0,60 sont à très-peu près proportionnels à la longueur moyenne des trains, qui est d'environ

350 mètres pour les marchandises,  
175 mètres pour les trains de voyageurs,  
105 mètres pour les express.

Nous calculerons donc la résistance additionnelle due aux courbes de divers rayons sur la voie d'un mètre, en ajoutant aux résistances telles que  $A'$ , données par la formule  $1.000 f \cdot \frac{\sqrt{e^2 + d^2}}{R}$ , les résistances telles que  $A''$ , obtenues en multipliant l'un des nombres ci-dessus, 2,00 par exemple, par le rapport des longueurs de trains et par le rapport  $\frac{250}{R}$ ,  $R$  représentant les rayons de 60 mètres, 70 mètres, etc.

Sur le chemin de d'Ergastiria,

$$e = 0,525, \quad d = 0,725;$$

la longueur d'un train de quatorze wagons est de 75 mètres, celle d'un train de sept wagons de 40 mètres.

Les machines formant une fraction importante du poids total des trains, il convient de calculer à part leur résis-

tance additionnelle en faisant  $d = 1,10$  dans la formule  $1.000 f \cdot \frac{\sqrt{e^2 + d^2}}{R}$ . On a ainsi obtenu les nombres suivants qui ne doivent être acceptés que comme une approximation assez vague de la résistance due aux courbes.

*Résistance additionnelle sur la voie d'un mètre exprimée en millièmes du poids des trains.*

COMPOSITION des trains.	RAYONS DES COURBES.								
	60	70	80	90	100	120	140	150	200
7 wagons. . . . .	3,7	3,1	2,7	2,3	2,2	1,8	1,6	1,4	1,0
14 wagons. . . . .	4,8	4,1	3,6	3,1	2,8	2,4	2,0	1,9	1,4

Nous pouvons maintenant calculer l'effort de traction développé par la machine remorquant quatorze wagons vides sur la rampe de 0,035 en courbe de 60 mètres de rayon et sept wagons pleins sur la rampe de 0,026 en courbe de 70 mètres de rayon.

La machine pesant au plus 22 tonnes.

Les wagons vides . . . . . 2.650 kilog.

Les wagons pleins . . . . . 8.650 kilog.

L'effort de traction est dans le premier cas

$$59,1(35 + 3 + 4,8) \text{ ou } 2.529 \text{ kilog.},$$

et dans le second

$$82,5(26 + 3 + 3,1) \text{ ou } 2.648 \text{ kilog.},$$

travail que la machine est capable d'effectuer, d'après le tableau donné page 408, avec une admission de 38 à 40 p. 100.

Sur la pente de 35 millimètres, le rapport du poids

remorqué au poids de la machine est  $\frac{57,1}{22}$  ou 2,59 et sur la pente de 26 millimètres  $\frac{60,5}{22}$  ou 2,75.

Pour avoir l'effort de traction moyen et par suite la consommation de combustible, on détermine le travail correspondant au parcours de chacune des parties de la ligne en tenant compte de la résistance additionnelle due aux courbes et à l'inclinaison de la voie. En additionnant les nombres ainsi obtenus, on a les résultats consignés dans le tableau suivant :

	PARCOURS des trains (mètres).	TRAVAIL NET de la machine (kilogram- mètres).	EFFORT de traction moyen (kilogram- mètres).	CONSUMMATION de charbon :	
				totale (kilog.).	par kilomètre de train (kilog.).
<i>Aller.</i> Poids brut du train, 59 <sup>t</sup> .100 :					
De l'usine au point culminant. . .	4.993	60.514.446	2.103	87	17,4
Du point culminant à Camaresa, où on laisse la moitié des wa- gons. . . . .	750	65.289	87	1	1,9
De Camaresa à Berzekô. . . . .	2.757	"	"	"	"
Ensemble pour l'aller. . . . .	8.500	10.579.435	1.244	88	10,3
<i>Retour.</i> Poids brut du train, 82 <sup>t</sup> .500 :					
De Berzekô au point culminant.	3.507	6.856.080	1.955	55	15,5
Machine seule du point culmi- nant à Camaresa et retour au col avec sept wagons pleins. . .	950	1.147.178	1.208	10	10,1
Du point culminant à l'usine. . .	4.993	"	"	"	"
Ensemble pour le retour. . . . .	9.450	8.003.258	847	65	6,8
Ensemble pour le voyage complet.	17.950	18.582.693	1.035	153	

On voit que l'effort moyen de traction sur la première section (rampe de 0,055) est de 2.103 kilogrammes, et sur la deuxième section (rampes de 0,017 à 0,026) de 1.992. C'est en effet ce que confirme la pratique ; la pression dans la chaudière étant aux environs de 9 kilogrammes, la machine remorque couramment sa charge sur la première section avec l'admission au troisième cran, sur la seconde avec l'admission variant du troisième au quatrième cran.

La consommation de charbon ainsi calculée serait de 153 kilogrammes par voyage complet. A ce nombre il faut ajouter : 1° le charbon employé à l'allumage, environ 80 kilogrammes par jour, soit en moyenne 27 kilogrammes par voyage ; 2° le charbon brûlé pendant la descente des pentes, les stationnements qui sont très-longes et les manœuvres, environ 30 kilogrammes par voyage. La consommation totale serait donc de 210 kilogrammes pour un parcours de 17<sup>k</sup>.950 ou 11<sup>k</sup>.7 par kilomètre.

Tels sont les résultats que pourraient obtenir de bons mécaniciens avec des machines bien entretenues et bien réglées.

En fait la consommation est plus considérable parce qu'on ne marche ordinairement qu'à une pression inférieure à 8 kilogrammes. Elle est de 15 kilogrammes de houille par kilomètre.

#### § 10. — Consommation d'eau.

La consommation de charbon (moins l'allumage et les stationnements) étant de 225 kilogrammes par voyage, la quantité d'eau vaporisée est de  $6 \times 225$  ou 1.350 kilogrammes.

Ajoutant 50 p. 100 pour l'eau entraînée, on a 2.025 litres par voyage, ce qui est à très-peu près la consommation réelle.

On a installé une prise près de la gare d'Ergastiria, sur la conduite d'eau de l'usine, qui est alimentée par une source. On pensait qu'elle suffirait, les soutes ayant une capacité assez grande pour contenir l'eau nécessaire à un voyage complet. Mais cette eau est un peu saumâtre, et l'on se décida à alimenter surtout au moyen d'une source voisine de Berzekô dont la qualité est meilleure. On y a installé une pompe à bras et un réservoir ; les machines y prennent leur approvisionnement autant que possible.

## CHAPITRE V.

## DÉPÔT.

## § 1. — Remise des machines.

La remise (*fig. 18, Pl. VIII*) est placée le long de la voie principale, un peu avant l'embranchement du premier hangar. Elle est disposée pour recevoir trois machines. Elle a intérieurement 9 mètres de largeur et 24<sup>m</sup>,60 de longueur. Les portes ont 2<sup>m</sup>,60 de largeur. Les fosses à piquer, au nombre de deux, ont 16 et 18 mètres de longueur. Elles sont revêtues en briques à l'intérieur. Les rails sont fixés sur des longrines en bois de 0,25 d'équarrissage encastrées dans la maçonnerie. Un réservoir d'eau de 6 mètres cubes est placé extérieurement au bâtiment. Celui-ci a coûté, y compris les fosses, 7.761<sup>f</sup>,50. La charpente seule, qu'il a fallu faire venir de France, a coûté 1.923<sup>f</sup>,56.

## § 2. — Atelier de construction et de réparation.

L'atelier de réparation est contigu à la remise et communique avec elle (*fig. 18, Pl. VIII*). Le bâtiment a 9<sup>m</sup>,60 de largeur intérieure et la même longueur que la remise. Il a coûté 8.514<sup>f</sup>,33, dont 2.136<sup>f</sup>,59 pour la charpente. On a transporté à côté du bâtiment principal la forge et la fonderie existant déjà à l'usine. L'atelier est mis en mouvement par une machine horizontale à détente variable, système Meyer, de la force de 8 chevaux. Le diamètre du piston est de 0<sup>m</sup>,230, la course de 0<sup>m</sup>,520. La chaudière est à foyer intérieur, timbrée à 5 kilogrammes; son diamètre est de 1<sup>m</sup>,25, sa longueur 3 mètres; le diamètre du bouilleur est de 0<sup>m</sup>,700. Elle a été fabriquée dans les ateliers de Combes, à Lyon, et a coûté, avec la machine, 6.300 francs rendue à Marseille.

L'arbre de transmission est porté par les entrants des fermes et placé suivant l'axe du bâtiment.

Les poulies tambour sont en deux pièces avec joint raboté, de manière qu'on puisse les enlever et les remettre sans déplacer l'arbre. Il y en a neuf, dont sept de 475 millimètres de diamètre sur 288 de largeur et deux plus grandes.

Elles ont coûté. . . . .	francs. 1.015,30
Les paliers, manchons, arbres et accessoires. . . . .	776,00
Les courroies. . . . .	497,00
Les frais de transport se sont élevés à. . .	380,25
Soit en tout pour la machine motrice et les transmissions. . . . .	8.968,55

La consistance de l'atelier est la suivante :

- 1° Un tour à fileter de 0<sup>m</sup>,280 de hauteur de pointes, banc coupé de 3<sup>m</sup>,25 de longueur; longueur entre pointes 2<sup>m</sup>,10; série de vingt-quatre engrenages, plateau à toc, grand plateau avec poupées à pompe, support à chariot pivotant, lunette à suivre, lunette ordinaire sur le banc, cône correspondant et clefs, série de vingt-quatre engrenages, poids 2.000 kilogrammes, ayant coûté avec tous ses accessoires. . . . . 3.500 francs.
- 2° Une machine à raboter, à table mobile et outil fixe; le porte-outil avec mouvement automatique horizontal; retour de la table avec double vitesse. Longueur à raboter, 1 mètre; largeur entre les montants, 0<sup>m</sup>,600; hauteur de la table à l'outil, 0<sup>m</sup>,40; avec transmission intermédiaire et crémaillère en fer, poids 1.650 kilog. 2.400
- 3° Machine à percer à colonne, plateau mobile, pression automatique et cône correspondant; distance du forêt au bâti, 0<sup>m</sup>,40; course du porte-forêt, 0<sup>m</sup>,180; diamètre à percer, 0<sup>m</sup>,038; poids 570 kilogrammes. . . . . 1.100
- 4° Une poinçonneuse-cisaille à excentrique, à manivelle à double effet sur la même face, lames obliques pour tôles et fer en barres; diamètre à percer, 0<sup>m</sup>,010, pour une épaisseur de 0<sup>m</sup>,006; distances des lames au bâti, 0,200; poulies folle et fixe; poids 920 kilogrammes; A reporter. . . . . 6.800

	francs.
Report. . . . .	6.800
prix. . . . .	950
5° Une machine à tarauder ordinaire, pouvant tarauder 0 <sup>m</sup> ,050, pesant 500 kilogrammes, transmission intérieure. . . . .	825
6° Un treuil à engrenages de 6 tonnes pour le levage. . . . .	515
7° Un cric à vis à main. . . . .	210
8° Un vérin à chariot et cliquet pour 15 tonnes. . . . .	275
9° Un ventilateur de 0 <sup>m</sup> ,50 de diamètre, arbre en acier. . . . .	275
10° Un étau à chaud. . . . .	275
11° Un étau à rotule double. . . . .	95
12° Un outillage d'ajusteur. . . . .	419
13° Un outillage de tourneur. . . . .	100
14° Un outillage de raboteur. . . . .	50
15° Filières, tarauds divers, tourne à gauche, etc., pour des locomotives. . . . .	1.200
Ensemble. . . . .	11.769

Aux machines et outils précédents on a joint un tour simple avec banc en fonte de 3 mètres, deux petites machines à percer, une grue en fonte de 1.000 kilog., deux petits ventilateurs, des forges, des tenailles, enclumes, marteaux, poinçons, étaux, compas et menus outils divers provenant des ateliers de l'usine.

Avec cet outillage, l'atelier suffit sans peine aux réparations courantes du matériel roulant et fixe du chemin de fer et des machines, wagons et appareils de l'usine. On y a construit une plaque tournante pour les locomotives et même une petite machine à vapeur. On y construit aussi tous les wagons du service de l'usine. Il lui manque, pour être à peu près complet, une machine à caler les roues de wagon et un tour double pour essieux montés. On a reculé devant le prix considérable de cette dernière machine (9.000 à 10.000 fr.); mais on sera obligé de faire bientôt cette dépense. La place de l'appareil a été réservée dans l'atelier, à côté de la machine motrice; la raboteuse sera alors mise à côté de la machine à percer.

L'atelier faisant en même temps les réparations du matériel de l'usine et celles du chemin de fer a une comptabilité à part et facture chacune des réparations ou fournitures effectuées à chacun de ces deux services, au prix de revient augmenté d'un tant pour cent, pour les frais généraux.

Le personnel de l'atelier se compose de :

	francs.	
1 tourneur payé. . . . .	250,00	par mois.
1 chaudronnier sur cuivre. . . . .	520,00	—
1 — sur fer. . . . .	280,00	—
1 chef d'équipe pour l'entretien des wagons. . . . .	250,00	—
1 ouvrier ajusteur pour les locomotives. . . . .	225,00	—
1 ajusteur pour travaux divers. . . . .	6,50	par jour.
4 — — — — —	3,60	—
4 forgerons. . . . .	5,60	—
5 apprentis forgerons et frappeurs. . . . .	2,55	—
1 chauffeur pour la machine de l'atelier. . . . .	2,70	—
1 fondeur à l'entreprise. . . . .	»	—
1 menuisier. . . . .	4,50	—
6 manœuvres. . . . .	2,25	—

Il est, ainsi que les mécaniciens et les chauffeurs, sous les ordres du mécanicien en chef de l'usine.

## CHAPITRE VI.

## RÉCAPITULATION DES DÉPENSES.

Voici la récapitulation des dépenses faites pour l'ensemble du chemin de fer :

NATURE DES DÉPENSES.	DÉPENSES partielles.	DÉPENSES totales par article.	DÉPENSES par kilom. de voie principale.	DÉPENSES par kilomètre de voie.
<b>I. — Construction de la voie</b> (suivant le détail donné, p. 47 et 48).	»	francs. 479.521,64	francs. 52.121,98	francs. 47.477,41
<b>II. — Matériel roulant.</b>				
<b>1° Machines.</b>				
1° Trois locomotives, 90.000 fr.; réception, 450 f.; emballage, 500 f.; transport, 11.006 <sup>1</sup> ,90; lanternes, 582 <sup>1</sup> ,10 . . . . .	francs. 102.539,00			
2° Remontage en Grèce . . . . .	2.080,00	104.619,00	11.371,63	10.358,31
<b>2° Wagons.</b>				
1° 27 wagons à frein à levier, à 1.500 fr. . . . . 40.500				
13 wagons à frein à vis, à 1.590 fr. . . . . 20.670	67.274,00			
Réception . . . . . 200				
Transport . . . . . 5.904				
2° 80 essieux montés à 247 <sup>1</sup> ,75 19.820	22.648,00	89.922,00	9.774,13	8.903,17
Transport . . . . . 2.828				
Ensemble pour le matériel roulant.	»	194.541,00	21.145,76	19.261,48
<b>III. — Dépôt.</b>				
1° Bâtiment de la remise des machines . . . . .	7.761,50			
2° Bâtiment de l'atelier . . . . .	8.514,33			
3° Machine motrice, chaudière, transmission, courroies . . . . . 8.588,30	8.968,55			
Transports . . . . . 380,25				
4° Machines, outils divers. 12.676,25	13.351,30			
Transports . . . . . 675,05				
Total pour le dépôt . . . . .	»	38.595,68	4.195,18	3.821,35
Total général . . . . .	»	712.658,32	77.462,92	70.560,24

## CHAPITRE VII.

## EXPLOITATION.

§ 1. — *Marché des trains.*

Ainsi qu'on l'a vu ci-dessus, le chemin de fer avait été projeté en vue d'un transport de 750 tonnes par jour. L'interdiction de l'exploitation des ecboladès a réduit ce chiffre à 250 tonnes provenant uniquement du transport des scories.

Il y a deux points de chargement des scories, l'un à Berzekô à 8.500 mètres de l'usine pour celles qui proviennent de Berzekô et de Megala Pefka, l'autre à Camarêsa, à 5.947 mètres d'Ergastiria, pour celles que fournissent l'amas du même nom et les amas de Sinterini, Barbaliaki et Carvalhos.

Les scories provenant des amas desservis directement par le chemin de fer sont exploitées au moyen d'embranchements provisoires; les wagons pénètrent dans le scorial même et l'on déplace la voie volante au fur et à mesure qu'on a épuisé ce dernier dans le voisinage. Les scories d'autres provenances sont apportées par des charrettes qui les déposent sur un quai de chargement placé le long de la voie à une hauteur à peu près égale à celle du bord supérieur des wagons. A l'usine, les wagons sont amenés auprès du gueulard des fours et déchargés sur la plate-forme sans aucune difficulté.

Les frais de chargement et de déchargement s'élèvent en moyenne à 0<sup>1</sup>.34 par tonne.

Il existe enfin, au col de la Rotonde, une carrière de pierres d'où l'on transporte de 400 à 500 tonnes par mois à l'usine, soit trois wagons environ par jour.

Dans les conditions de profil de la ligne, une machine

remorque deux fois plus de wagons vides sur la section de l'usine au col qu'elle ne traîne de wagons chargés sur l'autre versant. Le service est par suite organisé ainsi :

Le train part de l'usine avec douze ou quatorze wagons vides ; il arrive au col en 25 minutes (vitesse, 12 kilomètres à l'heure). Il laisse un wagon à la carrière, et la moitié des wagons restants à Camaresa, et arrive à Berzekô en 25 minutes, y compris 1 minute d'arrêt à la carrière, 2 minutes à Camaresa et 8 minutes à la prise d'eau (vitesse 15 kilomètres à l'heure). Les manœuvres prennent à peu près 10 minutes à Berzekô. Le train repart avec six ou sept wagons pleins et arrive au col en 20 minutes (trajet 3.500 mètres, vitesse 10 kilomètres). La machine laisse les wagons au col et va prendre six ou sept wagons à Camaresa ; elle les ramène au bout de 10 minutes, y compris 2 minutes d'arrêt à la Camaresa. La descente du col à l'usine s'effectue en 15 minutes (trajet 5000 mètres, vitesse 20 kilomètres à l'heure). Un voyage complet, aller et retour, dure donc 1 heure  $\frac{3}{4}$ .

On ferait donc facilement cinq et même six voyages par jour. On n'en fait actuellement que trois ou quatre.

On a eu beaucoup de peine à amener les mécaniciens à accepter les charges que peuvent normalement remorquer les machines. Les trains n'étaient composés au début que de huit à neuf wagons. Aujourd'hui ce nombre varie couramment de douze à quatorze, et si ce dernier chiffre n'est pas toujours adopté, au moins en bon temps, cela tient surtout au manque de matériel. En effet, il y a toujours un train en chargement, un en déchargement, un en route. Le nombre des wagons d'un train doit donc être au maximum le tiers du nombre total des wagons en service, soit dans l'espèce treize, puisqu'il y a en tout quarante wagons. Pendant les six derniers mois de 1873, le nombre moyen des wagons composant les trains a été de 12,2, la charge moyenne par train arrivant à l'usine de 73<sup>ton</sup>,2. Si le

nombre des wagons était suffisant pour que la composition des trains fût couramment de quatorze wagons, une seule machine faisant cinq trains par jour pourrait amener 420 tonnes à l'usine, et avec six trains, 504 tonnes.

En admettant deux machines en service en même temps, on pourrait transporter de 800 à 1.000 tonnes, pourvu que les manœuvres de chargement et de déchargement s'exécutassent rapidement et que les wagons fussent en nombre suffisant. Ce nombre devrait être de quatre-vingt-quinze environ, dont quatre-vingt-quatre en circulation et onze en réparation ou à l'entretien.

Deux machines, dont une en marche et une au repos, suffiraient donc amplement pour le service actuel. On en avait commandé trois en prévision d'un transport de 750 tonnes par jour.

#### § 2. — Descente des pentes.

Tous les wagons sont munis de freins à levier ou de freins à vis. On ne se sert des premiers qu'à la descente des pentes de 55 millimètres. Il y a par train un frein à vis pour quatre wagons. Quand le temps est humide, il y en a un par trois wagons.

Soit un train de douze wagons pleins descendant la pente de 55 millimètres. Son poids brut est de 113 tonnes. Il a neuf freins à levier et trois à vis. L'effort exercé sur le train par la pesanteur, diminué de la résistance au roulement, est de 32 kilogrammes par tonne en alignement droit ; soit en tout 3.616 kilogrammes.

L'action retardatrice du frein à levier est, pour une adhérence moyenne de 0,14, de 77 kilogrammes par wagon (voir ci-dessus, page 389) ; il reste donc à détruire un effort de 3.616 — 9.77 ou 2,923 kilogrammes. Or si l'on suppose que les freins à vis calent les roues sur lesquelles ils s'appuient, leur action est de

$$3.0,14.8710 = 3.658 \text{ kilogrammes.}$$

Elle est donc suffisante pour retenir le train même sans aucun effort de la machine.

En supposant l'adhérence tombée au  $\frac{1}{10}$ , l'action des freins est de

$$9,48 + 3.0,1.8710 = 5045.$$

La machine pourrait encore facilement retenir le train. Toutefois, la sécurité exige dans ce cas un frein à vis de plus.

Les mécaniciens emploient avec répugnance la contre-vapeur, qui serait pourtant utilisée avec avantage sur ces fortes pentes. Ils préfèrent se servir du frein de la machine dont la manœuvre est loin d'exiger autant de soin et d'attention que celle de la contre-vapeur, et surtout n'augmente pas la consommation de charbon.

Le personnel de l'exploitation se compose de :

	francs.	
1 serre-frein, chef de train, payé. . .	5,15	par jour.
2 serre-freins. . . . .	2,70	—
2 aiguilleurs. . . . .	2,50	—

### § 3. — Dépenses de traction.

Dans un pays pourvu de ressources industrielles, un mécanicien et un chauffeur eussent parfaitement suffi pour le service. Mais en Grèce, où l'on ne peut remplacer ces ouvriers spéciaux, il eût été dangereux de faire dépendre la marche du chemin de fer et, par suite, l'alimentation de l'usine du caprice ou de la santé d'un seul individu. On a donc dû doubler le personnel qui eût été suffisant partout ailleurs. Les mécaniciens n'ont en réalité que quinze jours de marche par mois; le reste du temps est employé au lavage et à l'entretien des machines. Leurs salaires et ceux des chauffeurs s'élèvent à 720 fr. par mois environ, soit 0<sup>f</sup>,12 par tonne amenée à l'usine. Le tiers de cette somme suffirait en France.

La consommation de combustible a été en moyenne, pendant les six premiers mois de 1873, de 15<sup>kil</sup>,3 par kilomètre de train et de 0<sup>kil</sup>,612 par tonne kilométrique utile, pour un nombre moyen de 9,88 wagons par train. Pendant les six derniers mois, pour un nombre moyen de 12,2 wagons par train, la consommation a été :

	kilog.
Par kilomètre de train, de. . . . .	15,4
Par tonne kilométrique utile, de. . . . .	0,555

L'augmentation de la charge des machines a naturellement amené une diminution dans la dépense de combustible rapportée à la tonne kilométrique utile.

On ne fait pas de distinction entre l'huile destinée au graissage des machines et celle qui sert aux wagons. La consommation moyenne par kilomètre de train est de 0<sup>k</sup>,076.

Le personnel se compose de :

	francs.	
1 mécanicien payé (y compris les primes). . . . .	325,00	par mois.
1 mécanicien payé (y compris les primes). . . . .	180,00	—
2 chauffeurs. . . . .	5,45	par jour.
1 manœuvre à la pompe de Berzekò. . . . .	2,70	—
1 nettoyeur à la remise. . . . .	2,25	—

### § 4. — Entretien des locomotives et des wagons.

Des conditions si difficiles de profil et de tracé de la ligne résulte nécessairement une dépense élevée d'entretien du matériel roulant. Les réparations portent principalement sur les foyers et les tubes et sur les bandages des machines, sur les freins et les bandages des wagons. On a dû changer le foyer d'une des machines qui a été brûlé par suite de la négligence d'un mécanicien ainsi que vingt tubes des rangs supérieurs. Cette machine venait d'être retubée à neuf après un parcours de 12.743 kilomètres. On a changé les

tubes de la locomotive n° 2 après un parcours de 6.875 kilomètres, et ceux de la locomotive n° 5 après un parcours de 9.627 kilomètres. On rallonge en cuivre rouge les tubes sortis pour les faire resservir. On a trouvé que les tubes en laiton s'usent très-rapidement du côté du foyer.

Les machines sont lavées et visitées chaque fois qu'elles sortent de service, ce qui a lieu à peu près régulièrement toutes les semaines.

§ 5. — *Entretien de la voie.*

Grâce à la solide construction de la voie et à l'emploi des rails en acier, l'entretien de la voie n'a nécessité jusqu'ici à peu près aucune dépense de matériel. L'usure des rails est presque nulle, même dans les courbes de petit rayon.

Le personnel se compose de :

1 chef poseur payé. . . . .	francs. 403,20	par mois.
2 chefs d'équipe. . . . .	5,57	par jour.
8 poseurs. . . . .	2,70	—
8 garde-voie. . . . .	2,25	—

Outre l'entretien de la voie proprement dite, il a à construire et à déplacer les voies volantes d'exploitation des scoriaux.

§ 6. — *Prix de revient.*

Pendant les six derniers mois de 1873, le transport s'est élevé (y compris les pierres de la carrière) à. . . . .	40.998 tonnes.
Le nombre de tonnes kilométriques à. . . . .	273.870 —
Le parcours des machines à. . . . .	10,411 kilom.
Le parcours des trains à. . . . .	9.503 —

Le prix de revient a été le suivant :

NATURE des dépenses.	DÉPENSES totales. (francs).	DÉPENSES par kilomètre de train.	DÉPENSES par tonne kilométrique utile.	DÉPENSES par tonne utile amenée à l'usine.
Traction. . . . .	15.536,44	1,670	0,057	0,378
Entretien de la voie. . . . .	10.619,32	1,142	0,038	0,259
— des bâtiments. . . . .	223,39	0,024	0,001	0,005
— des machines. . . . .	4.955,28	0,532	0,018	0,121
— des wagons. . . . .	4.020,19	0,432	0,014	0,097
Frais généraux. . . . .	2.910,28	0,313	0,010	0,071
Totaux. . . . .	38.264,90	4,113	0,138	0,931

Le prix de revient est donc de 0<sup>f</sup>,93 par tonne transportée, et d'un peu moins de 0<sup>f</sup>,14 par tonne et par kilomètre. L'élévation de ces chiffres provient du faible tonnage des trains résultant d'un profil et d'un tracé accidentés, du peu de parcours de la charge utile et du tonnage peu considérable que le chemin doit transporter.

Si l'on portait le transport à 750 tonnes par jour, le prix de revient pourrait être abaissé de 0<sup>f</sup>,05 et descendrait à 0<sup>f</sup>,09 au plus par tonne et par kilomètre, ou 0<sup>f</sup>,675 environ par tonne apportée à l'usine.

Même en l'état des choses, la construction du chemin de fer a été pour la compagnie une opération avantageuse; elle économise sur le transport environ 3 francs par tonne de scorie transportée, soit par an 220.000 francs. La dépense de premier établissement sera donc payée en trois ou quatre ans.

(La suite à la prochaine livraison.)

---

DESCRIPTION RAISONNÉE  
DE  
QUELQUES CHEMINS DE FER A VOIE ETROITE

Par M. Ch. LEDOUX, ingénieur des mines.

---

DEUXIEME PARTIE.

CHEMIN DE FER DE MOKTA-EL-HADID

---

CHAPITRE I (\*).

VOIE.

---



§ 1. — *Conditions d'établissement du chemin. — Construction.*

Les difficultés les plus grandes que puissent présenter le profil et le tracé se trouvent réunies dans le chemin de fer d'Ergastiria. Celui de Moktâ-el-Hâdid, au contraire, parcourt un pays peu accidenté, et a pu être établi dans des conditions de tracé les plus favorables.

Il a été construit pour amener à la mer les produits des mines de fer de Moktâ-el-Hâdid, province de Constantine (Algérie).

La société actuelle le trouva en mai 1865 à l'état d'é-

---

(\*) Nous devons la plupart des renseignements qui suivent à une obligeante communication de M. Parran, ingénieur des mines, directeur de la compagnie des minerais de fer magnétique de Moktâ-el-Hâdid.

bauche entre les mines et la Seybouse. Elle a eu à le compléter tout en l'exploitant, et l'a prolongé jusqu'à la darse du port de Bône, où sont installés les ateliers, remises, magasins et dépôt.

Le coût de construction du chemin n'est pas connu d'une manière précise.

§ 2. — *Plate-forme.*

La voie ayant 1 mètre de bord en bord intérieur des rails, la largeur de la plate-forme est de 4 mètres. En ajoutant un fossé de chaque côté, on arrive à une largeur totale de 7 mètres (*fig. 19, Pl. VIII*).

On conserve de chaque côté du ballast une banquette de 0<sup>m</sup>,70 qui pourrait sans inconvénients être réduite à 0,20 comme on l'a fait à Ergastiria. La largeur de la plate-forme serait alors de 5 mètres. En prenant en dehors de chaque fossé une largeur d'un mètre, la largeur normale de l'emprise serait de 9 mètres. Mais en Algérie, où les propriétaires ont l'habitude de laisser la paille sur pied après la récolte, et où les terrains incultes sont couverts en été d'herbes sèches, il faut, pour éviter les incendies, détruire les matières inflammables sur une bande étendue de chaque côté de la voie et par suite augmenter considérablement la largeur de l'emprise. Elle est en moyenne sur le chemin de fer de Moktâ de 14<sup>m</sup>,20; mais la compagnie est obligée, dans toutes les parties incultes, de louer aux propriétaires qui veulent bien s'y prêter une quantité de terrain suffisante pour porter à 40 mètres la largeur sur laquelle on détruit les herbes sèches à la fin du printemps.

Le chemin comporte sur son parcours en voie principale, voies de gare, de garage ou d'évitement un développement de 55.787 mètres et 4.512 mètres de voies de dépôt et voies accessoires, en tout 40.299 mètres.

La voie unique de la sortie de la gare de Bône à l'entrée de la gare de Moktâ a une longueur de 32.626 mètres. La

longueur totale de la voie principale est de 55<sup>k</sup>,600. La superficie des terrains occupés par cette voie est de 78 hectares, 7.647 centiares. Celle des voies de gare et voies accessoires à Bône et à Moktâ est de 24 hectares, 10 ares. La superficie totale est donc de 102 hectares, 8.647 centiares.

§ 3. — *Acquisitions de terrains.*

Le prix des terrains acquis à des époques différentes a été très-variable.

Pour le prolongement de la ligne à Bône, on a été forcé de traiter à l'amiable avec les propriétaires, le décret d'expropriation se faisant trop attendre.

Voici quelques-uns des prix payés pour des terrains acquis à l'amiable :

(1858) Prairie dans la plaine des Karézas de 600 à 800 l'hectare.	francs.
(1861) Prairie dans la plaine du lac Fezzara. . .	490,40 —
(1867) Jardins arabes aux environs de Bône. . .	2.500 —

§ 4. — *Plan et profil en long.*

Les courbes ont toutes un grand rayon; le plus faible est de 250 mètres.

Le point de départ (Bône) étant à la cote 5 mètres environ, le point d'arrivée (Moktâ) à la cote 26, la pente générale du chemin est très-faible. Elle est à peu près partout de un demi à un millimètre par mètre. En un point seulement, elle franchit un faîte peu élevé.

La rampe maximum à la montée est de 0<sup>m</sup>,0085 sur une longueur de 300 mètres. Elle est en courbe de 250 mètres sur 140 mètres de longueur.

Dans le sens de la descente, c'est-à-dire de Moktâ à Bône, la rampe maximum est de 0<sup>m</sup>,0065 sur 500 mètres de longueur. Elle est en courbe sur 1.380 mètres de rayon sur 161<sup>m</sup>,64.

§ 5. — *Ballast.*

On a tiré le ballast de plusieurs points, et son prix a varié de 3<sup>f</sup>,36 à 6<sup>f</sup>,50.

L'entretien s'effectue surtout avec le ballast d'une carrière voisine de la gare de Moktâ. Il est tiré d'une couche de quartzite décomposé et très-fissuré, dont le cassage est facile. Il revient, rendu sur place, à 5<sup>f</sup>,408.

§ 6. — *Traverses.*

Les traverses sont espacées en moyenne de 0,75 d'axe en axe. Elles ont une longueur uniforme de 1<sup>m</sup>,80 et une épaisseur de 0<sup>m</sup>,12.

La largeur des traverses de joint est de . . . . .	mètres.
Celle des traverses intermédiaires de . . . . .	0,20
	0,18

Elles sont en chêne zeen tiré des forêts de l'Algérie.

On les paye, rendues à Bône et munies d'S en	francs.
fer à leurs extrémités. . . . .	3,00
Leur entaillage coûte. . . . .	0,10
La carbonisation ou le flottage et la manutention. . . . .	0,15
Ensemble. . . . .	3,25

La conservation des bois du pays, employés comme traverses, est une question encore mal résolue. Gardant toujours de la sève, ils jouent et se fendent malgré les S en fer dont on garnit les bouts. Ce travail se continue même après un long séchage, et une fente amène rapidement la pourriture de la traverse.

La carbonisation n'a donné aucun résultat sensible.

Actuellement, on met les traverses en dépôt dans des bassins remplis d'eau de mer. On n'a pu encore apprécier d'une manière précise les résultats de ce flottage; toutefois ils paraissent être meilleurs que ceux de la carbonisation.

On a trouvé sur la ligne, en 1865, beaucoup de traverses en pin non injecté qu'il a fallu remplacer.

D'autres, en sapin injecté de sulfate de cuivre, sont en place depuis 1863 et se comportent fort bien.

On a remplacé en 1869. . . . .	4.769	traverses.
— en 1870. . . . .	3.087	—
Ensemble. . . . .	7.846	—

ce qui donne une moyenne de 5.923 sur 47.746 traverses. Mais cette période de temps n'est pas assez longue pour établir une moyenne exacte.

§ 7. — *Rails.*

Les rails primitivement employés étaient des rails Vignole en fer, de 20 kilog. le mètre, plus écrasés que ceux du type qui a été donné ci-dessus.

Ils avaient	}	88 millimètres de hauteur,
		50 — de largeur au champignon.
		75 — de largeur au patin.
		15 — d'épaisseur à l'âme.

Ils coûtaient, rendus à Bône, 23<sup>f</sup>,10 les 100 kilog.

Ils sont remplacés au fur et à mesure par les rails en acier Bessemer, un peu plus élancés, dont les dimensions ont été indiquées à propos du chemin de fer d'Ergastiria et qui sont représentés *fig. 1*, Pl. VII. Ils coûtaient, rendus à Bône, 28<sup>f</sup>,08 les 100 kilog., et coûtent maintenant 44 fr.

La longueur normale des barres est de 6 mètres; les sous-longueurs pour les courbes ont 5<sup>m</sup>,95.

Les éclisses, boulons et crampons sont ceux qui ont été décrits plus haut pour le chemin de fer d'Ergastiria.

Les joints des rails sont placés en porte-à-faux entre deux traverses plus rapprochées que les autres. Nous ne connaissons pas la longueur exacte de la portée de joint.

Prix de revient de 100 mètres de voie.

	francs.
4.000 kilog. de rails à 23 <sup>f</sup> ,10 les 100 kilog.	924,00
66 éclisses 1 <sup>k</sup> ,950 à 25 fr. les 100 kilog.	52,72
152 boulons (25 kil.) à 88 fr. les 100 kilog.	22,00
299 crampons (56 <sup>k</sup> ,810) à 53 fr. —	59,11
153 traverses à 3 <sup>f</sup> ,25 . . . . .	432,25
70 mètres cubes de ballast à 2 <sup>f</sup> ,30 (prix de la carrière). . . . .	161,00
Ballastage, pose et réglage. . . . .	170,00
Total. . . . .	1.772,08

ou 17<sup>f</sup>,72 par mètre courant.

Pour la voie en rails Bessemer à 28<sup>f</sup>,08, la plus-value pour 100 mètres (aux anciens prix du métal) est de 199<sup>f</sup>,20 et le prix de revient du mètre courant de voie est porté à 19<sup>f</sup>,71.

§ 8. — *Changements et croisements de voie.*

Nous ne connaissons pas le rayon adopté pour les changements de voie.

Le prix de revient est le suivant :

	francs.
Aiguillage (rails en fer et coussinets en fonte).	453,90
Branchement, contre-rails, cœur, coussinets en fonte (poids total 765 kilog.). . . . .	347,00
Châssis d'aiguillage en chêne de France assemblé. . . . .	251,00
Châssis de branchement en chêne de France assemblé. . . . .	215,25
Voie de raccordement, ballast et pose. . . . .	210,80
Total. . . . .	1.457,95

En substituant des traverses aux châssis, on a réduit ce prix à 1.100 francs. On a vu plus haut que sur le chemin d'Ergastiria, le prix de revient d'un embranchement, moins la pose, est de 565<sup>f</sup>,10; il est inférieur de 524<sup>f</sup>,10 au prix ci-dessus.

§ 9. — *Chariots roulants.*

On ne tourne pas les locomotives qui marchent indifféremment, cheminée ou foyer en avant. Les manœuvres de gare, remise et ateliers se font toutes au moyen d'aiguillages.

Il n'y a de chariots roulants que pour les wagons. Ils roulent sur une voie de 0<sup>m</sup>,85 de largeur dans une fosse de 0<sup>m</sup>,40 de profondeur et de 2<sup>m</sup>,50 de longueur.

Ils sont à châssis en bois et coûtent 572<sup>f</sup>,80.

§ 10. — *Signaux fixes.*

Les entrées en gare et changements de voie principaux sont simplement couverts par des disques d'aiguillage manœuvrés par le levier même qui fait agir les aiguilles. Ces appareils coûtent 110 francs. Ils sont munis d'une lanterne à feu rouge, vert et blanc coûtant 57 francs.

Il n'y a qu'un seul mât de signaux couvrant la voie de manœuvre des appontements. Il se manœuvre en place, est à palettes du modèle le plus simple, et coûte 99<sup>f</sup>,25 avec la lanterne.

§ 11. — *Barrières de passage à niveau.*

Les passages à niveau sur les routes nationales sont fermés simplement par deux barres mobiles, pivotant sur poteau. Cette fermeture très-simple a donné de bons résultats. La route de Bône à Guelma est certainement l'une des plus fréquentées du pays, et l'on n'a jamais eu de menace d'accident au passage à niveau, situé à 2 kilomètres de la première ville.

Le prix de revient de ce genre de barrières est de 147<sup>f</sup>,50.

§ 12. — *Clôtures.*

On a planté des haies vives le long d'une grande partie de la ligne. On a choisi pour cela :

- 1° Le figuier de Barbarie épineux;
- 2° L'aloès. — Ce dernier, défiant la dent des bestiaux, doit être préféré partout où les troupeaux mal gardés pourraient attaquer la haie;
- 3° Le tamarix maritime, dans les parties marécageuses.

§ 13. — *Alimentation.*

Il y a deux réservoirs d'alimentation composés d'une chaudière cylindrique en tôle, portée sur une charpente en bois. L'un est placé près des ateliers de Bône, et rempli par la machine de ces derniers; l'autre est à Moktâ et est alimenté par une pompe à bras.

§ 14. — *Bâtiments.*

Les bâtiments sont tous composés d'une charpente en bois, reconverte en tuiles et soutenue par des poteaux posés sur des dés en maçonnerie. Le coffrage est tout en planches ou en briques posées à plat.

La fig. 1, Pl. IX, donne le plan de la remise et des ateliers.

*Remise des locomotives.* — La remise contient deux voies sur fosses, un bassin de réserve, une pompe et une bache pour le lavage des chaudières. Elle a une largeur de 13 m., une longueur de 51 mètres, et peut abriter quatre locomotives sur chaque voie, soit huit en tout.

L'ensemble de cette construction a coûté 16.578 francs.

*Ateliers.* — Les ateliers sont contigus à la remise. Ils comprennent :

- 1° Un atelier de montage et de réparation pour les machines, muni de deux fosses;
- 2° Un atelier de réparation des wagons;
- 3° Un atelier contenant la fonderie, les forges, les tours et autres machines-outils;
- 4° Un atelier de charpente et menuiserie.

L'atelier de fonderies, forges, chaudronnerie et ajustage comprend :

- 1° Une fonderie avec deux cubilots et un four à cuivre avec les grues et autres accessoires;
- 2° Un moteur à vapeur et ses deux chaudières;
- 3° Un four à réchauffer, un four à bandages, le foyer avec un ventilateur qui dessert aussi la fonderie, et un marteau-pilon;
- 4° Trois grands tours dont un pour rafraîchir les bandages, une machine à raboter, une machine à percer, une machine à tarauder, une machine à poinçonner et à cisailier, une machine à caler et à décaler les roues des wagons, une presse hydraulique.

Ces ateliers et leur matériel ont coûté 160.594 francs.

Ils pourraient suffire à l'exploitation d'une ligne bien plus considérable que celle de Bône à Moktâ-el-Hâdid. Ils servent d'ailleurs en même temps à l'entretien du matériel de la mine.

§ 15 — *Postes des cantonniers et gardes.*

Ces postes sont placés à 3 kilomètres de distance les uns des autres. Ils se composent d'une maison couverte en tuiles et coffrée en bois. Ils mesurent 24 mètres carrés et ont coûté chacun 599<sup>f</sup>,70.

CHAPITRE II.

MATÉRIEL ROULANT.

§ 1. — *Locomotives.*

Les locomotives sont à six roues accouplées et portent leur eau et leur charbon.

Elles pèsent vides, 16.400 kilog.; en charge, 21.000 kil.

Les dimensions génériques sont les suivantes :

Chaudière. . . . .	Diamètre moyen. . . . .	0 <sup>m</sup> ,940
	Timbre. . . . .	9 atmosphères.
	Longueur de l'enveloppe du foyer. . . . .	1 <sup>m</sup> ,500
Grille. . . . .	Largeur de l'enveloppe du foyer. . . . .	0 <sup>m</sup> ,800
	Longueur. . . . .	1 <sup>m</sup> ,00
	Largeur. . . . .	0 <sup>m</sup> ,65
Foyer. . . . .	Surface. . . . .	0 <sup>m</sup> 2,650
	Hauteur du ciel au-dessus du cadre de l'avant. . . . .	1 <sup>m</sup> ,175
	Hauteur du ciel au-dessus du cadre de l'arrière. . . . .	0 <sup>m</sup> ,950
	Longueur intérieure en haut. . . . .	0 <sup>m</sup> ,910
	— — en bas. . . . .	1 <sup>m</sup> ,150
	Largeur intérieure en haut. . . . .	0 <sup>m</sup> ,664
Tubes. . . . .	— — en bas. . . . .	0 <sup>m</sup> ,650
	Du centre de la chaudière au ciel du foyer. . . . .	0 <sup>m</sup> ,125
	Nombres de tubes. . . . .	108
	Diamètre intérieur. . . . .	0 <sup>m</sup> ,041
Capacités. . . . .	Entre les plaques tubulaires. . . . .	5 <sup>m</sup> ,100
	Volume d'eau à 100 millimètres sur le ciel du foyer. . . . .	1.812 litres.
	Volume de vapeur correspondant à cette hauteur. . . . .	741 —
Soutes. . . . .	Volume total de la chaudière. . . . .	2.553 —
	Surface de chauffe du foyer. . . . .	4 <sup>m</sup> 2,12
	— des tubes. . . . .	45,05
Alimentation. . . . .	— totale. . . . .	47,17
	Capacité des soutes à eau. . . . .	510 litres.
Châssis. . . . .	— à charbon. . . . .	500 —
	1 pompe alimentaire.	
Roues. . . . .	1 giffard.	
	Écartement des longerons. . . . .	0 <sup>m</sup> ,840
	Perte-à-faux d'avant. . . . .	1 <sup>m</sup> ,658
Roues. . . . .	— d'arrière. . . . .	2 <sup>m</sup> ,558
	Largeur totale du tablier. . . . .	2 <sup>m</sup> ,500
Roues. . . . .	Longueur totale entre tampons. . . . .	7 <sup>m</sup> ,516
	Diamètre au contact. . . . .	0 <sup>m</sup> ,994
	Empattement (avant-milieu). . . . .	1 <sup>m</sup> ,500
Roues. . . . .	— (milieu-arrière). . . . .	1 <sup>m</sup> ,100
	— total. . . . .	2 <sup>m</sup> ,400

Mécanisme. . . . .	Diamètre des cylindres. . . . .	0 <sup>m</sup> ,300
	Course des pistons. . . . .	0 <sup>m</sup> ,460
	Longueur de la bielle motrice. . . . .	1 <sup>m</sup> ,240
	Course des excentriques. . . . .	0 <sup>m</sup> ,100
	Angle d'avance. . . . .	50 degrés.
	Longueur des barres. . . . .	0 <sup>m</sup> ,560
	Rayon de la coulisse. . . . .	0 <sup>m</sup> ,560
	Longueur de la bielle de suspension. . . . .	0 <sup>m</sup> ,280
	Longueur de la bielle de relevage. . . . .	0 <sup>m</sup> ,250
	Section des lumières d'admission. . . . .	55/220 millim.
	Recouvrement extérieur. . . . .	28 <sup>mm</sup> ,1/2
	— intérieur. . . . .	6 <sup>mm</sup> ,1/2
Section des lumières d'échappement. . . . .	65/220 millim.	
L'essieu moteur est l'essieu du milieu.		

## § 2. — Puissance de traction.

Les barres d'excentrique et la barre de relevage étant très-courtes, les résultats de la distribution laissent un peu à désirer : il y a des différences notables entre les longueurs des diverses périodes d'admission, de détente, etc., du côté des glissières et du côté opposé, dans la marche avant et dans la marche arrière; pour les courses du tiroir de 90 à 100 millimètres il n'y a pas avance, mais au contraire léger retard à l'admission. Même dans ces conditions défavorables, le diagramme de Zeuner (*fig. 2, Pl. XI*) donne encore des indications suffisamment approchées. Elles sont consignées dans le tableau suivant :

COURSE DU TIROIR.	AVANCES LINÉAIRES.	OUVERTURE maximum d'admission.	INTRODUCTION.		DÉTENTE.		ÉCHAPPEMENT anticipé.		ÉCHAPPEMENT.		COMPRESSION.		ADMISSION anticipée.
			p. 100 de la course.	mill.	p. 100.	mill.	p. 100.	mill.	p. 100.	mill.	p. 100.	mill.	
100	— 3,2	21,5	70,3	325,5	25,55	118	3,55	16	89,42	411	10,58	49	— 0,1
90	0,25	16,5	59,3	273	33,95	156	6,75	31	83,00	382	17,00	78	0
80	3,25	11,5	42,9	197	43,35	109	13,75	64	74,15	341	25,45	117	0,4
76	4	9,5	34,75	160	48,35	222	16,9	78	62,25	286	36,90	170	0,85
72	5	7,5	23,45	108	30,85	234	21,7	118	59,3	273	38,50	177	2,20
P. M. 69	6	6	8,5	39	52,60	242	38,0	179	40,65	187	50,65	233	8,70

Des résultats de la distribution, on déduit par les calculs donnés pages 403 et suivants les efforts de traction de la machine aux différents degrés d'admission.

Comme pour les machines Ergastiria, nous prendrons pour point de départ une pression initiale dans la chaudière inférieure d'une atmosphère à la pression indiquée par le timbre et nous supposerons la contre-pression égale à la pression atmosphérique. Nous ferons donc

$$P_1 = 8^{\text{t}},264 \quad P_2 = 1^{\text{t}},055 \quad \Delta = 5,981$$

$$\frac{S_1 + S_2}{2} = 696 \lambda = 0,040.$$

La pression dans la chaudière étant un peu plus faible et le diamètre des cylindres plus petit que dans les machines Ergastiria, on doit évaluer la résistance due au mécanisme à un chiffre inférieur à celui qui a été adopté ci-dessus pour ces dernières. Nous le supposerons de 20 kilog. par tonne, soit en tout 420 kilog.

Enfin, la production de vapeur, à 40 kilogrammes par mètre carré de surface de chauffe et par heure, est de 1.887 kilogrammes.

On a ainsi formé le tableau ci-joint :

COURSE du tiroir (mill.).	ADMISSION en centièmes de la course.	TRAVAIL brut par coup de piston (kilogram-mètres).	TRAVAIL brut par mètre parcouru (kilogram-mètres).	EFFORT de traction (kilogram-mètres).	PRESSION effective moyenne dans le cylindre (kilog.).	POIDS de vapeur dépensé par coup de piston (kilog.).	POIDS de vapeur consommé par kilomètre (kilog.).	TRAVAIL de 1 kilogr. de vapeur (kilogram-mètres).	VITESSE correspondant à la production de vapeur (kilog.).
		T	T	T—R	Q	II	K	0	V
100	71	2121	2715	2595	6,6	0,088	125	21642	15
90	59	1933	2474	2254	6,0	0,083	106	23289	18
80	43	1604	2053	1633	5,0	0,060	76	26733	24
76	35	1380	1766	1346	4,3	0,049	62	28163	30
72	23	1011	1294	874	3,1	0,035	44	28889	42

L'effort maximum de traction est de 2.595 kilogrammes, et il est bien inférieur à l'adhérence qui est de  $\frac{1}{6}$  21.000 ou 3.500 kilogrammes. On pourrait même supprimer l'accouplement de deux des roues; il resterait encore une adhérence de 2.550 kilogrammes, suffisante pour que la locomotive puisse marcher à une admission de 60 p. 100.

L'effort de traction correspondant à une admission de 40 p. 100 est de 1.489 kilogrammes. Celui des machines Ergastiria est de 2.700 kilogrammes. La différence considérable qui existe entre ces deux nombres provient de l'augmentation du diamètre des cylindres porté dans ces dernières de 0,50 à 0,35, et de la diminution du diamètre des roues réduit de 0<sup>m</sup>,994 à 0<sup>m</sup>,900.

La surface de chauffe des Ergastiria a subi une augmentation correspondante : la surface de chauffe du foyer a été

portée à 4<sup>m</sup>,32, au lieu de 4<sup>m</sup>,12; celle des tubes, de 45,05 à 45,56. Ceux-ci sont plus courts, 2<sup>m</sup>,92 au lieu de 3<sup>m</sup>,100; mais leur nombre est de 125 au lieu de 108, leur surface de chauffe est donc proportionnellement plus énergique.

§ 3. — *Prix et parcours des locomotives.*

Les locomotives Moktâ, comme celles du chemin de fer du Laurium, ont été construites par MM. André Kœchlin et C<sup>e</sup>. Elles ont coûté, rendues et montées à Bône, 29.854 fr.

Elles sont au nombre de cinq. Une sixième est commandée.

Elles ont parcouru en 1869 118.370 kilomètres, soit par machine 25.654 kilomètres.

§ 4. — *Voitures.*

Le chemin de fer de Moktâ-el-Hâdid n'admet point de voyageurs autres que les ouvriers de la mine ou le personnel d'administration de la compagnie. Ce transport est fait par deux breaks à terrasse, une voiture de 3<sup>e</sup> classe et des fourgons à bagages aménagés pour recevoir les ouvriers.

La hauteur du marche pied au-dessus du rail n'est que de 0<sup>m</sup>,55, ce qui supprime les trottoirs dans les gares.

Voici le prix de ces voitures construites dans les ateliers de la Buire à Lyon :

	DIMENSIONS de la caisse.	NOMBRE de places.	PRIX.
	mètres		francs
Break n° 1 à terrasse. . . . .	Longueur 4,280 Largeur 2,000 Hauteur 2,070	12	4.773,35
— n° 2 — . . . . .	Id.	12	3.680,00
Voiture de 3 <sup>e</sup> classe à trois compartiments.	Id.	30	2.620,00
Fourgons à freins, deux compartiments. . .	Id.	16	2.996,00

§ 5. — *Wagons à minerai.*

Les wagons à minerai sont les uns en bois et à tampons secs, les autres en fer et munis de ressorts de traction et de choc. Les premiers coûtent 1.800 francs, les seconds 2.200 francs. Leurs dimensions sont les mêmes.

Longueur intérieure de la caisse. . . . .	3 <sup>m</sup> ,060
Largeur — — — — —	1 ,415
Hauteur des côtés. . . . .	0 ,460
Hauteur des côtés d'avant et d'arrière. . . . .	0 ,600
Cube (non compris l'espace résultant de la surélévation des côtés d'avant et d'arrière). . . . .	1 <sup>m</sup> 3,992
Longueur entre tampons. . . . .	4 <sup>m</sup> ,020
Écartement des tampons. . . . .	1 ,240
Écartement des essieux. . . . .	1 ,45
Diamètre des roues au roulement. . . . .	0 ,60

Ils sont munis de freins à levier agissant sur une seule roue. Ils sont à volets tombants. Les *fig.* 2, 3, 4, Pl. IX, représentent un wagon à minerai en fer.

Ces wagons portent 5.000 kilogrammes.

Leur tare est : pour les wagons en bois. 1.900 kilog.  
— — — — — en fer. 2.100 —

Le rapport de la charge utile au poids mort est :

Pour les premiers. . . . . 2,6,  
Pour les seconds. . . . . 2,4.

Il y a deux cent vingt wagons en service.

## CHAPITRE III.

## EXPLOITATION.

§ 1. — *Entretien de la voie.*

Chacun des postes de cantonniers se compose d'un brigadier et d'un nombre d'auxiliaires variant de un à quatre, suivant les saisons. En temps normal, c'est-à-dire quand il n'y a pas de travaux de terrassements à faire, deux hommes suffisent à l'entretien de 5 kilomètres de voie.

Au commencement de l'été, pour la destruction des herbes, et à l'automne, pour le curage des fossés, les brigades sont renforcées.

De plus, une brigade volante, composée d'un chef poseur et de cinq ou six hommes, se porte sur les points où une réparation importante est à faire. — Ce personnel est sous les ordres d'un chef de service et de deux piqueurs.

§ 2. — *Traction.*

Le personnel de la traction et de l'exploitation proprement dite se compose de :

Chef de gare à Bône. . . . .	1
— à Mokta. . . . .	1
Sous-chefs de gare. . . . .	2
Chefs de trains, serre-freins. . . . .	4
Mécaniciens. . . . .	5
Chauffeurs. . . . .	3
Graisseurs, serre-freins. . . . .	4
Gardes. . . . .	12
Aiguilleurs. . . . .	6
Manceuvres. . . . .	10
Ensemble. . . . .	55

Aux ateliers, il y a soixante-dix ouvriers, dont cinquante

environ pour le chemin de fer et le reste pour les autres services.

Les trains comprennent quarante wagons à minerai, deux voitures et un wagon à frein.

Ils pèsent brut 310 tonnes, y compris le poids de la machine.

Le poids utile est de 200 tonnes.

La vitesse est de 17 kilomètres à l'heure.

Pendant plusieurs années, les trains ont marché à une vitesse de 23 kilomètres à l'heure; ils ne pesaient alors que 240 tonnes (dont 21 tonnes pour la machine); le poids utile était de 150 tonnes.

A la vitesse de 17 kilom., l'effort de traction des machines est de 2.500 kilogrammes environ. Le poids brut des trains étant de 310 tonnes, la résistance moyenne par tonne serait de 7<sup>k</sup>,4. Elle est en réalité beaucoup plus faible, parce que le profil de la ligne dans le sens du parcours de la charge est très-favorable et l'on n'utilise pas toute la puissance des machines. Aussi la consommation est-elle très-faible. Elle a été

En 1868, de. . . . .	7 <sup>k</sup> ,977	par kilomètre.
En 1869, de. . . . .	6,428	—
En 1870, de. . . . .	6,447	—
Moyenne des trois années. . . . .	6,650	—

On brûle du charbon ou un mélange de charbon et de coke.

Les trains chargés ont à gravir une rampe de 0,006 par mètre. Le travail de la machine correspond alors à très-peu près à son effort maximum de traction; d'ailleurs la rampe n'a que 500 mètres de longueur et les mécaniciens peuvent profiter de la vitesse acquise.

Dans l'autre sens, le train vide a à remonter une rampe de 8<sup>mm</sup>,5, en courbe de 250 mètres. La résistance par tonne est, en admettant 1 kilogramme pour la résistance

additionnelle due à la courbe,  $8,5 + 4,5 + 1$  ou  $14$  kilogrammes. La résistance totale  $110.14$  ou  $1.540$  kilogrammes, effort que la machine peut facilement faire.

Les machines du type Ergastiria donneraient un service plus avantageux. Leur effort maximum de traction étant de  $3.500$  kilogrammes, elles pourraient remorquer sur la rampe de  $6$  mill. environ  $100$  tonnes, soit quatorze wagons de plus que les machines Moktâ.

Celles-ci seraient bien appropriées à un service de voyageurs. Elles remorqueraient facilement un train de  $140$  tonnes, à la vitesse de  $35$  kilomètres à l'heure. L'effort de traction correspondant à cette vitesse est de  $1.100$  kilogrammes environ; la résistance moyenne par tonne ne devrait donc pas dépasser  $7$  kilogrammes, ce que permet certainement le profil de la ligne même à la remonte. On devrait, dans ce cas, supprimer l'accouplement des roues d'avant et ne conserver que quatre roues accouplées.

Le nombre des trains en temps normal est de sept par jour dans chaque sens, ce qui représente un transport de  $1.400$  tonnes utiles dans un seul sens. On pourrait, *avec le même service*, transporter dans l'autre sens  $1.000$  tonnes, soit en tout  $2.400$  tonnes.

Mais ce résultat est encore susceptible d'augmentation: on est loin d'utiliser tout le temps disponible; au lieu d'un point de croisement, on pourrait en avoir deux ou trois, et il serait facile d'intercaler plusieurs trains de voyageurs entre les trains de marchandises, si cela était nécessaire. Enfin l'emploi des locomotives du type Ergastiria permettrait d'augmenter dans une forte proportion la charge des trains. Nous pensons qu'avec ces modifications il serait possible de porter le transport à  $3.000$  tonnes dans les deux sens.

Nous ne pouvons donner le prix de revient de l'exploitation; mais il est facile de se rendre compte par les dé-

tails qui précèdent que celle-ci est très-économique et se fait dans des conditions tout à fait analogues à celles des grandes lignes.

#### CHAPITRE IV.

##### CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR LES LIGNES A VOIE D'UN MÈTRE.

L'exemple du chemin de fer de Moktâ-el-Hâdid montre le rendement considérable que peuvent atteindre les chemins à voie d'un mètre, établis dans des conditions favorables de profil et de tracé; celui du chemin d'Ergastiria prouve la possibilité de franchir des faîtes élevés avec des fortes rampes et des courbes de petit rayon. La réduction des charges, qui est la conséquence des rampes, ne serait pas un obstacle au développement du trafic si la majeure partie de la ligne ne comportait que de faibles pentes, ces points spéciaux pouvant être franchis en double traction et à faible vitesse.

Rien n'empêche de faire circuler sur ces petits chemins des trains de voyageurs marchant à la vitesse de  $50$  à  $55$  kilomètres à l'heure. A cette vitesse, le passage dans des courbes de  $120$  mètres de rayon n'offrirait aucun danger. Sur les points où la vitesse serait réduite à  $15$  ou  $20$  kilomètres, ce rayon pourrait descendre à  $100$  mètres sans inconvénients sérieux, même au point de vue de l'usure du matériel.

Dans ces conditions, avec les acquisitions de terrain et l'obligation de construire quelques gares, en très-petit nombre d'ailleurs et très-simples, le coût d'établissement ne dépasserait certainement pas  $60.000$  francs par kilomètre, et en évaluant à  $20.000$  francs par kilomètre l'achat du matériel roulant, on arrive à  $80.000$  francs pour la dépense totale par kilomètre.

Quant à l'exploitation, elle pourrait être très-économique, à la condition de réserver les gares proprement dites pour

les centres importants, de se contenter de simples haltes pour les autres points, de faire faire le service des billets, sauf aux stations, par les conducteurs de train, de n'avoir pas de service de nuit, enfin de limiter la vitesse à 35 kilomètres à l'heure pour les trains de voyageurs, très-peu nombreux d'ailleurs et réservés uniquement aux lignes fréquentées, et à 20 ou à 25 kilomètres pour les trains mixtes.

Les faibles vitesses permettent l'emploi d'un matériel léger, peu coûteux et très-avantageux au point de vue du rapport de la charge utile au poids mort.

MM. Thirion et Bertera pensent que de cette manière les frais d'exploitation ne s'élèveraient pas à plus de 66 p. 100 de la recette brute, cette recette étant de 7.000 francs par kilomètre. La proportion entre la recette nette et la recette brute augmentant avec cette dernière, on voit qu'il suffirait qu'elle fût de 10.000 à 11.000 francs pour couvrir l'intérêt du capital engagé.

Mais le plus souvent l'État, les départements ou les communes payent une subvention correspondant à peu près aux frais de construction de l'infrastructure de la voie. Ceux-ci étant de 40.000 francs environ par kilomètre, on voit que non-seulement la subvention à demander aux intéressés sera très-faible, mais encore que les capitaux à immobiliser par l'entrepreneur trouveront une rémunération assurée même avec un trafic très-restreint.

Ces considérations justifient donc l'opinion que nous avons exprimée au commencement de ce travail, savoir que l'adoption de la voie étroite est tout indiquée lorsque le trafic à desservir n'est pas très-considérable et que la question de soudure avec un réseau déjà existant n'est pas prépondérante.

Tel est le cas, en France, d'un certain nombre de chemins de fer d'intérêt local et, à l'étranger, de ceux qui doivent desservir des pays neufs, ne disposant que de fai-

bles ressources, et à qui leur situation isolée permet encore le choix de la largeur de la voie.

L'Algérie se trouvait précisément dans ces conditions, il y a quelques années, avant l'établissement du réseau actuel, et il est permis de croire que les intérêts de notre colonie, comme ceux du Trésor, eussent été mieux servis si l'on s'était décidé à y adopter la voie étroite, dont le chemin de Moktâ offrait un exemple très-satisfaisant.

Au 31 décembre 1872, le réseau algérien se composait de 513 kilomètres exploités, savoir :

	kilom.
Alger à Oran. . . . .	426
Philippeville à Constantine. . . . .	87
Ensemble. . . . .	516

	francs.	francs.
La construction avait coûté. . . . .	159.478.000, ou par kilom.	309.000
Le matériel roulant et l'outillage des ateliers. . . . .	9.970.000	— 19.500
La recette brute s'est élevée à. . . . .	5.416.200	— 10.496
Les frais d'exploitation à. . . . .	5.676.800	— 11.000

Les dépenses d'exploitation ont donc dépassé les produits. Mais ce résultat tient aux nombreux travaux de parachèvement qui ont suivi l'ouverture des lignes récemment construites, et la compagnie espère que très-prochainement les recettes suffiront à couvrir les dépenses d'exploitation.

Ainsi, en l'état, le desideratum pour les chemins de fer algériens est simplement de couvrir les frais d'exploitation. Il n'est pas question de servir l'intérêt du capital immobilisé, soit dans la construction, soit dans le matériel roulant.

Le résultat eût été tout autre si, au lieu de créer en Algérie un réseau construit et exploité comme en France, on eût adopté un type de chemins de fer plus modeste; si l'on eût proportionné, en un mot, la puissance de l'in-

strument de transport à l'effet utile qu'il était destiné à produire.

En supposant même que la dépense de construction et de matériel d'un réseau à petite voie se fût élevée à 100.000 fr. par kilomètre, chiffre qui eût permis un tracé très-favorable à l'exploitation, l'Algérie serait aujourd'hui dotée, avec *la même dépense*, d'un réseau de près de 1.700 kilomètres desservant toutes les parties du pays et suffisant pour satisfaire pendant de longues années à tous ses besoins.

On peut se demander, toutefois, si les populations et, dans une certaine mesure, l'administration, qui apportent dans notre colonie les procédés et les exigences de la mère patrie, se seraient contentées du service restreint dont nous avons esquissé les éléments. Mais ce qui ne peut guère faire l'objet d'un doute, c'est qu'il serait aujourd'hui plus avantageux pour l'Algérie et plus favorable à son développement de posséder 1.700 kilomètres de chemins de fer, même exploités modestement, que d'en avoir 516, pourvus, il est vrai, du service large et coûteux en usage sur les lignes à grand trafic.

## TROISIÈME PARTIE.

CHEMINS DE FER DE SAINT-LÉON (SARDAIGNE),  
DE ROCHEBELLE  
ET DE CESSOUS ET TRÉBAU (GARD).

---

 VOIE DE 0,80.
 

---

## CHAPITRE I.

## CHEMIN DE FER DE SAINT-LÉON.

## § 1. — Voie.

Le chemin de fer de Saint-Léon (Sardaigne) a été établi par MM. Petin et Gaudet pour transporter jusqu'à la plage de la Madeleine, sur le golfe de Cagliari, les minerais provenant des mines de fer du même nom. Il a été décrit par M. Leseure dans la première livraison, tome XII (1866), du *Bulletin de la Société de l'industrie minérale*.

Nous ne donnerons donc sur ce chemin que des renseignements très-sommaires, en insistant seulement sur certains faits nouveaux qu'une récente excursion en Sardaigne nous a permis de constater, et dont le mémoire de M. Leseure ne fait pas mention.

La longueur du chemin est de 15 kilomètres. A partir de Saint-Léon, la pente moyenne du premier kilomètre est de 40 millimètres; du deuxième kilomètre, de 20 millimètres; du troisième kilomètre, de 11 millimètres. Les courbes sont nombreuses et leurs rayons varient de 52 à 100 mètres. Sur le reste du chemin, la pente est inférieure à 10 millimètres, les contre-pentes sont faibles. Les rayons des courbes sont généralement supérieurs à 60 mètres.

L'écartement de la voie est de 0<sup>m</sup>,76 dans œuvre.

Le rail est à simple champignon. Celui-ci a 38 millimètres de largeur.

L'âme a 14 millimètres d'épaisseur près du champignon, 20 millimètres en bas. La hauteur totale est de 190, le poids de 15 kilogrammes par mètre, la longueur des barres de 6 mètres. Ils ne sont pas éclissés et reposent sur les traverses par l'intermédiaire de coussinets en fonte. La forme des rails est défectueuse; ils manquent de résistance transversale, et comme on a négligé de les incliner vers l'intérieur de la voie d'une quantité égale à la conicité des roues des machines qui est de  $\frac{1}{13}$ ; comme, de plus, on n'a pas ménagé de dévers dans les courbes, la pression des roues les fait plier entre deux traverses consécutives, surtout dans le voisinage des joints, de sorte que chaque file de rails serpente de part et d'autre de son alignement. La faiblesse de la résistance transversale des rails, l'absence d'éclisses rendent la voie mauvaise, principalement dans les courbes. Aussi les déraillements sont-ils fréquents, bien que la vitesse ne dépasse pas 8 à 10 kilomètres à l'heure.

Le jeu de la voie est de 16 millimètres pour les machines et de 25 millimètres pour les wagons.

Les traverses sont espacées de 0<sup>m</sup>,75 en alignement droit, de 0<sup>m</sup>,67 en courbe. Les traverses en bois qu'on avait placées au début de l'exploitation vers 1865, ont été complètement renouvelées en 1872.

Sur la section de Saint-Léon à Sainte-Lucie, on a mis des traverses en mélèze de 12 centimètres sur 12 centimètres d'équarrissage et de 1<sup>m</sup>,40 de longueur. Elles coûtent 1<sup>f</sup>,50.

Sur la section de Sainte-Lucie à la Madeleine (10 kilomètres environ), on a employé des traverses métalliques composées de deux semelles en fer de 5 millimètres d'épaisseur, ayant 0,16 de largeur sur 0,25 de longueur,

pliées à angle droit à leurs extrémités et portant les coussinets rivés (*fig. 5 et 6, Pl. IX*). Elles sont réunies par un seul rivet à une cornière en acier de 45 millimètres de hauteur et de 4 millimètres d'épaisseur. Elles pèsent 9<sup>k</sup>,400 sans les coussinets, 18 kilogrammes avec les coussinets, et coûtent 8 francs. Il y a huit traverses par barre en alignement droit, neuf en courbe. La surface d'appui des deux semelles n'est que de 8 décimètres carrés. Les machines pesant 6.600 kilogrammes, la charge de chaque essieu est de 5.300 kilogrammes; la pression reportée par les semelles sur le terrain est de 4<sup>k</sup>,12 par centimètre carré. Sur les chemins de fer ordinaires, avec des traverses en bois beaucoup plus lourdes, on ne dépasse guère 2<sup>k</sup>,5. Aussi est-il probable que, par les grandes pluies d'hiver, la terre sur laquelle s'appuient les semelles sera délayée et expulsée. De plus, la cornière est trop faible; elle se tordra, et son assemblage avec les semelles prendra bientôt du jeu.

Les traverses n'agissent pas seulement par leur surface d'appui pour répartir la pression sur le terrain, mais encore par leur poids qui donne de la stabilité à la voie. Les traverses métalliques de Saint-Léon sont très-légères et donnent une voie très-instable. On a dû renoncer à les employer dans les courbes, et il est douteux qu'elles fassent jamais un bon service.

## § 2. — Matériel roulant.

Les wagons pèsent de 1.310 à 1.450 kilogrammes et portent de 5.100 à 5.500 kilogrammes. Le rapport de la charge utile au poids mort est de 2,4. La caisse est en tôle, le châssis en bois. Ils sont montés sur roues en fonte, sans ressorts. Celles-ci n'ont point de conicité. Leur diamètre est de 0<sup>m</sup>,65. Elles font un mauvais service: les échauffements produits par les freins et les refroidissements plus ou

moins brusques qui en sont la suite occasionnent de fréquentes ruptures. L'absence de ressorts et le défaut de conicité fatiguent beaucoup la voie.

Les locomotives ont été fournies par le Creuzot.

Elles ont coûté 16.000 francs.

Les éléments principaux sont les suivants :

Diamètre du corps cylindrique. . . . .	0 <sup>m</sup> ,760
Longueur entre plaques tubulaires. . . . .	1,780
Nombre de tubes. . . . .	73
Diamètre des tubes. . . . .	0 <sup>m</sup> ,035
Surface de chauffe du foyer. . . . .	2 <sup>m</sup> <sup>2</sup> ,174
— des tubes. . . . .	14,236
— totale. . . . .	16,410
— de la grille. . . . .	0,500
Timbre. . . . .	9 atmosph.
Capacité des soutes. Eau. . . . .	0 <sup>m</sup> <sup>3</sup> ,700
— Charbon. . . . .	0,160
Eau dans la chaudière 10 centimètres au-dessus du ciel. . . . .	0,750
Poids de la machine vide. . . . .	5.200 kilog.
— en charge. . . . .	6.790
Diamètre des cylindres. . . . .	0 <sup>m</sup> ,204
Course des pistons. . . . .	0,360
Diamètre des roues au contact. . . . .	0,760
Écartement des essieux. . . . .	1,25
Longueur entre tampons. . . . .	4,60
Angle d'avance. . . . .	30°
Recouvrement intérieur. . . . .	0 <sup>m</sup> ,002
— extérieur. . . . .	0,0095
Rayon d'excentricité. . . . .	0,0225
Course des tiroirs. . . . .	0,045
Section des lumières d'admission. . . . .	16/160
— d'échappement. . . . .	30/160 millim.
Longueur des barres d'excentriques. . . . .	0 <sup>m</sup> ,904
— de la coulisse. . . . .	0,160
Volume moyen de l'espace nuisible. . . . .	0,925

Le diagramme de la distribution est donné fig. 4, Pl. XI. Les résultats sont consignés dans le tableau suivant :

COURSE DU TIROIR (mill.)	AVANCES LINÉAIRES à l'admission (mill.)	OUVERTURE MAXIMUM des lumières d'admission (mill.)	ADMISSION		DÉTENTE		ÉCHAPPEMENT anticipé		ÉCHAPPEMENT		COMPRESSION		ADMISSION anticipée	
			en centièmes de course.	en millièmes.	en cent. de course.	en millièmes.	en cent. de course.	en millièmes.	en cent. de course.	en millièmes.	en cent. de course.	en millièmes.	en cent. de course.	en millièmes.
45	1,7	16	78,5	283	16,9	61	4,6	16	90,8	327	9	32	0,2	1
36,8	2,7	8,9	65	234	26,2	94	8,8	32	84,0	302	15	54	1	4
31,3	2,9	6,2	50	180	34,8	125	15,2	55	75,2	271	22,9	82	1,9	7
28,9	3,0	4,9	40	144	40	144	20,0	72	68,2	246	28,9	104	2,9	10
27,1	6,3	4,2	30	108	43	155	27	97	61,6	222	33,7	121	4,7	17
26,1	6,6	3,5	20	72	46,5	167	33,5	121	52,1	188	39,7	143	8,2	29
25,5	6,7	3,3	13	47	44	158	43	155	42,2	152	44,8	161	1,3	47

On remarquera combien sont faibles les ouvertures maxima d'admission. Ce résultat est dû à la petitesse de l'excentricité. Il a pour conséquence un étranglement très-grand de la vapeur à l'admission. De plus, de très-petites variations de la course du tiroir suffisent pour modifier toute la distribution, et ces variations sont inévitables en service, soit par suite de l'usure des pièces, soit par suite de leur élasticité sous les efforts considérables qu'elles transmettent. Enfin, pour des admissions de 20 à 30 p. 100, les périodes de compression et d'admission anticipée sont trop longues.

Cette distribution laisse donc à désirer.

Le travail de la machine aux différentes admissions et les quantités de vapeur consommées ont été calculées comme nous l'avons déjà fait pour les locomotives d'Ergastiria et de Mokta. Nous ferons  $P_1 = 8,264$ ,  $P_2 = 1,033$ .

On a d'ailleurs  $\frac{S_1 + S_2}{2} = 320 \lambda = 0.029$ . Nous ferons remarquer qu'à cause de l'étranglement de la vapeur d'admission la formule qui donne le travail par coup de piston donne peut-être des résultats un peu trop forts.

On peut estimer la résistance due au mécanisme à 16 kilog. par tonne, soit à 109 kilog. La quantité de vapeur produite par heure est de  $16,4 \times 40$  ou 656 kilog.

ADMISSION en centièmes de la course.	TRAVAIL brut par coup de piston C (kilogram-mètres).	TRAVAIL brut par mètre parcouru T (kilogram-mètres).	EFFORT de traction T - R (kilogram-mètres).	PRESSION effective moyenne dans le cylindre Q (kilog.)	POIDS de vapeur dépensé par coup de piston II (kilog.)	POIDS de vapeur dépensé par kilomètre K (kilog.)	TRAVAIL de 1 kilogr. de vapeur θ (kilogram-mètres).	VITESSE correspondante à la production de vapeur V (kilom.)
78,5	776	1298	1189	6,8	0,039	65	19897	10
65	703	1176	1067	6,1	0,032	53	21969	12
50	599	1002	893	5,2	0,025	42	23860	15
40	513	858	749	4,5	0,020	33	25650	20
30	403	674	565	3,5	0,016	27	25187	24
20	271	453	344	2,3	0,011	18	24636	36

L'effort maximum de traction est donc de 1.189 kilog. Mais l'adhérence étant seulement de  $\frac{1}{7}$ . 6800 ou 971 kil., la machine ne peut développer son effort maximum qu'à la condition que le coefficient atteigne  $\frac{1}{6}$ . A l'admission de 40 p. 100, l'effort de traction est de 749 kilog., la vitesse correspondante de 20 kilom. à l'heure.

La comparaison des nombres qui représentent le travail d'un kilogramme de vapeur montre que ceux-ci n'augmentent pas suffisamment avec le degré de détente et que les défauts de la distribution influent d'une manière très-sen-

sible sur le travail de la machine. On verra que ces inconvénients ne se retrouvent pas dans le type Cessous et Trébiau que nous étudierons plus bas.

### § 3. — Exploitation.

Les trains se composent de douze wagons portant en moyenne 40 tonnes de minerai, et pesant brut, non compris la machine, 56<sup>t</sup>.5. Sur la section de Saint-Léon à Sainte-Lucie, ils descendent seuls, sur freins, et sont dédoublés à la remonté. Il y a ordinairement deux trains en même temps sur la ligne; ils se croisent à l'une des stations intermédiaires. La durée totale du parcours est, y compris les manœuvres, de quatre heures et demie. La vitesse normale de marche est de 8 kilomètres. On fait quatre ou six trains par jour, suivant la saison. Le transport est donc en hiver de 160, en été de 240 tonnes par jour. Sur une voie bien établie, on pourrait porter la vitesse à 15 kilomètres à l'heure au moins, et par suite doubler le chiffre du transport. Mais l'état de la voie est tel qu'il serait dangereux de marcher à cette vitesse.

Pour avoir l'effort de traction réel de la machine, remorquant six wagons vides, soit 9<sup>t</sup>.9 sur une rampe de 40 millimètres par mètre et dans des courbes de 50 mètres de rayon, il faut déterminer la résistance au roulement des wagons et la résistance additionnelle due au passage dans les courbes.

La voie étant mal établie et les wagons étant dépourvus de ressorts, on peut admettre 4 kilog. par tonne pour la résistance sur palier en alignement droit.

Nous calculerons la résistance additionnelle due au passage dans les courbes, comme nous l'avons déjà fait, en ajoutant à la résistance due au parallélisme des essieux et

à la différence de longueur des rails,  $1.000 f \frac{\sqrt{e^2 + d^2}}{R}$ ,

le produit du chiffre 2 par le rapport  $\frac{250}{R}$  (R étant le rayon de la courbe) et par le rapport  $\frac{l}{352}$ , l étant la longueur du train.

$$\text{On a, dans l'espèce } \begin{cases} e = 0,3, \\ d = 0,375 \text{ pour les wagons,} \\ d = 0,625 \text{ pour les machines,} \\ l = 21, \\ R = 50. \end{cases}$$

La résistance additionnelle due au passage dans une courbe de 50 mètres de rayon et pour un train de six wagons serait de  $2^k, 1$ .

Le travail par mètre courant est donc

$$(9,9 + 6,8)(40 + 4 + 2,1) = 770 \text{ kilog.}$$

Ce travail correspond à une admission de 42 p. 100.

La consommation de charbon est de 250 kilog. par voyage complet aller et retour, soit 7 kilog. par kilomètre de train.

L'usure des boudins des machines, ainsi que celle du rail extérieur dans les courbes, sont très-rapides.

Le personnel d'un train se compose de six serre-freins, un mécanicien et un chauffeur.

En 1873, le personnel du chemin de fer était ainsi formé :

- 1 chef de traction.
- 4 mécaniciens.
- 4 chauffeurs,
- 12 serre-freins,
- 6 cantonniers,
- 6 poseurs,

non compris le personnel extraordinaire employé à la réfection de la voie qui n'était pas encore complètement achevée.

Voici le prix de revient de l'exploitation de l'une des dernières années pour un transport de 21.000 tonnes :

	Par tonne transportée.	Par tonne kilométrique.
Main-d'œuvre. . . . .	0,79	0,055
Combustible. . . . .	0,22	0,015
Entretien du matériel. . . . .	0,56	0,024
Entretien de la voie. . . . .	0,25	0,015
Frais généraux. . . . .	0,12	0,008
Total. . . . .	1,72	0,115

## CHAPITRE II.

### CHEMIN DE FER DE ROCHEBELLE (GARD).

Ce petit chemin de fer a été établi par la compagnie des Fonderies et Forges d'Alais pour amener à Tamaris les charbons provenant de la mine de Rochebelle. Sa longueur n'est que de 1.861 mètres. Comme nous étudierons plus loin avec quelque détail le chemin de fer de Cessous et Trébiau qui fonctionne dans des conditions analogues à celui de Rochebelle, il est inutile de décrire ce dernier.

Nous étudierons seulement le fonctionnement des locomotives qui y circulent et qui sont du même type que celles de Saint-Léon.

Le chemin part du puits Sainte-Marie; il est en palier sur 71 mètres; il s'élève ensuite en rampes de 0,012 sur 357 mètres, de 0,0075 sur 602 mètres, pour redescendre sur Tamaris avec une pente de 0,018 sur 486 mètres; il franchit le Gardon sur un pont en tôle de 155 mètres de longueur en palier. L'extrémité du chemin est en rampe de 0,008. Le rayon minimum des courbes est de 60 mètres; il est ordinairement de 100 mètres.

Les locomotives remorquent 20 wagons pesant vides 500 kilog., pleins, 1.500 kilog.

Pour calculer le travail de la machine, il faut déterminer la résistance à la traction des trains en alignement droit et

dans les courbes de 60, 65 et 100 mètres de rayon. Les wagons sont de simples wagons de mines dont le graissage est très-imparfait. On peut compter 12 kilog. par tonne pour la résistance à la traction de ces véhicules en alignement droit. La résistance additionnelle en courbe, calculée comme nous l'avons fait ci-dessus, est la suivante :

	kilog.
En courbe de 60 mètres. . . . .	2,7
— de 65 — . . . . .	2,5
— de 100 — . . . . .	1,6

La résistance d'un train de vingt wagons pleins sur la rampe de 0<sup>m</sup>,012 et en courbe de 60 mètres de rayon est donc

$$50(12 + 12 + 2,7) + 6,8(4 + 12 + 2,7) = 928 \text{ kilog.},$$

et dans une courbe de 100 mètres de rayon

$$50(12 + 12 + 1,60) + 6,8(12 + 4 + 1,6) = 888 \text{ kilog.},$$

travail que la machine peut effectuer à une admission de 50 à 58 p. 100.

Dans l'autre sens, la résistance d'un train composé de vingt wagons vides sur la rampe de 18 millim. et dans une courbe de 65 mètres est seulement de

$$10(18 + 12 + 2,5) + 6,8(18 + 4 + 2,5) = 537 \text{ kilog.}$$

Le temps du parcours est de 21 minutes environ pour un voyage complet, aller et retour. En défalquant 5 minutes pour les manœuvres, on trouve que la vitesse est 14 kilom. à l'heure, chiffre qui correspond à celui que donne le tableau ci-dessus.

La force des machines est donc complètement utilisée sur le chemin de Rochebelle, tandis qu'elle ne l'est pas sur celui de Saint-Léon.

La consommation de combustible est par mois de 12.000 kilog. pour un parcours de 1.950 kilog., soit 12<sup>t</sup>,6

par kilomètre. Ce chiffre comprend l'allumage et les manœuvres.

En 1873, pour un transport de 66.000 tonnes, le prix de revient de l'exploitation a été de 0<sup>f</sup>,33 par tonne, ou 0<sup>f</sup>,177 par tonne kilométrique.

## CHAPITRE III.

## CHEMIN DE FER DE CESSOUS ET TRÉBIAN (GARD).

## § 1. — Renseignements généraux. — Tracé.

Le chemin de fer de Cessous et Trébian a été établi de 1866 à 1868 pour relier la mine de houille de ce nom à l'embranchement de la Vernarède, qui part de Chamborigaud (ligne de Saint-Germain-des-Fossés à Nîmes). Le point de jonction est à la Jasse, sur la rive gauche du ruisseau l'Oguègne; la mine est ouverte dans la vallée de Cornas. Ces ruisseaux, qui se jettent tous deux dans le Luech, sont séparés par des contre-forts puissants formés de micascchite, tantôt dur, tantôt argileux, et qu'on a traversés au moyen de trois tunnels ayant respectivement 503, 53 et 463 mètres de longueur.

La vallée de l'Oguègne a été franchie au moyen d'un pont métallique (*fig.* 1, Pl. X) porté sur cinq piles dont la plus élevée a 51 mètres de hauteur. Le tablier a 171 mètres de longueur, pèse 1.200 kilog. par mètre courant et a coûté tout monté 66.000 francs. La longueur totale de l'ouvrage, y compris les culées, est de 250 mètres. Il a coûté 210.000 fr. Le chemin de fer devait primitivement être desservi par des chevaux. C'est pourquoi on n'a pas donné au tablier une résistance suffisante pour y faire circuler les machines. Celles-ci s'arrêtent donc à l'extrémité du viaduc, distant de 2.311 mètres de l'entrée de la mine. Elles pénètrent dans cette dernière jusqu'au puits n° 3 situé

à 1.482 mètres du jour, par une longue galerie à travers bancs percée en partie dans le micaschiste, en partie dans le terrain houiller. La petite carte (fig. 7, Pl. IX), qui montre l'ensemble du tracé, est extraite de l'étude sur le bassin de Portes par M. Sarran (*Industrie minière*, t. XIV, 1<sup>re</sup> livraison).

On n'exploite que les couches situées entre le puits n° 3 et la limite sud de la concession. La concession de Comberonde vient d'être réunie à celle de Cessous. On compte pousser la grande galerie de Cornas jusqu'au puits de la Serre actuellement en fonçage, à 1 kilomètre au sud-est du château de Portes. La longueur totale de la galerie desservie par les locomotives sera alors de 3.200 mètres environ, la longueur totale du chemin de 5.500 mètres, dont 4.221 mètres en souterrain.

On voit par ces détails les obstacles considérables que l'on a eu à surmonter, et les sacrifices de temps et d'argent qu'il a fallu faire pour doter les mines de cette région de moyens de transport économiques. Les dépenses de construction pour les 2.311 mètres de voie compris entre l'extrémité est du viaduc et l'entrée de la galerie ont été de 475.139<sup>f</sup>,60 (non compris les frais généraux de direction), soit 204.734 francs par kilomètre. Les difficultés toutes spéciales que l'on a eu à vaincre expliquent l'élévation de cette dépense, qui ne saurait évidemment être prise pour base du coût du kilomètre de voie dans des circonstances ordinaires.

### § 2. Souterrains. — Rampes et courbes.

Le profil des galeries est représenté (fig. 2, Pl. X).

La section (y compris l'espace occupé par le ballast) est de 6<sup>m²</sup>,87 pour une voie, et de 12<sup>m²</sup>,97 pour deux voies. Une grande partie est murillée. Les prix actuellement payés sont les suivants par mètre courant :

	francs.
Avancement à 3 <sup>m</sup> sur 2 <sup>m</sup> dans les schistes houillers . . . . .	130,00
— dans les grès . . . . .	180,00
Prix moyen . . . . .	155,00

#### Élargissement et muraillement à petite section (une voie),

Élargissement.	Mineurs . . . . .	82,50	francs.
	Bois . . . . .	10,00	
	Déblais, transports . . . . .	12,00	
Maçonnerie.	Main-d'œuvre . . . . .	28,00	70,00
	Transport de matériaux . . . . .	10,00	
	Sable, chaux, pierre . . . . .	30,00	
	Cintres et divers . . . . .	2,00	
	A reporter, avancement . . . . .	155,00	
	Coût du mètre de galerie terminée . . . . .	329,50	

#### Élargissement et muraillement à grande section (deux voies).

	francs.		
Élargissement.	Mineurs . . . . .	125,00	francs.
	Bois . . . . .	25,00	
	Déblais et transport . . . . .	18,00	
Maçonnerie.	Main-d'œuvre . . . . .	40,00	95,00
	Transport de matériaux . . . . .	12,50	
	Sable, chaux, pierres . . . . .	37,50	
	Cintres et divers . . . . .	3,00	
	A reporter, avancement . . . . .	155,00	
	Total pour la grande section . . . . .	416,00	

Entre le viaduc et l'entrée de la galerie de Cornas, la voie est en rampe continue de 4 à 5 millimètres par mètre; celle-ci est de 4 millimètres dans la galerie.

Tous les souterrains sont en alignement droit. A l'extérieur les courbes sont très-fréquentes et ont le plus souvent 25 mètres de rayon seulement. La longueur normale des alignements droits entre une courbe et une contre-courbe est de 10 mètres; mais à la pose cette longueur n'a pas été toujours observée.

## § 3. — Matériel de voie et pose.

La voie a 0<sup>m</sup>,80 d'axe en axe des rails, 0<sup>m</sup>,766 dans œuvre (fig. 3, Pl. X). La largeur de la plate-forme est de 4 mètres; mais elle pourrait sans inconvénients être réduite à 3 mètres. Les rails sont du type Vignole; ils pèsent 12 kilog. le mètre courant. Les premiers qu'on a employés étaient en fer. Aujourd'hui on n'emploie que des rails Bessemer. Ils sont représentés fig. 3, Pl. VII. Leurs dimensions sont les suivantes :

	millimètres.
Hauteur. . . . .	68
Largeur du patin. . . . .	58
Largeur du champignon. . . . .	34
Épaisseur de l'âme. . . . .	10

Leur section est de 1.514 millimètres carrés, correspondant, pour une densité de 7,82, à un poids de 11<sup>k</sup>,839 par mètre courant. Le centre de gravité est à 32 millim. de la base.

Le moment d'inertie  $I = 0,000000887$ .

À l'origine, on avait placé sept traverses également espacées par barre de 5 mètres. Leur écartement était donc de 0<sup>m</sup>,714. On a dû en porter le nombre à neuf et même à dix, et réduire ainsi l'écartement à 0<sup>m</sup>,50 ou 0<sup>m</sup>,555.

Les machines sont à quatre roues et pèsent 8.000 kilogrammes, soit 2.000 kilogrammes par essieu. La fatigue maximum du rail était donc, pour un écartement des traverses de 0,714, au droit des appuis des portées intermédiaires

0,148  $\frac{0,03536 \cdot 0,714 \cdot 2.000}{0,000000887} = 8^k,42$ ; à la section encastrée des portées de joint (en supposant nul l'effet de l'éclissage), 0,1928  $\frac{0,03536 \cdot 0,714 \cdot 2.000}{0,000000887} = 10^k,42$ .

Ces deux chiffres sont beaucoup trop élevés, surtout pour des rails en fer.

Par la réduction des portées à 0<sup>m</sup>,50, ils deviennent

Dans le premier cas. . . . .	kilog. 5,89
Dans le second cas. . . . .	7,30

Ici, comme sur le chemin de Mokta, on a adopté pour le rail Bessemer le même profil que pour le rail en fer. Nous croyons qu'il y aurait avantage à augmenter sa hauteur, en réduisant l'épaisseur de l'âme de 1 ou 2 millimètres et augmentant l'angle des portées d'éclisse.

La longueur normale des barres étant de 5 mètres, les sous-longueurs pour les courbes sont comprises entre 4,88 et 4,95. La dernière commande de rails Bessemer, faite à l'usine de Bességes, comporte des longueurs normales de 6 mètres et des sous-longueurs variant au gré de l'usine, à partir de 5<sup>m</sup>,60.

Les éclisses ont 0<sup>m</sup>,36 de longueur, 0,42 de hauteur, 0,008 d'épaisseur. Elles portent une rainure longitudinale de 2 millimètres de profondeur, pour empêcher les boulons de tourner pendant le serrage. Elles sont percées de quatre trous circulaires de 0<sup>m</sup>,0115. Elles sont représentées fig. 4 et 5, Pl. X. Elles sont en fer, pèsent 835 grammes et coûtent actuellement 33 francs les 100 kilogrammes.

Les boulons ont 10 millimètres de diamètre, pèsent 60 grammes et coûtent aujourd'hui 200 francs les 100 kilogrammes.

Les crampons (fig. 6 et 7, Pl. X) sont à section carrée, de 10 millimètres de côté; ils ont 90 millimètres de hauteur et coûtent 110 francs les 100 kilogrammes.

*Traverses.* — Les traverses ont un équarrissage de 0,10 sur 0,12 et une longueur de 1<sup>m</sup>,50. Elles sont en chêne scié, parfaitement sain; elles proviennent de la Haute-Saône et coûtent, rendues, 1<sup>£</sup>,50. L'entaille a 4 à 5 millimètres de profondeur. On n'a pas eu encore à les remplacer depuis que le chemin de fer fonctionne, c'est-à-dire depuis trois ans et demi.

*Pose de la voie.* — L'épaisseur du ballast est de 0<sup>m</sup>,40. Il est formé de micaschiste concassé.

Les wagons employés étant les wagons de mine, dont les roues sont cylindriques, les rails ne sont pas inclinés; leur axe est vertical.

On n'avait admis primitivement qu'un dévers de 5 centimètres dans les courbes de 25 millimètres de rayon. Il était insuffisant, et on l'a porté à 7 centimètres.

Dans les courbes, on place tous les 2 mètres une traverse de 0<sup>m</sup>,20 de longueur. Néanmoins on a beaucoup de peine à y maintenir la voie en bon état.

Les rails ne sont pas encochés, et l'on n'a pris aucune précaution pour combattre le cheminement longitudinal, qui ne paraît pas d'ailleurs avoir tendance à se produire.

Le prix actuel d'un mètre courant de voie est le suivant :

	francs.
Ballast, 1 <sup>m3</sup> . . . . .	1,25
Traverses à 1 <sup>m</sup> ,50. . . . .	2,50
Rails Bessemer 24 kilog. à 45 fr. les 100 kilog. . . . .	10,80
Éclisses, boulons et crampons. . . . .	1,05
Transport 27 <sup>m</sup> ,615 à 5 francs les 100 kilog. . . . .	0,14
Pose. . . . .	1,00
Ensemble. . . . .	16,72

A ce chiffre il faut ajouter, en galerie, 5 francs pour le nettoyage de la plate-forme.

#### § 4. — Changements et croisements de voie.

Les changements de voie ont été établis sur un rayon de 25 mètres. Les aiguilles ont 2<sup>m</sup>,10 de longueur. Celle qui appartient à la voie déviée est courbe. Le cœur est en fonte et pèse 112 kilogrammes. Le prix payé en 1870 pour un changement et croisement complet est de 345 francs. Il pourrait être notablement réduit par l'emploi de traverses ordinaires dans la pose des châssis.

Voici le détail du prix :

	kilog.	francs.	francs.
1 tringle et 2 entretoises. . . . .	15,500	à 120,00 les 100 kil.	18,60
1 levier de contre-poids . . . . .	5,400	— 250,00 —	13,45
28 boulons. . . . .	»	— 0,50 pièce	8,40
Clavettes et cales en fer. . . . .	2,500	— 45,00 les 100 kil.	1,10
Façon de 4 rails aiguilles et contre-aiguilles. . . . .	»	— »	57,20
1 contre-poids fonte . . . . .	12,00	— 50,00 —	3,60
Supports et coussinets. . . . .	59,00	— 80,00 —	47,20
2 plaques carrées. . . . .	17,4	— 50,00 —	5,20
8 coussinets. . . . .	62,00	— 25,00 —	15,45
2 coins en fonte à trois trous. . . . .	7,500	} — 50,00 —	4,50
10 coins en fonte à 1 trou. . . . .	7,000		
1 cœur en fonte. . . . .	112,00	— 50,00 —	56,00
12 vis tire-fonds. . . . .	»	— 0,50 l'une	3,60
Châssis en bois pour l'aiguillage. . . . .	»	— »	55,20
Châssis en bois de chêne pour le cœur. . . . .	»	— »	69,70
16 boulons. . . . .	10,00	— 80,00 les 100 kil.	8,00
Total. . . . .			345,00

A cette somme de 345 francs, il faut ajouter la valeur des rails employés pour aiguilles, contre-rails et rails, contre-aiguille, soit quatre rails de 5 mètres ou 240 kilogrammes.

#### § 5. — Wagons.

Les wagons qui circulent sur le chemin de fer sont les wagons mêmes de mine. Ils sont représentés *fig.* 8 à 11, Pl. X. Le châssis est en bois avec des entretoises en fer; la caisse est en bois, les côtés latéraux sont maintenus par des ranchets en fer à T. Les côtés d'avant et d'arrière sont mobiles.

Les dimensions intérieures de la caisse sont :

Longueur. . . . .	2 <sup>m</sup> ,22	
Hauteur. . . . .	0,56	
Largeur	en haut. . . . .	0,74
	en bas. . . . .	0,64
Volume. . . . .	0 <sup>m3</sup> ,858	

Poids moyen de la charge. . . . .	925 <sup>k</sup> ,00
La longueur entre tampons est de. . . . .	2 <sup>m</sup> ,54
L'écartement des essieux est de. . . . .	0,65

\* Les roues sont en fonte; elles sont folles sur l'essieu qui est fixe. Un renflement ménagé dans le moyeu renferme l'huile de graissage, que l'on introduit par une petite ouverture fermée par un bouchon à vis. Le diamètre des roues, au roulement est de 0<sup>m</sup>,520; l'épaisseur des boudins, de 0,020; l'intervalle entre les boudins des roues d'un même essieu de 0<sup>m</sup>,725; le jeu total de la voie est donc de 0<sup>m</sup>,035.

Voici le prix actuel d'un essieu monté :

	kilog.	francs.	francs.
1 essieu. . . . .	11,445	à 110,00 les 100 kilog.	12,59
2 roues. . . . .	44,6	— 58,00 —	16,95
2 boîtes. . . . .	3,364	— 2,75 pièce	5,50
6 boulons. . . . .	1,564	— 89,00 les 100 kilog.	1,23
Ensemble. . . . .			36,27

Le wagon vide pèse 450 kilog. et coûte environ 210 fr.

L'attelage se fait au moyen de chaînes mobiles pourvues de deux crochets que l'on passe dans les maillons *m, m*.

### § 6. — Locomotives.

Les locomotives, au nombre de deux, ont été fournies par la maison André Kœchlin et compagnie, au prix de 17.000 francs.

Elles sont représentées *fig. 12 à 16, Pl. X*.

Les éléments principaux sont fournis par le tableau suivant :

Poids de la machine vide. . . . .	6.000 kilog.
Eau dans la chaudière à 100 <sup>mm</sup> au-dessus du foyer. . . . .	650 litres.
Volume de vapeur correspondant à cette hauteur. . . . .	245
Poids de l'eau dans les soutes pleines. . . . .	950 kilog.
Poids du combustible. . . . .	400 —
Poids de la machine en charge. . . . .	8.000 —

#### Chaudière et foyer.

Diamètre moyen de la chaudière. . . . .	0 <sup>m</sup> ,700
Timbre. . . . .	9 kilog.
Entre les plaques tubulaires. . . . .	2 <sup>m</sup> ,300
Nombre des tubes. . . . .	78
Diamètre intérieur des tubes. . . . .	0 <sup>m</sup> ,055
Surface de chauffe du foyer. . . . .	2 <sup>m²</sup> ,5
— des tubes. . . . .	18,9
— totale. . . . .	21,2
Longueur de la grille. . . . .	0 <sup>m</sup> ,606
Largeur — . . . . .	0,696
Surface — . . . . .	0 <sup>m²</sup> ,42

#### Mécanisme et distribution.

Diamètre des cylindres. . . . .	0 <sup>m</sup> ,220
Course des pistons. . . . .	0,300
Entre-axes des cylindres. . . . .	1,120
Longueur de la bielle motrice. . . . .	1,520
Course des excentriques. . . . .	90 millim.
Longueur des barres des excentriques. . . . .	980
Recouvrement intérieur. . . . .	4
— extérieur. . . . .	22
Section des orifices d'introduction. . . . .	25/140
— d'échappement. . . . .	50/140
Volume moyen de l'espace nuisible. . . . .	0 <sup>m³</sup> ,00105
Diamètre de la tige du piston. . . . .	40 millim.
Longueur de la coulisse. . . . .	20

#### Roues et châssis.

Diamètre des roues accouplées. . . . .	0 <sup>m</sup> ,60
Entre les bandages. . . . .	0,720
Diamètre des fusées. . . . .	0,090
Longueur des fusées. . . . .	0,140
Écartement des essieux. . . . .	1,500
Porte-à-faux d'avant. . . . .	1,350
Porte-à-faux d'arrière. . . . .	1,750
Entre les longerons { à l'avant. . . . .	0,658
{ à l'arrière. . . . .	0,880
Section moyenne des longerons. . . . .	16/160 millim.
Du rail à l'axe des tampons. . . . .	300
Entre-axe des tampons. . . . .	580
Largeur maximum de la machine. . . . .	1 <sup>m</sup> ,600
Hauteur — . . . . .	2,100
Longueur à l'extrémité des tampons. . . . .	4,900

Le diagramme de la distribution est représenté *fig. 3*, Pl. XI. Les résultats sont consignés dans le tableau ci-joint.

COURSE DU TIROIR.	AVANCE LINÉAIRE à l'admission (mill.)		OUVERTURE MAXIMUM des lumières d'admission (mill.)		ADMISSION		DÉTENTE		ÉCHAPPEMENT anticipé		ÉCHAPPEMENT		COMPRESSION		CONTRA-PRESSION	
	en cent. de course.	en millimètres.	en cent. de course.	en millimètres.	en cent. de course.	en millimètres.	en cent. de course.	en millimètres.	en cent. de course.	en millimètres.	en cent. de course.	en millimètres.	en cent. de course.	en millimètres.	en cent. de course.	en millimètres.
90	0,25	25	75,25	226	20,65	62	4,1	12	90,5	272	9,5	28	0	0		
77,5	2	16,7	65	195	27,1	81	7,0	24	86,5	260	13,4	40	0,1	0		
66,5	2,8	11,1	50	150	36,5	109	13,5	41	79	237	20,5	62	0,5	1		
61,8	3,5	8,7	40	120	42,5	127	17,5	53	73,25	220	26,0	78	0,75	2		
57,8	3,8	6,8	30	90	47	141	23,0	69	66,6	200	31,9	96	1,5	4		
54,2	4,0	5,0	20	60	50,1	150	29,9	90	56,5	169	41,0	123	2,5	5		
52,5 point mort.	4,2	4,25	7,75	23	49,55	149	42,7	128	42,9	129	49	147	8,1	14		

Le travail brut et le travail net de la machine calculés comme nous l'avons fait plusieurs fois, le poids de vapeur consommée par kilomètre, enfin la vitesse correspondante à la production de vapeur, sont donnés par le tableau suivant :

$$P_1 = 9^k, 0 \quad P_2 = 1^k, 035 \quad \Delta = 4,3 \quad t = 174 \quad \frac{S_1 + S_2}{2} = 574 \quad \lambda = 0,028.$$

Le poids de vapeur produit par heure est de  $21,2 \times 40 = 848$  kilog.

Enfin, comme il n'y a que quatre roues accouplées, on a pris 16 kilog. par tonne, en tout 128 kilog. pour la résistance propre du mécanisme.

COURSE du tiroir (mill.)	ADMISSION en centièmes de la course.	TRAVAIL brut par coup de piston (kilogram-mètres).	TRAVAIL brut par mètre parcouru (kilogram-mètres).	EFFORT de traction T-R (kilogram-mètres).	PRESSION effective moyenne dans le cylindre Q (kilogr.)	POIDS de vapeur dépensé par coups de piston (kilogr.)	TRAVAIL de 1 kilogramme de vapeur (kilogram-mètres).	POIDS de vapeur dépensé par kilomètre K (kilogr.)	VITESSE correspondant à la production de vapeur. V (kilomètres).	CONSOMMATION de charbon par kilomètre (kilogr.)
90	75,25	834	1769	1641	7,4	0,040	20850	85	10,0	15,9
77,5	65	774	1642	1514	6,9	0,035	22114	74	11,4	13,8
66,5	50	672	1426	1298	6,0	0,027	24689	57	14,8	10,7
61,8	40	591	1254	1126	5,2	0,022	26863	46	18,4	8,6
57,8	30	484	1027	899	4,3	0,017	28470	35	24,2	6,5
54,2	20	350	743	615	3,1	0,012	29167	25	33,9	4,7

D'après ce tableau, l'effort de traction maximum serait de 1.641 kilog. Mais l'adhérence étant seulement de  $\frac{1}{7}$  8000 ou de 1.143 kilogrammes, ce chiffre est celui de l'effort maximum.

La vitesse correspondante est de 18 kilomètres à l'heure ; l'admission correspondante de 41 p. 100.

§ 7. *Composition des trains. — Résistance à la traction.*

On peut vérifier l'accord de ces résultats avec ceux de la pratique, mais il faut auparavant fixer le chiffre de la résistance à la traction.

Les wagons qui circulent sur le chemin de Cessous sont de simples wagons de mines, médiocrement entretenus, comme le sont toujours des véhicules employés à cet usage.

Mais leur mode de graissage est supérieur à celui des wagons de Rochebelle et l'on peut admettre 10 kilog, par tonne pour leur résistance à la traction sur palier et en alignement droit.

Nous évaluerons la résistance en courbe, comme nous l'avons fait pour les lignes à voie d'un mètre, en ajoutant au frottement dû au parallélisme des essieux et à la différence de longueur des rails, calculé par la formule  $1.000 f \frac{\sqrt{e^2 + d^2}}{R}$ , l'effet du frottement des boudins et des autres causes retardatrices, obtenu en multipliant le chiffre 2, qui représente cette résistance dans une courbe de 250 mètres de rayon et pour un train de 350 mètres de longueur, par le rapport inverse des rayons  $\frac{550}{R}$  et par le rapport de la longueur des trains  $\frac{l}{352}$ .

Sur le chemin de Cessous, on a

$$e = 0,80,$$

$$d = 0,325 \text{ pour les wagons,}$$

$$d = 0,75 \text{ pour les machines.}$$

$$\text{Nous ferons} \quad f = \frac{1}{6}.$$

Les trains sont composés de 60 wagons et leur longueur est de 167 mètres.

Dans une courbe de 25 mètres de rayon, la résistance par tonne, ainsi calculée, est de 13 kilog.

Comme nous venons de le dire, les trains se composent de 60 wagons, vides à la remonte, pleins à la descente. Dans le premier cas, le poids du train (non compris la machine), est de 27 tonnes ; dans le second, il est de 82<sup>T</sup>,500.

L'effort maximum à la remonte, sur une rampe de 0,005 et dans une courbe de 25 mètres de rayon, est :

$$27(10 + 13 + 5) + 8(4 + 13 + 5) \text{ ou } 932 \text{ kilog.,}$$

en évaluant à 4 kilog. par tonne la résistance de la machine considérée comme véhicule.

A la descente, sur une pente de 4 millim. et dans une courbe de 25 mètres de rayon, la résistance du train est :

$$82,5(10 + 13 - 4) + 8(4 + 13 - 4) \text{ ou } 1.671 \text{ kilog.,}$$

chiffre supérieur à l'effort maximum de traction.

Mais la résistance réelle n'atteint pas ce chiffre, parce que le train ne se trouve jamais tout entier sur une courbe de 25 mètres de rayon. Il n'y a qu'un seul point sur lequel le train occupe pendant un instant trois courbes et entre-courbes de 25 mètres de rayon, et il le franchit facilement au moyen de la vitesse acquise.

La longueur totale des courbes de 25 mètres de	mètres.
rayon est de . . . . .	54.
Celle des courbes de 45 et 50. . . . .	110
— de 80 à 100. . . . .	9

L'effort moyen à la remonte est

$$\frac{\{[27(10+4,5)+8(4+4,5)]3793+35(13.341+6,5.110+3,5.95)\}}{3.795} = 498 \text{ kilog.}$$

et à la descente, avec les wagons pleins,

$$\frac{(82,5 \times 5,5 - 8 \times 0,5)3793 + 90,5(13.341 + 6,5.110 + 3,5.95)}{3.793} = 580 \text{ kilog.}$$

La résistance est donc sensiblement plus grande à la descente qu'à la remonte.

Si l'on ne considérait que la résistance moyenne, on pourrait dire que les machines sont loin de remorquer toute la charge qu'elles sont capables de traîner. Mais la résistance additionnelle au passage dans les courbes de 25 mètres de rayon est tellement considérable qu'elle limite nécessairement la charge. Pratiquement, celle-ci ne peut dépasser 65 wagons. Aussi va-t-on prochainement porter à 40 mètres le rayon minimum de toutes les courbes. Le nombre des wagons d'un train pourra être alors porté à 75.

#### § 8. — Consommation des machines.

La consommation de charbon calculée au moyen du tableau précédent serait par voyage de . . . . . 52,00 kilog.

A ce chiffre il faut ajouter :

1° Le charbon brûlé pendant les manœuvres et les stationnements qui sont fort longs, car on ne fait que 5 voyages par jour. . . . .	12,00
2° Le charbon consommé pour l'allumage, 60 kilog. par jour, ou par voyage. . . . .	12,00
Ensemble. . . . .	56,00

Le chiffre réel de la consommation est de 60 kilog.

Le volume de l'eau employée est de 360 litres par voyage.

Le combustible est un mélange d'agglomérés de Portes et de charbon anthraciteux de Cessous.

La consommation d'huile et de graisse est de 250 gr. par voyage.

#### § 9. — Prix de revient.

Le personnel se compose de :

- 1 mécanicien,
- 1 conducteur de train,
- 3 à 4 cantonniers.

En 1873, pour un transport de 64.568 tonnes, le prix de revient a été :

	francs.	par tonne.
Traction. . . . .	{ Main-d'œuvre. . . . . 3.492,60	} 0,121
	{ Consommations. . . . . 2.310,40	
	{ Entretien de machines. 2.088,70	
Entretien de la voie. . . . .	{ Main-d'œuvre. . . . . 4.225,20	} 0,081
	{ Consommations. . . . . 1.051,10	
	Ensemble. . . . .	0,202

ou 0,053 par tonne kilométrique.

L'entretien des wagons est porté au compte de la mine et n'est pas compris dans le prix de revient du chemin de fer.

L'entretien des machines a été grevé en 1873 d'une dépense importante provenant du remplacement d'un grand nombre de tubes. Depuis quatre ans que le chemin de fer fonctionne, c'est à peu près la seule réparation un peu sérieuse qu'on ait eu à faire aux machines. L'usure des bandages est de 2 à 3 millimètres seulement.

#### § 10. — Condensation de la vapeur et des fumées.

Avant de terminer ce sujet, nous dirons quelques mots d'une particularité intéressante que présentent les machines Cessous et Trébiau.

Comme elles sont destinées à circuler dans une galerie

de petites dimensions et communiquant avec des travaux de mine, on s'était préoccupé de la question d'aérage, et M. *Beugnot* avait étudié la disposition représentée sur les fig. 15 et 16, Pl. X. Le tuyau d'échappement  $cc'$ , au lieu de se rendre dans la boîte à fumée par le chemin le plus direct, contourne cette dernière extérieurement jusqu'à la base de la tuyère T. Celle-ci se prolonge au-dessous du tuyau d'échappement. Une soupape S, placée au point où ce dernier se réunit à la tuyère, et que le mécanicien peut manœuvrer de sa place, lui permet d'intercepter la communication entre le tuyau d'échappement et la tuyère et d'envoyer la vapeur et les gaz produits par la combustion dans les bâches d'alimentation par les conduits  $oo'$ . Un clapet K, placé à l'extrémité du tuyau  $oo'$ , empêche l'eau de remonter dans ce tuyau pendant ses oscillations.

Ce système fonctionnant dans la galerie de Cornas, sur un parcours d'environ 1.500 mètres, on peut se demander quelle sera la température de l'eau des soutes à la fin de chaque trajet.

L'effort de traction est :

à la remonte,  $27(10+4) + 8(4+4)$  ou 442 kilogrammètres, et à la descente, 82,5.6 ou 495 kilogrammètres.

D'après le tableau donné page 471, le poids de vapeur correspondant à un effort de traction de 442 kilogrammes, est par kilomètre de 18 kilogrammes; la consommation de charbon correspondante de  $5^k,4$ . Le poids de vapeur employé pendant tout le trajet est donc de 27 kilogrammes; celui du charbon brûlé de  $5^k,1$ . A la descente, le poids de vapeur correspondant à l'effort de traction de 495 kilogrammes est par kilomètre de  $20^k,1$ ; le charbon brûlé de  $5^k,8$ . Le poids de vapeur nécessaire au trajet entier est de  $30^k,2$ , le poids du charbon de  $5^k,7$ .

La quantité d'eau entraînée étant égale à 50 p. 100 de l'eau vaporisée, évaluant à  $16^{mc},88$  le volume d'air supposé

à  $0^\circ$ , nécessaire pour la combustion d'un kilogramme du combustible très-maigre employé, à  $400^\circ$  la température des gaz sortant de la boîte à fumée, à  $15^\circ$  la température initiale de l'eau des soutes; appelant  $K_1$  la quantité de vapeur dégagée pendant le trajet et  $C_1$  la quantité de charbon consommée,  $\theta$  la température de la vapeur d'échappement,  $t$  celle de l'eau des soutes, la capacité de ces dernières étant de 950 litres, on a l'équation

$$K_1(606,5 + 0,305\theta - t) + 0,50 K_1(\theta - t) + 16,88 \cdot 1,293 \cdot 0,237 C_1(400 - t) = 950(t - 15),$$

d'où

$$t = \frac{K_1(606,5 + 0,305\theta) + 0,50 K_1\theta + 16,88 \cdot 1,293 \cdot 0,237 \cdot 400 \cdot C_1 + 950 \cdot 15}{1,50 K_1 + 950 + 16,88 \cdot 1,293 \cdot 0,237 C_1}.$$

Cette équation suppose que les gaz sont tous rendus à l'atmosphère à la température  $t$ , ce qui n'est pas exact; elle néglige les pertes de chaleur par refroidissement, etc.; elle ne donne donc qu'une approximation.

Nous admettrons que la température de la vapeur d'échappement  $\theta$  soit de  $120^\circ$  correspondant à une pression de 2 atmosphères.

On trouve ainsi qu'à la fin du trajet en remonte  $t = 42^\circ$ , et à la fin du trajet en descente. . . . .  $t = 46^\circ$ .

La conséquence à tirer de ces résultats, c'est que, pour que le système puisse fonctionner utilement, sans arrêter la manœuvre du Giffard, il est nécessaire de vider l'eau des soutes à la fin de chaque trajet simple et de la remplacer par de l'eau froide.

On aurait pu réaliser cette condition à Cornas, puisque l'arrêt de la machine a lieu près du puits n° 3, par lequel il serait facile de faire descendre de l'eau de la surface; on aurait pu également établir un autre réservoir à Cornas. Jusqu'ici on n'a pas cru devoir faire ces installations, ni par conséquent utiliser la condensation, bien qu'en plus d'une circonstance l'aérage ait été affecté par la présence de

la machine dans la galerie. On sera certainement obligé d'y avoir recours quand celle-ci sera prolongée jusqu'au puits de la Serre, et que le parcours souterrain des machines sera doublé.

Nous ne pouvons donc donner de renseignements sur les effets du passage de la vapeur et des gaz dans les soutes. Nous ne doutons pas néanmoins que ces effets ne soient très-avantageux au point de vue de l'aérage. Nous croyons même que la disposition imaginée par M. Beugnot est actuellement appliquée aux machines du Metropolitan Railway.

## TABLE DES MATIÈRES.

INTRODUCTION, p. 329.

### PREMIÈRE PARTIE.

#### Chemins de fer d'Ergastiria.

- CHAPITRE I<sup>er</sup>. — § 1. Description des lieux et conditions d'établissement du chemin de fer, p. 331.
- CHAPITRE II. — *Voie*. — § 1. Tracé, p. 336. — § 2. Construction, p. 338. — § 3. Terrassements et souterrain, p. 339. — § 4. Ouvrages d'art, p. 341. — § 5. Gare d'Ergastiria, calcul de la résistance des poutres en tôle des ponts, p. 341. — § 6. Ballastage, p. 345. — § 7. Rails. Calcul de leur résistance. Épreuves à la flexion et au choc. Éclisses. Crampons. Selles, p. 345. — § 8. Traverses, p. 364. — § 9. Détails de la voie : Jeu. Dévers. Cintrage des rails. Disposition des rails longs et courts dans les courbes, p. 365. — § 10. Changements et croisements de voie, p. 369. — § 11. Plaques tournantes, p. 372. — § 12. Résumé des dépenses d'établissement de la voie, p. 375.

- CHAPITRE III. — *Matériel porteur*. — § 1. Caisses, p. 378. — § 2. Châssis. Calcul de la résistance des longerons. Appareil de traction et de choc, p. 379. — § 3. De l'attelage au point de vue des courbes, p. 382. — § 4. Suspension, p. 385. — § 5. Boîtes à huile, p. 385. — § 6. Essieux et roues. Roue folle sur l'essieu, p. 386. — § 7. Freins à leviers; freins à vis, p. 389.
- CHAPITRE IV. — *Locomotives*. — § 1. Généralités, p. 391. — § 2. Chaudière, p. 391. — § 3. Mécanisme, p. 393. — § 4. Distribution. Diagramme de la distribution, p. 393. — § 5. Châssis. p. 397. — § 6. Roues et essieux, p. 398. — § 7. Circulation dans les courbes. Jeu latéral de l'essieu d'avant. Usure des bandages, p. 398. — § 8. Poids de la machine. Variations de la répartition, p. 400. — § 9. Puissance de traction. Adhérence. Travail disponible aux divers degrés de détente. Résistance des trains à la traction, p. 401. — § 10. Consommation d'eau, p. 415.
- CHAPITRE V. — *Dépôt*. § 1. Remise des machines, p. 416. — § 2. Atelier de construction et de réparation, p. 416.
- CHAPITRE VI. — § 1. Récapitulation des dépenses d'établissement, p. 420.
- CHAPITRE VII. — *Exploitation*. — § 1. Marche des trains, p. 421. — § 2. Descente des pentes, p. 423. — § 3. Dépenses de traction, p. 424. — § 4. Entretien des locomotives et des wagons, p. 425. — § 5. Entretien de la voie, p. 426. — § 6. Prix de revient du transport, p. 426.

### DEUXIÈME PARTIE.

#### Chemins de fer de Mokta-el-Hadid.

- CHAPITRE I<sup>er</sup>. — *Voie*. — § 1. Conditions d'établissement du chemin. Construction, p. 429. — § 2. Plate-forme, p. 430. — § 3. Acquisitions de terrains, p. 431. — § 4. Plan et profil en long, p. 431. — § 5. Ballast, p. 432. — § 6. Traverses, p. 432. — § 7. Rails. Éclisses. Boulons. Crampons. Prix de revient d'un hectomètre de voie, p. 433. — § 8. Changements et croisements de voie, p. 434. — § 9. Chariots roulants, p. 435. — § 10. Signaux, p. 435. — § 11. Barrières et passages à niveau, p. 435. — § 12. Clôtures, p. 435. — § 13. Prises d'eau, p. 436. — § 14. Bâtiments. Remise des machines. Ateliers, p. 436. — § 15. Postes des cantonniers et gardes, p. 437.
- CHAPITRE II. — *Matériel roulant*. — § 1. Locomotives. Dimensions principales, p. 437. — § 2. Puissance de traction. Diagramme de la distribution, p. 439. — § 3. Prix et parcours des locomotives, p. 442. — § 4. Voitures, p. 442. — § 5. Wagons à minerai, 443.

CHAPITRE III. — *Exploitation.* — § 1. Entretien de la voie, p. 444. — § 2. Traction, p. 444.

CHAPITRE IV. — Considérations générales sur les chemins de fer à voie d'un mètre, p. 447.

### TROISIÈME PARTIE.

#### Chemins de fer de Saint-Léon (Sardaigne), de Rochebelle et de Cessous et Trébiau (Gard).

CHAPITRE I<sup>er</sup>. — *Chemin de fer de Saint-Léon.* — § 1. Renseignements généraux. Traverses métalliques, p. 451. — § 2. Matériel roulant. Wagons. Locomotives. Diagramme de la distribution. Puissance de traction, p. 453. — § 3. Exploitation, p. 457.

CHAPITRE II. — *Chemin de fer de Rochebelle,* p. 459.

CHAPITRE III. — *Chemin de fer de Cessous à Trébiau.* — § 1. Renseignements généraux. Tracé, p. 461. — § 2. Souterrains. Rampes et courbes, p. 462. — § 3. Matériel de voie et pose, p. 464. — § 4. Changements et croisements de voie, p. 466. — § 5. Wagons, p. 467. — § 6. Locomotives. Dimensions principales. Diagramme de la distribution. Puissance de traction, p. 468. — § 7. Composition des trains. Résistance à la traction, p. 472. — § 8. Consommation de charbon par les machines, p. 474. — § 9. Prix de revient de l'exploitation, p. 475. — § 10. Condensation de la vapeur et des fumées, p. 475.

### NOTE

#### SUR LA STABILITÉ DES CLOCHES DE GAZOMÈTRES SOUS L'ACTION DU VENT.

Par M. MAURICE LÉVY, ingénieur des ponts et chaussées.

Dans un document très-intéressant rédigé pour la dernière exposition universelle de Vienne, la direction de la Compagnie parisienne d'éclairage et de chauffage par le gaz appelle l'attention sur l'importance et la difficulté du problème de la stabilité des colonnes servant de guides aux grands gazomètres.

Voici comment elle s'exprime à ce sujet : « La stabilité d'une cloche de gazomètre constitue un problème aussi difficile à réaliser qu'important à résoudre.

« La cloche a son centre de gravité beaucoup au-dessus de son centre de figure et tend à se renverser dès que ces deux centres cessent d'être maintenus dans une même verticale.

« L'équilibre, pendant le déplacement, n'est pas la seule condition à satisfaire pour assurer la stabilité de ces appareils; ils doivent encore pouvoir résister dans les limites les plus étendues aux actions perturbatrices des causes étrangères à leur construction : le vent, par exemple, peut exercer sur une cloche de gazomètre un effort d'une intensité considérable contre lequel elle doit être efficacement protégée. Ce résultat peut bien être obtenu par la construction d'un bâtiment enveloppant le gazomètre quand ses dimensions ne dépassent pas certaines limites; mais quand elles atteignent les proportions des appareils auxquels les grandes compagnies

« sont obligées d'avoir recours, il faut renoncer à cette solution et assurer la stabilité des appareils pendant le déplacement, malgré l'action des vents les plus intenses. »

L'auteur du document dont le passage précédent est extrait donne ensuite des formules destinées à résoudre le problème de la résistance des guides d'une cloche de gazomètre soumise à l'action du vent; mais ces formules, qui reviennent au fond à admettre que l'action du vent se répartit également entre les divers guides, sont inadmissibles. M. Darcel, frappé de la contradiction qu'elles présentent avec certains points de la théorie des polygones articulés, a bien voulu nous engager à reprendre la question et à la traiter non plus d'après les seuls principes de la Statique, mais en faisant intervenir l'élasticité de la matière. Comme l'intérêt qu'elle offre n'est pas spécial au service de l'éclairage de la ville de Paris, et que la solution à laquelle nous arrivons est extrêmement simple et facile à appliquer, nous avons pensé qu'il y aurait peut-être quelque utilité à la faire connaître.

Les cloches des gazomètres sont guidées, dans leurs mouvements, par des colonnes verticales; ces colonnes sont généralement à section circulaire évidée; elles sont toutes identiques puisqu'elles doivent résister également bien dans quelque direction que souffle le vent; enfin elles sont placées aux sommets d'un polygone régulier et réunies entre elles par des barres dirigées suivant les côtés de ce polygone.

On considère ces barres comme simplement articulées entre elles et aux guides.

Si le vent souffle avec une vitesse  $V$ , il exerce sur la cloche une pression  $2F$  proportionnelle à son maître couple  $S$  et au carré de  $V$ .

Si le plan du maître couple sur lequel le vent agit passe par deux colonnes diamétralement opposées  $A$  et  $B$ , on admet que la pression  $2F$  se reporte par parties égales sur ces deux colonnes qui la transmettent aux autres colonnes par l'intermédiaire des côtés du polygone articulé. Le problème à résoudre consiste à trouver comment cette pression se répartira entre les diverses colonnes, et quelles tensions subiront les côtés du polygone articulé qui servent à la transmettre.

Soit  $2n$  le nombre des colonnes, ou si l'on veut, le nombre des côtés du polygone articulé. Nous considérerons deux cas, suivant que  $n$  est pair ou impair, c'est-à-dire suivant que

$$n = 2n' \quad \text{ou} \quad n = 2n' + 1.$$

Soient désignés (Pl. XI, fig. 5), dans le premier cas, par

$$A_0, A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_{2n-1} = A_{4n-1}$$

les sommets du polygone articulé, le diamètre perpendiculaire à la direction du vent étant celui qui joint les deux sommets  $A_n$  et  $A_{3n}$ , et les forces  $F$  étant, par suite, appliquées aux sommets des deux colonnes projetées en ces points. Soient, dans le second cas (fig. 6)

$$A_0, A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_{2n-1} = A_{4n+1}$$

les sommets du polygone articulé et

$$A_n, A_{3n+1}$$

le diamètre perpendiculaire à la direction du vent, en sorte que les forces  $F$  sont appliquées aux sommets des deux colonnes projetées aux points  $A_n$  et  $A_{3n+1}$ .

Pour mettre plus de symétrie dans nos calculs et comprendre dans une même formule les deux colonnes auxquelles sont appliquées les forces  $F$  et les autres colonnes

qui ne supportent pas de forces extérieures autres que celles qui leur sont transmises par l'intermédiaire du polygone articulé, nous supposons qu'au sommet de chaque colonne  $A_i$  soit directement appliquée une force  $F_i$ , cette force étant d'ailleurs de grandeur et de direction quelconques. Pour passer ensuite à la question spéciale qui nous occupe, il nous suffira de supposer toutes les forces  $F_i$  nulles, sauf celles qui se rapportent aux deux colonnes  $A_n$  et  $A_{3n}$ , si  $n = 2n'$ , ou aux deux colonnes  $A_n$  et  $A_{3n+1}$  si  $n = 2n' + 1$ .

Ceci posé, soit (fig. 7)  $A_{i-1}A_i$  un côté du polygone articulé qui, après la déformation élastique du système, viendra occuper la position  $a_{i-1}a_i$ , en sorte que le point  $A_{i-1}$  sera venu en  $a_{i-1}$  et le point  $A_i$  en  $a_i$ . La longueur  $a_{i-1}a_i$  peut, en raison de la petitesse des déplacements élastiques et dans la limite d'approximation que comportent la Résistance des matériaux (et même la théorie mathématique de l'élasticité), être regardée comme égale à sa projection  $\alpha\beta$  sur sa direction primitive  $A_{i-1}A_i$ . Donc l'allongement élastique du côté  $A_{i-1}A_i$  est

$$\alpha\beta - A_{i-1}A_i = A_i\beta - A_{i-1}\alpha. \quad (1)$$

Cherchons à déterminer les deux quantités  $A_i\beta$  et  $A_{i-1}\alpha$ , c'est-à-dire les déplacements élastiques des deux sommets consécutifs  $A_{i-1}$  et  $A_i$  estimés suivant la direction  $A_{i-1}A_i$ .

En vertu du principe de la superposition des effets des forces élastiques, le déplacement du point  $A_i$  estimé suivant la ligne  $A_iA_{i-1}$  est dû à la somme des projections, sur cette ligne, de toutes les forces agissant au sommet de la colonne  $A_i$ . Ces forces sont :

1° Les tensions des deux côtés du polygone articulé adjacents à  $A_i$ ; nous appellerons ces tensions  $t_i$  et  $t_{i+1}$  en les comptant négativement si ce sont des compressions;

2° La force  $F_i$  directement appliquée au sommet de la

colonne  $A_i$ . Décomposons-la en deux, suivant les deux côtés du polygone articulé issus de  $A_i$ , et appelons  $q_i$  et  $q'_i$  ses deux composantes que nous compterons positivement ou négativement suivant qu'elles tomberont sur les côtés du polygone ou sur leurs prolongements;  $q_i$  est d'ailleurs la composante suivant  $A_{i-1}A_i$  et  $q'_i$ , celle suivant  $A_iA_{i+1}$ .

Il résulte de là que si  $m$  est le cosinus de l'angle de contingence du polygone, la somme des projections, sur la ligne  $A_{i-1}A_i$ , de toutes les forces appliquées au sommet de la colonne  $A_i$ , sera

$$mt_{i+1} - t_i + mq'_i - q_i.$$

En vertu des principes, soit de la théorie mathématique de l'élasticité, soit de la résistance des matériaux, le déplacement élastique  $A_i\beta$  est proportionnel à cette somme.

On a donc

$$A_i\beta = \mu(mt_{i+1} - t_i + mq'_i - q_i),$$

$\mu$  étant un coefficient dépendant de la longueur et de la section des colonnes; ce coefficient s'obtient immédiatement si l'on se contente, comme cela suffit parfaitement dans la pratique, du résultat fourni par la Résistance; mais en tous cas, ce qu'il importe de remarquer, c'est que les colonnes étant, 1° à section circulaire, 2° toutes identiques, le coefficient  $\mu$  est le même pour toutes (cela aussi bien par les principes de la théorie mathématique que par ceux de la résistance), et nous verrons que cette remarque dispense, dans la pratique, de le calculer.

On trouverait, par un raisonnement tout à fait analogue,

$$A_{i-1}\alpha = \mu(t_i - mt_{i-1} + q'_{i-1} - mq_{i-1}),$$

d'où, pour l'allongement élastique de la barre  $A_{i-1}A_i$ ,

$$A_i\beta - A_{i-1}\alpha = \mu[(mt_{i+1} - 2t_i + mt_{i-1}) + m(q'_i + q_{i-1}) - (q_i + q'_{i-1})].$$

Mais cet allongement est proportionnel à la tension  $t_i$  de la barre considérée; il est donc

$$2kt_i,$$

en désignant par  $k$  une nouvelle constante que l'on détermine sans la moindre difficulté. Par suite on a

$$\mu[mt_{i+1} - 2t_i + mt_{i-1} + m(q'_i - q_{i-1}) - (q_i - q'_{i+1})] = 2kt_i,$$

ou

$$t_{i-1} - 2 \frac{1 + \frac{k}{\mu}}{m} t_i + t_{i+1} = \frac{q_i - q'_{i-1}}{m} - (q'_i - q_{i-1}),$$

ou en faisant, pour abrégier,

$$\frac{1 + \frac{k}{\mu}}{m} = a, \quad (3)$$

$$t_{i-1} - 2at_i + t_{i+1} = \frac{q_i + q'_{i-1}}{m} - q'_i + q_{i-1}. \quad (4)$$

Telle est la relation qui existe entre les tensions des trois barres consécutives. Cette relation rappelle tout à fait celle de Clapeyron entre les moments fléchissants, en trois appuis consécutifs, d'une poutre droite à travées solidaires.

Si l'on regarde les barres comme inextensibles, on devra faire  $k = 0$ , et alors l'équation (3) donne

$$a = \frac{1}{m}; \quad (3 \text{ bis})$$

le coefficient  $\mu$  disparaît.

Dans la question qui nous occupe, tout étant symétrique par rapport au plan diamétral de la cloche placé dans la direction du vent, il suffit d'appliquer cette formule à une

moitié de la figure. De plus, tous les  $q_i$  et tous les  $q'_i$  sont nuls, sauf  $q_n$  et  $q'_n$  qui sont donnés par les formules

$$q'_n = -q_n = \frac{F}{2 \cos \frac{l}{2}}$$

$l$  étant l'angle de contingence du polygone articulé. Donc, en appliquant la formule (4) à toutes les barres comprises entre les sommets  $A_0$  et  $A_{2n'}$  des fig. 5 et 6, on aura le système d'équation :

$$\left. \begin{aligned} t_0 - 2at_1 + t_2 &= 0 \\ t_1 - 2at_2 + t_3 &= 0 \\ t_2 - 2at_3 + t_4 &= 0 \\ &\vdots \\ t_{n'-2} - 2at_{n'-1} + t_{n'} &= 0 \end{aligned} \right\} (5)$$

$$\left. \begin{aligned} t_{n'-1} - 2at_{n'} + t_{n'+1} &= -\frac{F}{2 \cos \frac{l}{2}} \left(1 + \frac{1}{m}\right) \\ t_{n'} - 2at_{n'+1} + t_{n'+2} &= +\frac{F}{2 \cos \frac{l}{2}} \left(1 + \frac{1}{m}\right) \end{aligned} \right\} (5 \text{ bis}) \quad (V)$$

$$\left. \begin{aligned} t_{n'+1} - 2at_{n'+2} + t_{n'+3} &= 0 \\ &\vdots \\ t_{2n'-2} - 2at_{2n'-1} + t_{2n'} &= 0 \\ t_{2n'-1} - 2at_{2n'} + t_{2n'+1} &= 0 \end{aligned} \right\} (5 \text{ ter})$$

On a donc  $2n'$  relations entre  $2n' + 2$  inconnues.

On tire deux autres relations de la symétrie :

Si  $n$  est pair (fig. 5), on a

$$t_0 = t_1, \quad t_{2n'+1} = t_{2n'} \quad (6)$$

qui rend le nombre des équations égal à celui des inconnues.

Si  $n'$  est impair (*fig. 6*), appelons  $t_{-1}$  la tension du côté qui précède celui  $A_0A_{2n'+2}$  et  $t_{2n'+2}$  la tension du côté  $A_{2n'+1}A_{2n'+2}$ . En appliquant la formule (4), on peut ajouter, aux équations (V), les deux suivantes :

$$\begin{aligned} t_{-1} - 2at_0 + t_1 &= 0, \\ t_{2n'} - 2at_{2n'+1} + t_{2n'+2} &= 0. \end{aligned}$$

Ces équations ne résolvent pas le problème puisqu'elles introduisent deux nouvelles inconnues  $t_{-1}$  et  $t_{2n'+2}$ ; mais à cause de la symétrie

$$t_{-1} = t_1, \quad t_{2n'+2} = t_{2n'},$$

d'où

$$\left. \begin{aligned} t_1 - at_0 &= 0, \\ t_{2n'} - at_{2n'+1} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

qui, jointes à celles (V), permettent de trouver toutes les tensions.

Les équations (V) et (6) ou (7) se résolvent d'ailleurs sans difficulté, quel que soit le nombre de côtés du polygone articulé. Il suffit de remarquer, comme l'a fait M. Bresse dans la *Théorie des poutres droites* et comme on le vérifie de suite, qu'on satisfait aux équations (5) par

$$t_i = Ac^i + Bc^{-i}, \quad (8)$$

A et B étant deux constantes indéterminées et  $c$  l'une des racines de l'équation

$$c^2 - 2ac + 1 = 0, \quad (9)$$

par exemple celle

$$c = a + \sqrt{a^2 - 1}. \quad (10)$$

Dans la formule (8),  $i$  devra recevoir toutes les valeurs entières depuis  $i = 0$  jusqu'à  $i = n'$ .

On satisfait ensuite à toutes les équations (5 *ter*) par

$$t_j = Hc^j + Kc^{-j}, \quad (11)$$

H et K étant deux nouvelles constantes auxiliaires, et  $j$  pouvant recevoir toutes les valeurs entières depuis  $j = n' + 1$  jusqu'à  $j = 2n' + 1$ .

On a donc par les formules (8) et (11) l'expression de toutes les tensions, quel qu'en soit le nombre, au moyen des quatre indéterminées A, B, H et K. Pour déterminer ces quatre quantités, il suffit de porter les valeurs (8) et (11) des tensions, d'une part, dans les deux équations (5 *bis*), d'autre part, dans les équations (6) ou (7), suivant que  $n'$  est pair ou impair.

Une fois connues les tensions, il suffit de composer celles des deux côtés du polygone articulé adjacents au point  $A_i$  pour avoir la pression exercée sur la colonne projetée en ce point; toutefois, au point  $A_n$ , cette pression sera la résultante de trois forces, à savoir : les tensions des deux côtés issus de ce point et la force F.

Le problème posé se trouve ainsi complètement résolu. On pourrait discuter la solution et montrer que les pressions (loin d'être égales sur les diverses colonnes comme le suppose le mémoire cité plus haut de la Compagnie parisienne), diminuent très-rapidement quand on s'éloigne de celles situées dans le maître couple. Cette discussion n'a pas d'intérêt; ce serait la reproduction de celle faite sur les moments fléchissants des poutres droites. Les choses se passent d'une façon identique à ce qui a lieu, pour les moments fléchissants sur les appuis, dans une poutre symétrique dont la travée centrale serait seule chargée.

Appliquons ces formules à l'exemple traité par la Compagnie, d'un gazomètre conduit par six guides (*fig. 8*). On aura

$$2n = 6; \quad n = 3 = 2n' + 1,$$

d'où les équations (V) deviennent

$$t_0 - 2at_1 + t_2 = \frac{F}{2 \cos \frac{l}{2}} \left(1 + \frac{1}{m}\right),$$

$$t_1 - 2at_2 + t_3 = \frac{F}{2 \cos \frac{l}{2}} \left(1 + \frac{1}{m}\right).$$

Avec les équations (7)

$$\left. \begin{aligned} t_1 - at_0 &= 0 \\ t_2 - at_3 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (a)$$

Si l'on néglige l'allongement des barres, l'équation (5 bis) donne

$$a = \frac{1}{m} = \frac{1}{\cos l},$$

et les équations ci-dessus deviennent

$$\left. \begin{aligned} mt_0 - 2t_1 + mt_2 &= -F \cos \frac{l}{2} \\ mt_1 - 2t_2 + mt_3 &= +F \cos \frac{l}{2} \\ mt_1 - t_0 &= 0 \\ mt_2 - t_3 &= 0 \end{aligned} \right\}$$

De là on déduit

$$t_1 = -t_2 = \frac{F \cos \frac{l}{2}}{2 + m - m^2}$$

or

$$m = \cos l = \frac{\cos 2\pi}{6} = +\frac{1}{2}$$

$$\cos \frac{l}{2} = 0,866,$$

d'où

$$t_1 = -t_2 = 0,584 F$$

et la résultante  $f$  de  $t_1$  et  $-t_2$  est une force opposée à  $F$ :

$$f = 2t_1 \cos \frac{l}{2} = t_1 = 0,67 F,$$

d'où, pour l'action totale que supporte la colonne  $A_n$ ,

$$F - f = 0,33 F.$$

Dans la note citée plus haut on admet

$$f = \frac{F}{3} = 0,33 F,$$

d'où

$$F - f = 0,67 F.$$

On trouverait par suite

$$t_1 = \frac{f}{2 \cos \frac{l}{2}} = 0,19 F \quad \text{au lieu de } 0,583 F.$$

On attribuerait donc à la colonne la plus chargée une charge beaucoup trop forte et, en revanche, aux barres une charge beaucoup trop faible.

Ces différences augmentent avec le nombre des colonnes. Ainsi, pour un polygone à huit côtés,

$$n = 4, \quad n' = 2.$$

Les équations (V) donnent, en faisant  $a = \frac{1}{m}$  (fig. 9),

$$mt_0 - 2t_1 + mt_2 = 0,$$

$$mt_1 - 2t_2 + mt_3 = -F \cos \frac{l}{2},$$

$$mt_2 - 2t_3 + mt_4 = +F \cos \frac{l}{2},$$

$$mt_3 - 2t_4 + mt_5 = 0,$$

et celles (6),

$$t_0 = t_1, \quad t_4 = t_5.$$

De là on déduit, pour les deux barres les plus fatiguées,

$$t_2 = -t_3 = \frac{F \cos \frac{l}{2} (2 - m)}{2(2 - m^2)},$$

$$m = \cos l = \cos \frac{2\pi}{8} = \frac{1}{2} \sqrt{2},$$

$$\cos \frac{l}{2} = \frac{1}{2} \sqrt{2 + \sqrt{2}},$$

d'où

$$t_2 = -t_3 = \frac{\sqrt{2 + \sqrt{2}} (4 - \sqrt{2})}{12} F = 0,398 F,$$

puis

$$f = 2t_2 \cos \frac{l}{2} = 0,738 F,$$

d'où, pour l'action totale exercée sur la colonne A,

$$F - f = 0,262 F.$$

Dans la note susmentionnée on admet

$$f = \frac{F}{4} = 0,25 F,$$

d'où

$$F - f = 0,75 F \text{ au lieu de } 0,262 F.$$

En revanche on trouverait

$$t_2 = 0,13 F \text{ au lieu de } 0,398 F.$$

---



---

CARTE GÉOLOGIQUE DÉTAILLÉE DE LA FRANCE

SYSTEME ET MODE D'APPLICATION

DE

LA LÉGENDE GÉOLOGIQUE GÉNÉRALE

Par M. A. E. BEGUYER DE CHANCOURTOIS (\*).

---

PRINCIPES DE LA MÉTHODE.

Les Notations et les Figurés employés dans la Carte géologique détaillée ont pour objet de mettre en évidence les conditions de *Composition* et de *Texture*, de *Forme* et d'*Allure* et enfin d'*Age relatif* propres à chacune des masses minérales qui constituent le sol, en d'autres termes, de rendre manifestes la **NATURE**, la **STRUCTURE** et l'**ORDRE** chronologique des *formations* superposées ou juxtaposées dans l'Écorce du Globe.

Les trois sortes de conditions sont dominées par le *Mode de production et de gisement*, dont la prise en considération

---

(\*) La publication de la Carte géologique détaillée est organisée de manière que le portefeuille des documents figuratifs contienne toutes les explications nécessaires, et que l'on soit dispensé, lorsque l'on consulte ces documents, d'avoir recours à un texte en volume.

Dans ce but, chaque FEUILLE de carte est accompagnée d'une notice disposée d'abord pour être adaptée à la feuille *in-plano*; chaque PLANCHE de dessin porte aussi une explication; enfin les TABLEAUX de la Légende générale sont eux-mêmes expliqués par un texte imprimé *in-folio*.

Mais on a jugé utile de rassembler, d'autre part, dans des cahiers

impose tout d'abord la division des masses minérales en deux grandes séries : celle des formations qui portent l'empreinte des **PHÉNOMÈNES SÉDIMENTAIRES** ou **NEPTUNIENS**, et celle des formations qui résultent directement des **PHÉNOMÈNES ÉRUPTIFS** ou **PLUTONIQUES**.

En vue de marquer autant que possible la correspondance des deux séries, on les a traitées concurremment dans les trois Tableaux qui composent la Légende générale.

Si ces Tableaux atteignaient pleinement le but qu'on s'est proposé en les dressant, ils n'auraient besoin d'aucun commentaire, et leur rédaction méthodique devrait faire saisir, du premier coup d'œil et à simple lecture, les bases sur lesquelles on les a construits, en même temps que le mode d'application des conventions adoptées; mais, malgré tous les soins que l'on a pris, ils n'atteignent assurément pas une telle perfection.

On doit donc les faire précéder d'indications présentées

---

d'EXPLICATIONS, ayant le format portatif des cartes et des planches entoillées et pliées, tous les textes concernant une feuille et ses annexes.

Quant aux développements scientifiques et techniques qui ne concernent pas exclusivement une feuille de la Carte, ils ont été renvoyés à une série de MÉMOIRES et de NOTES, publiés aussi par cahiers, mais rédigés d'une manière indépendante.

Dans le même esprit, il a paru convenable de réunir en cahiers tous les textes qui servent à expliquer les travaux des Légendes et de publier pareillement les considérations ayant un objet général; mais, comme en beaucoup de cas il y aurait plus d'inconvénients que d'avantages à faire rigoureusement le départ des explications proprement dites et des considérations théoriques qui ont présidé à l'organisation du travail ou qui viendront influer sur sa marche ultérieure, on a jugé à propos de mettre les deux ordres d'exposés, confondus au besoin, sous la rubrique commune GÉNÉRALITÉS, dans une première série de cahiers qui auront souvent un caractère mixte, tenant à la fois de celui des Explications relatives aux feuilles de la Carte et de celui des Mémoires indépendants.

Ces cahiers de Généralités sont marqués de lettres et de chiffres romains qui rappellent les tableaux auxquels ils se rapportent.

Le cahier A est réservé pour l'INTRODUCTION rédigée par M. Élie

aux deux points de vue des origines du Système et de son but ou de sa mise en pratique.

Afin de compléter la définition du travail donnée dans l'AVERTISSEMENT, on présente ici, à la suite de ces indications, celles qui concernent le mode d'établissement des diverses sortes de Feuilles et de Planches, en les distinguant par l'emploi des *caractères italiques*, de manière à permettre de les lire séparément.

Les différentes parties de cet exposé sont, du reste, développées, non en proportion de l'importance de leur objet, mais en raison inverse du degré de vulgarisation ou d'évidence des notions qu'elles expliquent ou introduisent.

« Pour justifier, d'abord, le dualisme fondamental du Système, il est à peine nécessaire de rappeler la lutte des Écoles Saxonne et Écossaise. Mais, en ce qui touche la pondération des deux principes antagonistes, il n'est pas hors

---

de Beaumont, Directeur du Service. Le cahier B, intitulé AVERTISSEMENT, renferme l'Historique et la définition du travail et l'exposé du mode de publication. Le tableau d'assemblage y est joint. Le cahier C contient la LÉGENDE TECHNIQUE. Une suite de cahiers D est consacrée à la LÉGENDE GÉOLOGIQUE.

Les matières des cahiers B et C ont déjà été données dans les *Annales des Mines*, 7<sup>e</sup> série, t. IV, pages 255 et 372. La présente note contenant les matières du cahier D (I, II, III) complète l'exposé du Système de la Carte.

Chargé, comme Sous-Directeur du Service, de la rédaction des Généralités concernant les Légendes d'ensemble, j'use de l'indépendance relative, laissée en principe aux auteurs des Mémoires, pour émettre dans ces généralités quelques considérations qui, en raison de leur caractère philosophique, n'auraient pas été à leur place dans les tableaux, mais peuvent, mieux que de longs commentaires, contribuer à faire comprendre le plan de la Légende géologique.

Toutefois, j'ai soin de placer entre guillemets les parties de ma rédaction qui doivent rester sous ma propre responsabilité, de manière à les faire distinguer de celles qui ont été arrêtées pour former le texte explicatif des tableaux, et dans lesquelles j'ai d'ailleurs profité, autant que possible, de tous les concours.

Les règles que j'ai suivies dans ma participation à la fondation

de propos de faire remarquer qu'elle a été constamment admise par les savants français, dont le Service de la Carte détaillée s'efforce de continuer les traditions.

« L'École Française, qui, en Géologie comme dans la plupart des branches de la Philosophie naturelle, peut faire remonter l'originalité de son caractère propre à une impulsion directe et spéciale du génie gaulois de Descartes, n'a cessé, en effet, de progresser dans la voie sûre de la critique et de la méthode ouverte par le grand maître des temps modernes.

» Pourvue déjà, au temps de Buffon, d'observations coordonnées; rapidement enrichie, grâce aux travaux d'une série de naturalistes parmi lesquels, à la suite de Dolomieu et de Saussure, on peut citer deux ingénieurs du corps des Mines, Brongniart et Brochant de Villiers, le promoteur de la Carte géologique générale, elle s'appuie maintenant sur les bases inébranlables posées, en Minéralogie, par Haüy, en Paléontologie, par Cuvier.

» Ne négligeant aucun des enseignements de l'Antiquité et tenant compte de tous les travaux étrangers, depuis les aperçus de Leibnitz jusqu'aux résultats de Murchison, elle accueille les parties rationnelles de toutes les théories, dont la proscription réduirait la science à une érudition stérile; mais elle ramène à leur juste valeur aussi bien les nouvelles

du Système de la Carte seront de plus l'objet de trois cahiers, concernant la Lithologie, la Stratigraphie et la Chronologie géognostique.

Ces Généralités, destinées, non plus seulement à expliquer la valeur des signes et des figurés conventionnels, mais à développer et à préciser les rapports théoriques des conventions et toutes les tendances du système, dont le présent cahier ne peut donner qu'un aperçu général, résumeront les travaux que j'ai tournés constamment depuis vingt ans vers le but, atteint aujourd'hui, de l'exécution de la Carte géologique détaillée. Leur publication suivra bientôt, s'il plaît à Dieu.

Janvier 1874.

A.-E. B. D. C.

idées des glacialistes et des actualistes que les théories anciennes de Werner et de Hutton, devenues, l'une exclusivement neptunienne, l'autre exclusivement plutonique, par les exagérations de leurs propagateurs.

» C'est ainsi que, sur les conclusions astronomiques de Galilée, de Newton et de Laplace, adoptées comme données certaines, elle est arrivée à fonder une Théorie géognostique qui achève de relier tous les faits géognostiques par les principes des Soulèvements et des Émanations; et la liaison est aujourd'hui assez complète et assez logique pour permettre d'aborder le classement de tous les éléments géognostiques dans les conditions, à la fois générales et circonstanciées, que comporte l'entreprise de la Carte géologique détaillée de la France. »

## I. — NATURE.

Les Notations, à l'aide desquelles on définit la *Composition* et la *Texture* sont classées, sous le titre **LITHOLOGIE**, dans un premier Tableau (pages 530 et 531), divisé en deux Sections, présentant chacune douze colonnes verticales et cinq doubles bandes horizontales.

Les Dépôts sédimentaires sont classés dans la Section de gauche du Tableau, et les Roches éruptives, dans la Section de droite.

Chaque colonne verticale de ce Tableau correspond, dans l'une et l'autre Section, à une catégorie de *Compositions* caractérisée par une *lettre*.

La lettre est *romaine* pour la série *sédimentaire*; elle est *grecque* pour la série *éruptive*.

Chaque bande horizontale correspond à une catégorie de *Textures* marquée par un *accent* placé au-dessus de la lettre.

Dans la section des Dépôts sédimentaires,	Dans la section des Roches éruptives,
Les douze colonnes verti-	Cinq colonnes de droite com-

cales correspondent aux principales catégories qui se distinguent de prime abord dans les associations que forment les variétés des six éléments minéraux : SILICE, ARGILE, GLAUCONIE, CALCAIRE, DOLOMIE, FER OXYDÉ.

D'après les rapports de gisement, le *Gypse* et le *Sel* sont rattachés aux *Dolomies*, et les *Dépôts Charbonneux* aux *Dépôts Ferreux*.

Les titres des colonnes sont formés par les adjectifs des six dénominations.

Chaque colonne réunit les matières qui, considérées en bloc, présentent des compositions voisines. Son titre s'applique en même temps : d'une part, aux *mélanges mécaniques*, aux *Dépôts* que l'on peut appeler *DÉPENDANTS*, parce qu'ils sont formés à proximité ou dans la dépendance manifeste des masses minérales préexistantes, par l'*entraînement* et l'*accumu-*

prennent, sous le titre de *Roches FELDSPATHIQUES*, les associations, plus ou moins *quartzeuses*, de *feldspaths* (principalement *orthose* et *oligoclase*), de *micas* (*muscovite* et *biotite*), etc. ou de minéraux analogues, et de *talc*. Cinq colonnes de gauche comprennent, sous le titre de *Roches PYROXÉNIQUES*, les associations de *pyroxènes*, de *diallages* ou d'*amphiboles*, de *feldspaths* (principalement *labradorite*) et de minéraux analogues ou *zéolithiques*, de *péridots* et enfin de minéraux *chloriteux*, plus ou moins chargés de *magnétite* et de *calcite*.

On a pris pour titre de chaque colonne un type de Roche bien déterminé minéralogiquement, auxquels les différents termes de cette colonne se rattachent par dérivation connue ou par analogie de composition.

Dans les colonnes moyennes de chacune des deux parties feldspathiques et pyroxéniques dominant les *Roches communes*, telles que les *granites*, les *porphyres* et les *trachytes*, les *diabases*, les *trapps* et les *basaltes*, qui constituent les plus grandes masses des formations plutoniques. Dans les autres dominant, au contraire, les *Roches EXCEPTIONNELLES DE DÉPART*,

*lation des détritiques* de ces masses; d'autre part, aux *combinaisons chimiques*, aux *Dépôts de précipitation* que l'on peut appeler *INDÉPENDANTS*, parce qu'ils sont formés, avec ou sans le concours des forces vitales, au loin et dans une indépendance apparente des magmas fluides ou des masses consolidées dont leurs éléments intégrants dérivent par *émanation* ou *dissolution*.

La distribution des matières en bandes horizontales a pour base la mesure dans laquelle la texture des *Dépôts* se rapproche de la texture *granulo-spongieuse* des *sables*, des *grès*, des *glaises*, des *oolithes*, ou de la texture *granulo-lamellaire* des *psammites*, des *schistes ardoisières*, des *marbres saccharoïdes*.

Les *dépôts* classés sous la dénomination générale de *granulo-spongieux* sont répartis entre deux bandes conjuguées, selon qu'ils admettent des éléments *grossiers*, comme les *graviers à galets*, les *argiles à chailles*, les *calcaires noduleux*, ou qu'ils sont exclusivement formés d'éléments *fins*, comme les *sables*, les *tripolis*, les *glai-*

telles que les *pegmatites* et les *amphibolites*, qui se présentent plutôt en *dykes* ou en *amas d'importance secondaire*. Quant aux *Roches* ou *matières EXCEPTIONNELLES D'ÉMANATION*, qui, comme les *quartz* et les *calcites*, ne forment ordinairement que des *filons* ou des *amas adventifs* d'une faible étendue en affleurement, elles figurent pour mémoire aux colonnes extrêmes, et principalement sur la même ligne que les *Roches altérées* ou imparfaites dans lesquelles on les voit poindre en *amygdales*.

La distribution des matières en bandes horizontales a pour base la mesure dans laquelle la texture des *Roches nettes* se rapproche de la texture *cristalline* complètement *phanérogène* ou de la texture *vitreuse* complètement *adélogène*.

Les *Roches* classées sous la dénomination générale de *vitreuses* ou *réтиноïdes* sont réparties entre deux bandes conjuguées, selon qu'elles offrent un caractère vitreux très-prononcé, au moins comme les *laves*, sinon comme les *obsidiennes*, ou qu'elles présentent seulement des indices de vitrosité, comme les *trachytes* et les *basaltes*.

ses, les calcaires oolithiques ou crayeux.

Les Dépôts classés sous la dénomination générale de *granulo-lamellaires* sont également subdivisés en deux bandes, selon qu'ils sont à *grain fin et uniforme*, comme les *quartzites*, les *phyllades*, les *marbres esquilleux*, ou qu'ils admettent des *fragments*, des *nodules* ou des *cristaux développés*, comme les *grauvackes grossières*, les *schistes maclifères* et les *brèches calcaires*.

Entre ces deux catégories prend place celle des Dépôts qui ont une texture *compacte* ou à grains indiscernables, comme les *silex*, les *argiles*, les *calcaires lithographiques*.

Enfin, chacune des cinq bandes du Tableau est dédoublée : les deux premières, pour séparer les Dépôts peu ou point agrégés de ceux qui ont pris de la consistance sans perdre leur texture originale ; la troisième, pour distinguer le degré d'hétérogénéité qu'accuse l'aspect zoné ; les deux dernières, pour séparer les Dépôts métamorphiques, où l'origine sédimentaire reste visible, de ceux que le métamorphisme ramène à la condition des Roches éruptives.

Un appendice fait connaître l'interprétation des signes

Les Roches classées sous la dénomination générale de *cristallines* ou *granitoides* sont également subdivisées en deux bandes, selon qu'elles sont franchement granitoides, comme les *granites* et les *diorites*, ou qu'elles offrent la texture zonée propre aux *gneiss* et aux *micaschistes* de l'écorce primitive du globe.

Entre les deux catégories prend place celle des Roches *compactes* ou *lithoides* dans lesquelles domine la texture mixte des *eurites* et des *trapps*.

Enfin chaque série de Roches *nettes* est doublée de la série correspondante de Roches *imparfaites* ou *altérées*, comme les *arènes*, les *argilophyres*, les *tufs trachytiques*, qui sont le cortège habituel des Roches proprement dites, et qui peuvent recevoir la dénomination générale de *ROCHES DIAMORPHIQUES*, parce que, en raison de leurs textures confuses ou clastiques, elles offrent le passage de la condition éruptive à la condition sédimentaire.

qui peuvent être placés en traits d'union avant ou après la notation lithologique, pour indiquer : dans la série sédimentaire, l'origine *lacustre*, *marine* ou *saumâtre* des Dépôts ; dans la série éruptive, les conditions *pyrothermiques*, *hydrothermiques* ou *mixtes* de l'épanchement des Roches.

Cet appendice est complété provisoirement, à la fin de ces explications, par des tableaux (pages 533, 534, 535, 536) qui donnent les signes combinés pour marquer : dans les Dépôts, la présence des *corps organisés fossiles* qui en *accidentent la texture* ; dans les Roches, les *accidents de texture* produits par la *cristallisation* ; enfin, dans les deux séries, l'existence des diverses catégories de *SUBSTANCES CARACTÉRISTIQUES* imprégnantes ou disséminées.

On n'a admis généralement dans la nomenclature des Dépôts et des Roches que des noms très-usités, dont l'action lithologique est bien fixée, sinon bien limitée.

La plupart des désignations faites en dehors des usages se rapportent à des matières qui, bien que manquant de dénomination usitée dans le langage scientifique français, ont une existence nettement définie par un nom technique ou étranger, et ce nom, souvent classique, est alors ajouté entre parenthèses.

Les explications précédentes montrent que la symétrie des deux Sections du Tableau n'implique pas la correspondance des termes qui occupent des positions homologues, « comme cela pourrait avoir lieu pour les résultats de deux séries de phénomènes parallèles. On peut bien établir des parallèles : d'une part, dans l'ensemble des formations plutoniques, entre les produits *communs* et *exceptionnels* qui se succèdent dans le sens vertical ; d'autre part, dans l'ensemble des formations neptuniennes, entre les produits *dépendants* et *indépendants* qui se succèdent dans le sens horizontal ; mais, soit dans les formations dépendantes, soit dans les formations indépendantes, les sédiments

offrent toujours *l'épanouissement horizontal* des matières éruptives, communes ou exceptionnelles, amenées originellement par *ascension verticale*. »

La relation entre les deux ensembles est, par conséquent, celle du plan avec sa perpendiculaire, et l'on doit dire, à tous les points de vue, que le dépôt des sédiments est le *complément* des éruptions. Il faut donc tenir compte du caractère complémentaire de la relation dans la comparaison des deux Sections du Tableau, et, par cela même qu'il a fallu y disposer les énumérations en colonnes parallèles au lieu de les entre-croiser, ce Tableau ne saurait être présenté comme un classement de Lithologie entièrement méthodique.

A l'égard de la Composition, on s'est inspiré des principes d'ordre mathématique posés dans la VIS TELLURIQUE. L'application en Lithologie de ce classement des corps simples est pour ainsi dire implicite, puisqu'il a été dicté par les notions que donne la Géologie sur la distribution des Éléments et des Radicaux chimiques « de la science moderne » dans « les niveaux successifs des trois Éléments pondérables de la science ancienne » : l'Air, l'Eau et la Terre. Le *contraste* primordial des éléments *alcalins* des *Feldspaths* et des éléments *alcalino-terreux* des *Pyroxènes*, qui ressort en tête du classement et s'y trouve corroboré par un contraste secondaire de l'élément *alumineux* et de l'élément *ferreux*, motive sûrement la division des Roches éruptives en FELDSPATHIQUES et PYROXÉNIQUES, adoptée de préférence à la division également usitée en Roches ACIDES et Roches BASIQUES.

Il est important de rappeler à ce sujet que ces doubles dénominations ne sont pas équivalentes terme à terme, bien que les répartitions opérées d'après les deux principes de distinction aboutissent l'une et l'autre à reléguer dans les catégories opposées, d'un côté les Roches où s'isole le *Quartz* libre, c'est-à-dire une sorte d'*acide*, de l'autre

les Roches où s'isole la *Magnétite* libre, c'est-à-dire presque une *base*, comme l'exige le contraste essentiel des deux minéraux, contraste dont l'appréciation a été la source de toutes les notions d'ordre en Lithologie.

Il faut encore remarquer, au sujet de la Composition, que, si la considération du *métal*, élément *minéralisé* ou *électro-positif*, domine dans le classement des Roches éruptives, la considération du *métalloïde*, élément *minéralisateur* ou *électro-négatif*, domine « dans le classement très-sommaire des Substances caractéristiques et, par suite », dans le classement des Dépôts « qui en offrent le développement. »

A l'égard de la Texture, « dont l'étude tient en Lithologie une place correspondant à celle que la Cristallographie tient en Minéralogie », on s'est également inspiré de principes d'ordre mathématique, car le contraste des textures *vitreuse* et *cristalline*, que l'on retrouve du reste en Chimie et en Physique dans la distinction, aujourd'hui classique, des états *colloïde* et *saccharoïde* ou *cristalloïde*, « est parfaitement symbolisé par le contraste des *arcs* et des *angles* en Géométrie.

» Les mêmes principes ont présidé à la classification des Textures *accidentées* ou *combinées* des masses inorganiques données dans l'appendice qui termine ces explications.

» On les aperçoit encore au fond de la classification des êtres organisés qui, au point de vue physiographique comme au point de vue de la distribution dans le temps, pourraient être distingués en *goniomorphiques* et *cyclomorphiques* : témoin le contraste, fondamental en Zoologie, des *rayonnés* et des *mammifères*. »

Mais en construisant le Tableau des Dépôts et des Roches, on a subordonné les suggestions de l'esprit de méthode au parti pris de réduire, autant que possible, le nombre des notations différentes préparées pour marquer sur les cartes les variations de nature des différentes formations.

On s'est surtout préoccupé d'assurer une application facile du système au double point de vue de la pratique et de la théorie. La direction pratique de ce classement sommaire est accusée par le choix des termes qui composent les rubriques des bandes horizontales. Quant à sa valeur théorique, elle ressort à première vue de ce fait que les cinq doubles séries de dépôts et de roches prédominent respectivement dans les terrains des cinq périodes habituellement distinguées en Géologie.

*Les notations de nature qui, suivant les besoins, accompagnent sur la Carte une partie des notations chronologiques, sont reproduites en marge de chaque feuille dans les rectangles où sont échantillonnées les teintes conventionnelles des formations. Elles se succèdent dans chaque rectangle, suivant l'ordre des termes qui composent la dénomination restreinte de l'Étage sédimentaire ou du Groupe éruptif adoptée pour l'étendue de la feuille, et leur signification se trouve précisée par leur rappel dans le courant de la Notice explicative toujours jointe à cette feuille.*

*Les tracés imprimés des affleurements de couches, de dykes et de filons et les signes caractéristiques de la nature sont, de plus, repassés ou frangés avec des couleurs brillantes, mates ou métalliques, qui rappellent l'aspect de la matière dominante, et dont la signification est expliquée dans la légende placée en marge de la feuille.*

*Toutes les indications relatives à la nature des dépôts et des roches sont d'ailleurs complétées sur les cartes par les signes techniques placés aux points où les matières utiles ont été spécialement observées ou exploitées.*

*Ces signes de nature sont définis dans la légende technique placée au bas de la feuille et visés dans la notice explicative qui en précise l'application.*

*Dans les Coupes et les Projections longitudinales, les*

*notations lithologiques générales prennent place en regard des affleurements des formations, au-dessus des profils, sur la troisième ligne d'écriture.*

*Dans les Sections verticales, où une colonne est affectée aux désignations lithologiques de détail, la colonne adjacente, intitulée — *Figuré des épaisseurs*, — est disposée pour recevoir, dans chaque tranche correspondant à une désignation, un figuré ou un coloriage systématique spécial, rappelant à la fois la texture et la composition chimique du dépôt ou de la roche.*

*La colonne intitulée — *Particularités minéralogiques et paléontologiques, Hydrologie, Renseignements divers*, — reçoit les énumérations de fossiles ou de minéraux caractéristiques, les dénominations techniques locales et les indications concernant la nature des eaux. Enfin, la colonne intitulée — *Usages* — reçoit, en regard de chaque assise fournissant dans le voisinage un gîte minéral exploité, le signe correspondant, emprunté à la légende technique.*

## II. — STRUCTURE.

Un deuxième Tableau réunit, sous le titre **STRATIGRAPHIE** les Signes et les Tracés qui servent à définir les conditions de *Forme* et d'*Allure* des masses minérales.

Les premiers paragraphes de ce Tableau (transformé pages 537, 538, 539), relatifs à la STRATIGRAPHIE DESCRIPTIVE, comprennent tous les signes et les tracés employés pour représenter la disposition générale des formations, les accidents de leur *allure* et toutes les circonstances de *gisement* qui méritent d'être signalées, tant au point de vue de la *superposition* et de la *juxtaposition* des *Strates* qu'à celui de la *destruction naturelle* des Dépôts et des Roches.

Pour les conventions relatives aux tracés *hydrographiques* et *orographiques*, bien qu'ils forment la base de toutes

les recherches stratigraphiques, on ne peut que renvoyer aux explications du système de la Carte de l'État-Major.

Les Signes et les Tracés géologiques ont été étudiés au point de vue de la représentation la plus complète du terrain.

Leur application est subordonnée à l'échelle des diverses cartes, et ils ne peuvent être tous employés que sur les Fragments au 20 000<sup>ième</sup>.

Comme d'ailleurs il y a lieu de prévoir l'extension du travail aux Colonies, on ne s'est pas borné à répondre aux exigences du relevé de la France continentale, et l'on a pris en considération l'ensemble des données géologiques dans leur plus grande généralité.

Le Tableau de stratigraphie offre d'abord la série graduée des signes qui marquent l'*orientation* et l'*inclinaison* des surfaces stratigraphiques. Le système de la division décimale du cercle étant adopté pour le canevas géodésique de la Carte de l'État-Major, toutes les mesures d'angles doivent être notées dans le même système. Aussi les inclinaisons, depuis l'horizontalité jusqu'à la verticalité, sont-elles marquées en *grades* aussi bien qu'en *degrés*.

L'explication des Signes et des Tracés est ensuite répartie symétriquement par colonnes. Les conventions relatives aux tracés des *contours*, des *failles* et des *plis*, qui sont communs aux formations sédimentaires et éruptives, occupent les deux colonnes médianes. Un genre de tracé destiné à des contours indéterminés, incertains ou fictifs, est nécessaire, soit pour les formations métamorphiques, soit pour celles qui, comme la plupart des limons, débordant généralement sur les formations antérieures, ne gardent cependant en beaucoup de lieux qu'une épaisseur insignifiante. Dans les tracés de failles (repassés en blanc sur les cartes), les hachures latérales marquent le côté abaissé.

Les conventions qui se rapportent aux *couches* et aux *flons* viennent ensuite, de part et d'autre. Lorsque les sur-

faces s'éloignent notablement de l'horizontalité ou de la verticalité, les tracés linéaires de leurs affleurements, figurés dans ces quatre colonnes, sont, autant que possible, accompagnés, sur la Carte, des signes d'orientation et d'inclinaison qui achèvent d'en déterminer la position et l'allure.

Les conventions relatives aux *phénomènes sédimentaires*, aux *érosions* et aux *phénomènes glaciaires* sont développées dans trois colonnes à gauche, tandis que celles qui se rapportent aux *phénomènes éruptifs* et *volcaniques* sont développées dans trois colonnes à droite. Enfin, les deux colonnes extrêmes comprennent accessoirement les notations concernant le *jeu des marées*, les *mouvements du sol*, les *chutes de météorites* et les *vestiges archéologiques*, dont les relations topographiques ne sauraient être négligées dans les études de Géologie.

Un dernier paragraphe, concernant la STRATIGRAPHIE SYSTÉMATIQUE, se rapporte à la coordination géométrique des faits observés obtenue par le RÉSEAU PENTAGONAL.

Il donne les types de lignes composées de traits et de points qu'on a adoptés pour distinguer les différentes catégories de *Cercle de comparaison*, dans lesquels se résument les *alignements* du *Système de montagnes* ou des autres accidents géologiques.

En regard de chaque catégorie de cercles, est indiquée, par la lettre classique, la catégorie des *points* du RÉSEAU PENTAGONAL qui en sont les *pôles*. Les rapports de position des cercles et des points *principaux* sont rappelés par le diagramme d'un pentagone.

Les cercles de comparaison déjà classés dans le Réseau sont tracés sur la Carte, où ils constituent un canevas qui, au simple point de vue de la détermination des positions, peut, pour ses propriétés sphérodésiques, être comparé au canevas

géodésique formé par les méridiens et les parallèles, et a sur lui l'avantage de s'adapter souvent par ses lignes mêmes aux configurations naturelles. Leurs dénominations sont inscrites dans les cadres des feuilles.

On a de plus tenu à marquer sur chaque feuille les directions des cercles classés qui, sans la traverser, sont assez voisins pour que l'influence du système qu'ils caractérisent puisse s'y manifester. Dans ce but, les directions des cercles et de leurs perpendiculaires, intéressant une feuille de la carte au 320 000<sup>ième</sup>, sont rapportées par le calcul dans un point à peu près central de cette feuille. La — Rose des directions calculées — ainsi construite est figurée dans la feuille d'assemblage qui donne le tableau d'assemblage partiel correspondant, à l'échelle du 1 000 000<sup>ième</sup>. Elle y est superposée à la — Rose des directions observées — construite pour la même région.

L'ensemble des deux Roses est reproduit en petit par deux quadrants aux deux angles inférieurs de chacune des feuilles au 80 000<sup>ième</sup> comprises dans le champ de la feuille au 320 000<sup>ième</sup> pour laquelle il est établi, et les prolongements des directions tracées dans les deux quadrants sont aussi amorcés dans les bords opposés du cadre, de manière à fournir des lignes nettement orientées pour l'étude des alignements parallèles.

Sur chaque feuille de la Carte, les signes et les tracés stratigraphiques employés sont expliqués en marge. Mais on renvoie à la Légende générale pour l'explication des signes stratigraphiques, en très-petit nombre, qui sont placés, dans les Coupes et les Projections longitudinales, sur la seconde ligne d'écriture, au-dessus des profils, et dans les Sections verticales, à la colonne des renseignements divers.

Les Coupes longitudinales sont dirigées d'une manière générale suivant un arc de grand cercle; elles sont alors planes. Lorsqu'il n'en est pas ainsi, par exemple dans le cas où elles sont faites suivant un arc de parallèle, elles con-

stituent en réalité une surface conique, et c'est le développement de cette surface qui est figuré sur la planche.

Les Projections et les Coupes sont employées concurremment.

Toutes les coupes longitudinales sont établies sur l'arc terrestre correspondant au niveau de la mer, avec des échelles égales pour les longueurs comptées sur cet arc de cercle et les hauteurs comptées à partir du même arc pris comme ligne de comparaison ou d'altitude nulle. Elles sont toujours figurées au 80 000<sup>ième</sup>, et le cadre de chaque planche, dont la longueur dépasse celle de la diagonale d'une feuille de la Carte, porte à son bord supérieur un arc de grand cercle tracé à cette échelle, sur lequel court une double division en minutes sexagésimales et en kilomètres pour la mesure des distances. Les mêmes coupes, dessinées à plus grande échelle, avec plus de détail, sont en outre figurées par segments pouvant être raccordés bout à bout. Le raccordement a lieu au moyen de l'arc de cercle du niveau de la mer, qui est tracé en bleu, et de sa corde, qui est amorcée en rouge aux extrémités de chaque segment. L'échelle des segments agrandis est tracée sur les bords latéraux et inférieurs du cadre.

Les désignations sont placées au-dessus des profils et réparties en trois lignes. — Les noms des localités situées sur la coupe, ou à proximité, sont placés sur la première ligne, aux points où ces localités se trouvent ou se projettent. Les écritures de ces noms sont les mêmes que celles de la Carte. Les coordonnées du profil, estimées en grades et minutes centésimales pour les longitudes (Lg.), en grades et minutes centésimales (kilomètres) pour les latitudes (Lt.) et en mètres pour les altitudes (Al.), occupent la seconde ligne. — La troisième ligne est divisée en portées qui correspondent aux affleurements des Étages ou des Groupes, pour recevoir les notations géologiques, lithologiques et techniques ci-dessus mentionnées. Toutes les fois qu'une des désignations topo-

graphiques s'applique à un point situé sur la coupe même, elle est mise en relation avec le profil par un trait.

Quelques Coupes d'ensemble, qui doivent être prolongées dans toute l'étendue de la France, sont l'objet d'une suite de planches contenant chacune le segment compris dans la feuille; le titre du segment qui précise sa direction et son sens rappelle la Coupe d'ensemble dont il fait partie. D'autres planches donnent les Coupes régionales qui offrent un intérêt particulier, et les titres de ces Coupes, qui sont formés, en général, de noms de pays propres à des circonscriptions naturelles, indiquent de plus leur orientation.

Les Sections verticales sont, en général, disposées uniformément dans des planches composées de trois Tableaux, qui peuvent se faire suite l'un à l'autre.

Chaque Section porte en tête : d'abord l'indication de son échelle rendue sensible par une figure ou un objet de dimension connue (par exemple : un piqueur portant une mire de 2 mètres pour les échelles du 100<sup>ième</sup> et du 200<sup>ième</sup>; un hangar de forage ou un moulin à vent de 20 mètres pour les échelles du 1 000<sup>ième</sup> et du 2 000<sup>ième</sup>), et ensuite, autant que possible, la définition, par les coordonnées géodésiques, du sommet de la verticale sur laquelle elle est établie; enfin, la mention des terrains qu'elle traverse.

Lorsqu'il y a intérêt à représenter un ensemble considérable, et que les circonstances autorisent à superposer dans ce but, sans risque d'erreur notable, les résultats de relevés faits dans des localités très-voisines, ces résultats sont raccordés bout à bout sur une verticale convenablement choisie.

Dans tous les cas, on trouve à la dernière colonne du tableau, en regard de chaque tronçon, s'il y a lieu, le nom de l'auteur des renseignements et la désignation des escarpements naturels, des ouvrages d'exploitation, de sondage et de recherche où les mesures ont été prises, précédée du nom du propriétaire, de la date du relevé, etc.

Le cadre des tableaux destinés aux sections des terrains sédimentaires présente, à côté du figuré sommaire des étages et d'une échelle métrique courant dans toute la hauteur de la section, un groupe de colonnes disposées pour le détail des strates : assises, couches, bancs, lits. — Les épaisseurs correspondant à un sondage sont celles qu'il importe de manifester dans les sections verticales; on met donc ordinairement de côté les variations d'orientation et d'inclinaison des strates successives, et l'on figure le détail dans la première colonne, conformément aux sondes générales dont les chiffres, relevés ou calculés d'après les rapports d'altitude, sont inscrits dans la quatrième. Les épaisseurs ainsi représentées, et qui sont chiffrées dans la troisième colonne, mais seulement pour les systèmes de strates appelées Étages, méritent alors plutôt la qualification de hauteur de tranches. L'épaisseur normale d'une strate s'obtient, du reste, facilement en multipliant l'épaisseur figurée ou la hauteur de tranche par le cosinus de l'angle d'inclinaison des couches, et cet angle est donné dans la dernière colonne du tableau, pour chaque tronçon de la section verticale où la stratification s'éloigne notablement de l'horizontalité.

Dans le même cas, la dernière colonne indique aussi la direction de l'horizontale donnée par son orientation, c'est-à-dire par l'angle qu'elle fait avec la méridienne, compté à partir du Nord par l'Est.

Chaque strate distinguée dans le figuré reçoit à la cinquième colonne un numéro d'ordre qui sert, par exemple, à repérer les sections verticales et les perspectives photographiques. La septième colonne du tableau reproduit, sous le titre — Sondes particulières, — les profondeurs mesurées sur les escarpements ou dans les forages. Enfin, les altitudes des limites d'Étages sont cotées dans la huitième. — Lorsque la section provient d'un forage, à chaque profondeur où l'atteinte de la sonde fait changer notablement le niveau de l'eau, on inscrit dans la neuvième colonne le chiffre de la

distance à laquelle l'eau vient s'arrêter au-dessous du sol; on indique de plus dans la dixième colonne, par des lignes verticales ponctuées, les hauteurs de l'eau mesurées dans le puits ou dans le tube d'ascension extérieur à diverses profondeurs du sondage.

Les dispositions précédentes sont simplifiées dans certains cas spéciaux, pour les puits ordinaires, par exemple.

Elles sont nécessairement plus ou moins modifiées, suivant les cas, pour les sections verticales des formations éruptives qui représentent, par exemple, des puits de mines métalliques.

Les positions des lignes suivies par les Coupes longitudinales et des points auxquels se rapportent les Sections verticales sont exactement indiquées sur la Carte de triangulation au 1 600 000<sup>ième</sup>, qui est reproduite avec le Répertoire, et dont les extraits accompagnent, à titre d'étiquettes, les planches des Coupes et des Sections comme les feuilles de cartes. Les lignes sont tracées en pointillé, et les points marqués d'une croix.

Un même sujet comporte souvent plusieurs Perspectives photographiques.

Celle qui se prête le mieux à la description stratigraphique est accompagnée de deux diagrammes, l'un donnant, à l'échelle du plan moyen de l'image, la section verticale du terrain extraite d'une des planches de Sections verticales; l'autre destinée à faire comprendre par un profil raccourci la relation qui existe entre cette section verticale et l'image dont les différentes parties représentent, à des échelles différentes, les plans plus ou moins éloignés du point de vue. Des lettres et des numéros de renvoi précisent la relation et permettent de suivre sur la perspective la description géologique et technique des couches, des veines, etc., données sur la planche même. Lorsqu'il s'agit d'une exploitation, elle n'est souvent distinguée d'autres exploitations voisines que

par le nom du propriétaire, qui est, en tout cas, mentionné dans le titre. Un plan-croquis ou au moins la date du relevé détermine, autant qu'il est possible, l'emplacement des fronts d'exploitation photographiés.

Les perspectives accessoires, dont les planches portent, accentuées, le même numéro d'ordre que la perspective principale, ne sont accompagnées que d'indications sommaires.

Une réduction de la perspective principale ramenant la section naturelle à l'échelle du 1 000<sup>ième</sup> peut prendre place sur une planche de Coupes longitudinales où figure la localité, pour faire apprécier la liaison des faits observés et des généralisations dans lesquelles doit intervenir la théorie.

### III. — ORDRE.

Un troisième Tableau, intitulé **CHRONOLOGIE GÉOGNOSTIQUE** et subdivisé en cinq parties, présente les *Notations* et les *Teintes* qui font connaître l'Age relatif des formations. (Spécimen réduit page 541, bande spécimen pages 544, 545, 547.)

Les démarcations qui doivent être établies dans la double série *sédimentaire* et *éruptive*, pour asseoir ces notations et ces teintes, ne sont bien fixées que par les *discordances de stratification* qui résultent des mouvements de l'Écorce terrestre; à défaut de ces discordances, on les détermine par les distinctions des ensembles dans lesquels des conditions d'*homogénéité relative* ou d'*hétérogénéité graduelle* sont manifestées: sous le rapport inorganique, par le *facies minéral* des formations; sous le rapport organique, par le *caractère des faunes* et des *flores*. Les deux sortes de distinctions sont finalement concordantes.

Chacune des deux séries est ainsi divisée, d'abord au point de vue le plus large, en *Terrains* dont les dénomi-

nations et les notations sont tirées principalement de la légende de la Carte géologique générale.

Les *Terrains* sont ensuite subdivisés en *Étages* dans la série sédimentaire, et en *Groupes* dans la série éruptive.

Le mot *formation*, applicable dans les deux séries, reste disponible, avec sa portée élastique, pour les besoins indéterminés du langage.

La portée des mots *Étages* et *Groupes* est, au contraire, fixée. Ils constituent les désignations générales de coupures définies, dont les termes successifs sont notés et figurés d'après les règles suivantes :

Chaque *Étage sédimentaire* distingué sur la carte au 80 000<sup>ième</sup> est caractérisé par une *lettre romaine* affectée d'un exposant en chiffres arabes ou d'un indice en chiffres romains. La lettre est la même pour tous les *Étages* dont l'ensemble est compris sous une dénomination de *Terrain*; par exemple, *j* pour les *Étages jurassiques*, *t* pour les *Étages du Trias*.

Les exposants et les indices vont en croissant à partir d'un horizon pris pour origine commune en raison de sa constance et de sa netteté; les exposants sont attribués aux *Étages supérieurs*, et les indices aux *Étages inférieurs*.

Lorsqu'une formation comprend plusieurs *Étages* distingués d'autre part ou ne peut être rapportée d'un manière sûre à un *Étage* déterminé, la

Chaque *Groupe éruptif* distingué sur la Carte au 80 000<sup>ième</sup> est caractérisé par une *lettre grecque* affectée d'un indice reproduisant la notation (en lettres et en chiffres) de l'*Étage sédimentaire* contemporain. La lettre est la même pour tous les *Groupes de Roches* de même famille qui correspondent à un même mode général d'éruption, et dont l'ensemble est compris sous la dénomination de *Terrain*; par exemple,  $\pi$  pour les différents groupes de porphyres,  $\gamma$  pour les différents groupes de granites.

Quand il y a incertitude sur l'époque de l'éruption, l'indice chronologique qui distingue le groupe est multiple et marque les *Étages-limites*.

Lorsque plusieurs *Groupes éruptifs* comportent le même indice, on les distingue par des

lettre caractéristique du Terrain dans lequel elle est comprise est accompagnée d'un indice ou d'un exposant multiple ou employée sans exposant ni indice.

La petite lettre est remplacée par la *majuscule* pour les formations d'allure confuse qui, sur quelques points, appartiennent au Terrain caractérisé par cette lettre, mais dont l'âge peut cependant être plus récent.

*exposants* marquant l'ordre de succession.

La lettre grecque caractéristique du Terrain, sans exposant ni indice, est employée pour tout *Groupe* dont l'âge n'a pu être précisé dans la période de ce Terrain.

Des *Sous-Étages* et des *Sous-Groupes* peuvent être distingués par des indices ou des exposants littéraux supplémentaires.

Quand une formation sédimentaire ou éruptive a subi, sans déplacement notable, un remaniement dont l'époque est indéterminée, la lettre de notation chronologique est *barrée de gauche à droite en descendant*. La même lettre est *barrée en remontant* si la formation a subi un métamorphisme accidentel.

Les *teintes conventionnelles* affectées aux affleurements des *Étages sédimentaires* ont été choisies de manière à satisfaire, autant que possible, à diverses conditions, telles que : l'imitation de la teinte dominante du sol, la représentation des *Étages* de composition analogue par des teintes voisines les unes des autres dans un même Terrain, enfin le contraste suffisamment prononcé entre les teintes qui se trouvent le plus habituelle-

Les *teintes conventionnelles* affectées aux affleurements des *Groupes éruptifs* dérivent de l'une des couleurs principales du spectre pour chacune des six principales familles de formations que l'on est amené à distinguer, par l'observation des trois conditions : *crystalline, compacte et vitreuse*, dans les deux séries parallèles de *Roches, feldspathiques et pyroxéniques*, ci-dessus définies. Le *rouge, l'orange et le jaune* sont

ment en contact; les diverses séries de couleurs contrastantes sont d'ailleurs établies conformément à l'ordre naturel des couleurs simples. On a enfin évité d'affecter aux Étages comprenant principalement des Dépôts complexes, détritiques ou métamorphiques, les nuances vives et franches réservées aux Étages formés de dépôts dont les éléments sont plus directement ou plus simplement fournis par les émanations.

Lorsqu'il importe de distinguer localement, à titre de Sous-Étages, une des formations dont se compose un Étage sédimentaire complexe, on double la teinte conventionnelle sur l'affleurement local, et cette teinte doublée, échantillonnée en forme de bande ou d'onglet dans le rectangle de la légende de la feuille, est rappelée de la même manière dans le rectangle de la Légende générale.

Dans une colonne consacrée à la Paléontologie, et intitulée *Fossiles*, sont indiqués, en regard du nom de chaque Étage sédimentaire, les principaux restes organisés que l'on y rencontre. Afin de comprendre dans le cadre restreint du Tableau le plus grand nombre possible de fossiles, on n'a pas mentionné les noms d'auteurs,

affectés aux *granites*, aux *porphyres* et aux *trachytes*; le *vert*, le *bleu* et le *violet* sont affectés aux *diorites*, aux *mélaphyres* et aux *basaltes*. Les teintes vives et franches sont réservées aux Groupes où dominant les Roches nettement constituées, dont elles rappellent, on le voit, les nuances dominantes; les teintes brouillées sont appliquées aux Groupes où dominant les Roches imparfaites ou altérées.

Lorsqu'un groupe éruptif comprend des formations feldspathiques et pyroxéniques enchevêtrées, les rectangles disposés en marge de la feuille ou de la Légende générale, pour donner l'échantillon de teinte conventionnelle, sont coupées en diagonale, de manière à offrir concurremment les deux teintes et les deux notations.

Une colonne consacrée à la Minéralogie et intitulée *Minéraux* indique, en regard des divers Groupes ou des divers Étages, les principales espèces minérales qui y sont disséminées. Les énumérations des minéraux sont faites suivant l'ordre des Substances caractéristiques établi dans l'appendice du tableau de Lithologie

qui sont cependant très-souvent indispensables pour préciser la détermination. Ces noms se trouvent dans les listes plus développées qui accompagnent les séries paléontologiques des fossiles photographiés. L'énumération est faite, pour chaque Étage, suivant l'ordre zoologique établi dans l'appendice du tableau de Lithologie placé à la fin de ces explications. S'il y a lieu de distinguer plusieurs Sous-Étages au point de vue paléontologique, les énumérations des *faunes* et des *flores* de ces Sous-Étages sont faites successivement.

placé à la fin de ces explications. Lorsqu'il y a lieu de distinguer, dans un même Groupe, plusieurs Roches communes, les différentes Roches sont l'objet d'énumérations distinctes, et chaque énumération partielle commence par le rappel de la notation lithologique qui sert à marquer la nature générale de la Roche, conformément aux conventions du tableau de Lithologie. Les énumérations des minéraux qui composent les roches et les matières exceptionnelles des filons, des amas ou des couches sont inscrites, dans les deux colonnes réservées à ces catégories, à la place qui correspond à l'âge de la venue.

*Sur les Cartes, les lettres caractéristiques des Étages ou des Groupes se distinguent par leur plus grande dimension des lettres qui sont employées pour les notations lithologiques.*

*La notation de l'Étage ou du groupe, entre parenthèses, marque les points où la formation est constatée, mais ne peut donner lieu à un contour.*

*Les notations des formations sous-jacentes dont les contours sont tracés en ponctué peuvent être inscrites, également en lettres ponctuéées, auprès de ces contours, du côté inférieur. — Lorsque, par des ouvrages d'exploitation marqués sur la Carte ou même par des fouilles dont on a perdu la trace sur le terrain, on a acquis la certitude que la for-*

formation figurée comme affleurant cache une formation immédiatement sous-jacente dont il y a intérêt à signaler l'existence, mais dont on ne saurait marquer les contours, la notation de cette formation, *Étage* ou *Groupe*, est inscrite en lettres ponctuées au-dessous de la lettre de la formation superficielle, qui en est séparée par une barre, si la superposition est immédiate. La barre est doublée si, la formation invisible étant masquée par plusieurs autres formations, elle mérite toutefois d'être signalée en raison d'un intérêt exceptionnel, par exemple comme étant carbonifère, salifère, métallifère. Dans tous les cas, l'ensemble des notations est entouré d'un cercle, toujours en trait ponctué.

Quand les contours ponctués d'une formation sous-jacente sont accompagnés de lettres caractéristiques, ils peuvent être frangés de la teinte conventionnelle de cette formation, étendue sous la teinte de la formation superficielle convenablement atténuée.

Les Dénominations qui figurent dans les parties 3 et 4 du Tableau, intitulées DÉSIGNATION et CARACTÉRISATION des ÉTAGES SÉDIMENTAIRES, DÉSIGNATION et CARACTÉRISATION des GROUPES ÉRUPTIFS, sont rédigées de manière à spécifier les types dominants des formations dont ils se composent. Il est souvent nécessaire de mentionner, dans la dénomination générale d'un Étage sédimentaire, des Dépôts de plusieurs natures, par exemple des grès, des argiles, des calcaires. On doit souvent de même, dans la dénomination générale d'un Groupe éruptif, mentionner des Roches de plusieurs sortes, par exemple des Roches nettes, des Roches imparfaites ou altérées, et enfin les formations exceptionnelles d'émanation plus ou moins complexes auxquelles on applique les termes de *venue* ou de *remplissage* de filon. Ces dénominations générales, qui concernent l'ensemble de la Carte au 80 000<sup>ième</sup>, ne sont pas reproduites intégralement

dans les légendes particulières des feuilles, pour chacune desquelles on adopte des dénominations abrégées, rappelant autant que possible les dénominations locales usitées dans l'étendue de cette feuille.

Par contre, on a cherché à signaler méthodiquement l'équivalence des types locaux dans le Tableau de la Légende générale. A cet effet, la France a été divisée en trois grandes Régions, dont les périmètres coïncident avec les lignes de partage des trois ensembles naturels formés par les bassins hydrographiques du Nord, du Centre et de l'Ouest réunis, du Sud-Ouest et de l'Est. La Région du Nord, du Centre et de l'Ouest a été divisée en huit secteurs par des droites rayonnant de Paris; la Région du Sud-Ouest a été divisée en quatre secteurs par des droites rayonnant de la Teste-de-Buch, et la Région de l'Est a été divisée en quatre secteurs par des droites rayonnant du Mont-Blanc. Les Secteurs sont désignés par les noms des *massifs montagneux* ou des principales *circonscriptions naturelles* sur lesquelles ils s'appuient. A chaque Secteur correspond dans le tableau une colonne verticale où les types qui lui sont propres sont mentionnés par leurs dénominations locales. L'ensemble de ces colonnes forme la 5<sup>me</sup> partie du Tableau, intitulée RÉPARTITION des ÉTAGES et des GROUPES par SECTEURS GÉOGRAPHIQUES. Dans chacune d'elles les mentions relatives à la *série sédimentaire* occupent la *gauche*, tandis que la *droite* est réservée à celles qui concernent la *série éruptive* et qui sont d'ailleurs écrites *verticalement*.

Pour ne pas donner au tableau de Chronologie géognostique une largeur exagérée, on a renoncé à réunir dans une seule suite de planches les trois systèmes de colonnes des trois Régions; le premier système fait l'objet d'une première suite de huit planches, formant un premier Demi-tableau; une seconde suite de huit planches réunit dans un second Demi-tableau les deux autres systèmes de colonnes.

Sur chaque Demi-tableau, à côté des dénominations résumées dont il peut convenir de restreindre la portée aux huit secteurs décrits par ce Demi-tableau, sont mentionnées, dans les subdivisions d'une colonne intitulée *Synonymies* : d'abord les dénominations des Étages et des Groupes correspondants de l'autre Demi-tableau; ensuite les dénominations systématiques adoptées dans les Cartes des pays limitrophes de la France et celles qui ont été introduites par divers auteurs.

À côté de chacune des colonnes qui comprennent les échantillons des teintes et les notations des Étages et des Groupes pour la Carte au 80 000<sup>ième</sup>, deux colonnes donnent, par les échantillons des teintes avec notations littérales, la série des Subdivisions adoptées pour la Carte réduite au 320 000<sup>ième</sup> et pour la Carte d'ensemble au 1 000 000<sup>ième</sup>. Chaque subdivision géognostique, formée en général de plusieurs des Étages ou des Groupes qui sont distingués dans la Carte au 80 000<sup>ième</sup>, prend la teinte de l'un des Étages ou de l'un des Groupes qu'elle embrasse.

Aux époques *primaires*, *secondaires* et *tertiaires*, les apparitions des roches éruptives tendant à coïncider avec les bouleversements qui déterminent les discordances brusques de stratification, les *Groupes éruptifs* tendent à prendre place, dans la chronologie géognostique, entre les *Étages sédimentaires* qui sont principalement limités par ces discordances, et par suite il semblerait convenable de faire correspondre les rectangles des Groupes à l'interligne des rectangles des Étages. Mais l'imperfection encore très-grande de la chronologie des phénomènes éruptifs ne permet pas d'adopter une telle règle avant que son application ait été éprouvée dans l'étude des régions où ces phénomènes sont très-développés.

La correspondance directe des rectangles paraît d'ailleurs préférable pour les deux extrémités de l'échelle de la Légende. En effet, d'une part, dans les Terrains formés aux

époques les plus anciennes, *antéprimaires* ou *préliminaires*, alors que les phénomènes éruptifs et sédimentaires, de *caractères hybrides*, se succédaient très-rapidement, les divers termes des Groupes éruptifs doivent se retrouver enchevêtrés, et entre eux, et avec les divers termes des Étages sédimentaires; d'autre part, dans les Terrains formés aux époques *post-tertiaires*, dites habituellement *quaternaires*, mais qu'il vaut mieux appeler *récentes*, sinon *finales*, le même enchevêtrement résulte de circonstances tout opposées, parce que les épanchements *volcaniques* proprement dits, qui appartiennent aux périodes de *calme*, se sont produits et se produisent encore en concurrence continue avec les derniers sédiments où domine le caractère des formations de *transport*.

En conséquence, dans la construction du tableau, les rectangles des Groupes éruptifs et des Étages sédimentaires sont, jusqu'à nouvel ordre, placés en correspondance directe, le rapport ainsi marqué devant être interprété dans ce sens que les épanchements rocheux ont eu lieu surtout vers les limites de la période pendant laquelle se sont déposés les sédiments placés sur la même ligne.

---

Les feuilles de la Carte d'ensemble au 1 000 000<sup>ième</sup> et celles de la Carte réduite au 320 000<sup>ième</sup>, comme celles de la Carte détaillée au 80 000<sup>ième</sup>, sont pourvues chacune d'une légende géologique expliquant les notations et les teintes qui y sont employées. Cette légende est divisée en deux parties : la marge gauche est consacrée aux phénomènes sédimentaires, et la marge droite, aux phénomènes éruptifs.

La notice explicative jointe à chaque feuille donne d'ailleurs la description sommaire des Étages et des Groupes qui y sont figurés.

Dans les Sections verticales on applique aux deux pre-

nières colonnes les teintes et les notations de la Carte au 80 000<sup>ième</sup>.

Dans les Coupes et les Projections longitudinales, où l'on ne peut, en général, pousser les subdivisions au même degré de détail que sur les cartes de même échelle, on se conforme autant que possible aux règles suivantes :

Pour les coupes au 80 000<sup>ième</sup>, on distingue au moins les mêmes divisions que sur la Carte au 1 000 000<sup>ième</sup>;

Pour les coupes au 20 000<sup>ième</sup>, on distingue au moins les mêmes subdivisions que dans la Carte au 520 000<sup>ième</sup>;

Pour les coupes au 10 000<sup>ième</sup>, on distingue les mêmes Étages et les mêmes Groupes que dans la Carte au 80 000<sup>ième</sup>.

La corrélation des teintes et des notations employées dans les Coupes longitudinales et dans les Cartes est expliquée, en marge des planches de Coupes, par une échelle géologique où les épaisseurs relatives des formations sont figurées approximativement.

Il est important de noter que la rédaction du tableau de Chronologie géognostique n'est complétée qu'au fur et à mesure de l'exécution des feuilles au 80 000<sup>ième</sup>. Les indications relatives aux feuilles dont les tracés ne sont pas encore arrêtés ne figurent au tableau que sous toutes réserves, et pour faire comprendre dans toutes ses parties l'application du système; le numéro de feuille qui accompagne ces indications est alors écrit en italiques.

Les Soulèvements, c'est-à-dire les crises qui résolvent en bourrelets d'écrasement, en rides ou en remplis les saillies bombées de l'écorce du globe produites lentement autour des méplats pendant les périodes de calme relatif, « offrent, dans l'histoire de la terre, des dates précises, comparables, dans l'histoire de l'humanité, à celles des batailles et des traités qui résolvent les conflits des peuples. » Ces faits doivent donc être signalés au premier chef dans la Chrono-

logie géognostique, et comme toute crise de soulèvement brusque est accusée nécessairement, dans le voisinage de la chaîne de montagne qu'elle a produite, par une discordance brusque de stratification entre les dépôts antérieurs et postérieurs, les soulèvements dénommés par les *Systèmes de montagnes* passant au travers ou à proximité du territoire de la France seraient naturellement figurés sur le tableau chronologique des terrains par des barres tirées au-dessus des Étages qui en ont subi l'influence. Toutefois, faute d'observations stratigraphiques suffisantes, la limite d'influence dans le temps reste encore douteuse, pour plusieurs soulèvements bien déterminés dans l'espace. D'autre part, certaines crises qui ont produit des ridements éloignés ne sauraient être datées avec précision en France, où elles ne se manifestent que par des systèmes de failles, de fentes, de fissures. Ces crises sont cependant d'un grand intérêt, car les fractures, en se propageant, à la manière des lézardes, au travers des nouveaux enduits sédimentaires, ont préparé le *modèle topographique* et tracé les sillons des *cours d'eau*, et c'est ainsi que, pour les cercles de comparaison, on peut trouver dans les noms de fleuves des dénominations dépourvues, il est vrai, de toute signification chronologique, mais d'une grande valeur au point de vue simple de la *Sphérodésie*. Les fentes ont pu d'ailleurs, au moment de leur ouverture, donner passage à des Roches éruptives; mais cette circonstance, qui augmente l'importance apparente du Système et peut fixer sa date, rend, d'autre part, difficile de la représenter sur le tableau des terrains, parce que la barre qui en marquerait l'âge devrait aboutir à l'un des rectangles qui représentent les Groupes éruptifs.

Par ces motifs, on a réuni toute la *Chronologie des soulèvements* dans un Tableau spécial, disposé pour mettre en évidence à la fois et la *direction* de chaque système et son *âge*, ou du moins les limites dans lesquelles il se trouve com-

pris. Ce Tableau forme naturellement l'introduction à la double série des feuilles de la Chronologie géognostique. Il est donc construit en double sur deux feuilles, qui correspondent, l'une au bassin du Nord, du Centre et de l'Ouest, l'autre aux bassins du Sud-Ouest et aux bassins de l'Est.

Sur les deux feuilles, la série sédimentaire est représentée dans un demi-cercle par des *anneaux concentriques* correspondant chacun à un des *Étages* figurés sur la Carte détaillée au 80 000<sup>ième</sup>; les *Systèmes de soulèvements* sont représentés par des *rayons* orientés suivant leurs directions rapportées aux deux points qui résument sous tous les rapports la *polarité* de la France : à *Notre-Dame de Paris* pour la première feuille; au *sommet du Mont-Dore* pour la seconde. Le tracé de chaque rayon est : *plein* dans toute la zone occupée par les *Étages* certainement antérieurs au *Soulèvement*; *ponctuée* dans les *Étages* où les fractures du *Système* se sont prolongées par suite des ébranlements dus aux *Soulèvements* postérieurs; *pointillé en traits longs* dans les *Étages* où son influence directe sur la stratification est discutable. Il est frangé à droite et à gauche avec les couleurs des *Groupes de roches* dont l'éruption est contemporaine du bouleversement.

Dans la figure de cette première partie du Tableau, intitulée *RAPPORTEUR CHRONOLOGIQUE*, les anneaux sont tous d'égale épaisseur, mais la puissance relative des différents *Étages* sont indiquées sur chacune des deux feuilles dans la deuxième partie du Tableau, intitulée *ÉCHELLE CHRONOLOGIQUE* et disposée latéralement en quatre colonnes, où la série sédimentaire complète est figurée d'après les estimations faites respectivement pour les régions correspondantes. On a cherché aussi à représenter dans les mêmes colonnes les développements relatifs des *Groupes éruptifs* aux différentes époques, par un figuré analogue à celui qui a été employé dans l'introduction à l'explication de la Carte générale.

Les circonférences qui limitent la zone des anneaux sont

pourvues d'une graduation décimale, pour mettre le rapporteur en harmonie avec le système géodésique de la Carte de l'État-Major, et le rayon de la circonférence intérieure ayant été pris égal à 0<sup>m</sup>,0637, longueur qui représente la 100 000 000<sup>ième</sup> partie du rayon moyen terrestre de 6 366 000 mètres, l'arc de 1 grade est de 1 millimètre. Les circonférences portent du reste en dehors la division duodécimale, dont le système a été jusqu'à présent usité dans les études géologiques, mais qui doit faire place au système décimal, avec lequel les calculs trigonométriques sont beaucoup plus expéditifs.

Sur le prolongement de chaque rayon qui figure une direction de soulèvement sont inscrits : d'abord l'*orientation*, c'est-à-dire l'angle d'orientation compté du Nord au Sud par l'Est; ensuite la *dénomination géographique* du *Système*; enfin le *point polaire* qui, par le répertoire des *dénominations* et des *itinéraires* correspondants, précise le classement du Cercle de comparaison du système dans le RÉSEAU PENTAGONAL.

#### OBSERVATIONS GÉNÉRALES ET CONCLUSIONS.

Le *Système* de règles conventionnelles dont on vient d'exposer les principes et l'usage est développé dans des Tableaux, qui contiennent : D. IV, la Lithologie et la Stratigraphie, Dn. V à Dn. XIII, la Chronologie géognostique pour les régions du Nord, du Centre et de l'Ouest, et Ds. V à Ds. XIII, la Chronologie géognostique pour les régions du Sud et de l'Est. Le système est, de plus, résumé, pour chacun des deux ensembles de Régions, dans deux tableaux (Dn., Ds.), intitulés *Légende géologique sommaire*.

« En édifiant ce *Système*, on a dû tenter d'instituer non-seulement un *dictionnaire*, un *vocabulaire*, mais une *grammaire*, une *syntaxe*, propres à introduire dans le langage

et l'écriture géologiques une régularité comparable à l'orthographe du langage et de l'écriture ordinaire. Telle a été du moins la direction de mes efforts personnels.

» Le résultat de l'essai peut paraître au premier abord compliqué. D'un autre côté, bien que les principales dispositions de la présente Légende ne soient pas sans précédents, que les notations de la Carte géologique générale de la France y aient été traditionnellement conservées, et que les additions aux indications habituelles aient été faites de manière à rendre leur prise en considération *facultative* pour la personne qui consulte les Cartes, ce qu'il y a d'inusité dans la systématisation proposée peut lui faire encourir la défaveur qu'attire aux innovations les plus nécessaires l'abus des nouveautés irréfléchies. Il n'est donc pas inutile d'opposer d'avance aux critiques prévues une observation philosophique, ou plutôt mathématique, et un rapprochement technique suggéré par l'expression de *texture*, fréquemment employée en Géologie.

» Au point de vue philosophique, on ne saurait méconnaître que l'agencement des *Variables*, de la *Matière*, de l'*Espace* et du *Temps*, opéré en toute chose naturelle sous la double action des principes contrastants de la *Continuité* et de la *Dualité* ou de la *Discontinuité*, se présente dans les questions géologiques avec le maximum de complication.

» Au point de vue de l'exécution, l'établissement des cartes géologiques peut être comparé à la confection des étoffes ouvragées, et, si de telles étoffes étaient produites premièrement avec le rouet et le métier élémentaire, si quelques-unes tenaient même de l'habileté du tisserand des qualités tout à fait supérieures, on ne songerait cependant plus aujourd'hui à aborder leur fabrication sur une grande échelle, sans le secours de la fileuse mécanique et du métier Jacquard.

» Ces observations, ce rapprochement, ne font-ils pas

sentir qu'un système complexe est nécessaire actuellement pour entreprendre une grande Carte géologique?

» Le système d'exécution doit d'ailleurs tenir compte des moyens de reproduction. Or, bien qu'on doive espérer que l'exploitation des nouveaux gîtes de pierres lithographiques remédiera à la rareté actuelle des pierres de grand format, cette rareté semble avertir que la reproduction typographique des dessins est soumise à la loi d'évolution qui, dans l'industrie humaine comme dans l'activité éruptive, fait succéder l'âge des métaux à l'âge de la pierre.

» Le Service de la Carte a dû, en conséquence, se préoccuper de la reproduction par typographie métallique. On a maintenant lieu d'espérer que l'on rendra tout à fait pratique une combinaison dans laquelle la gravure en relief remplacerait la lithographie, et déjà les ressources exceptionnelles de l'Imprimerie nationale ont permis de donner à la typographie proprement dite une large part dans la publication des Cartes et des documents accessoires.

» Dans cette voie l'emploi des types mobiles marque le progrès, mais ce progrès n'est réalisable que si les faits qui doivent être notés sont classés rationnellement, et si le classement est poussé au degré de détail que comporte l'échelle adoptée, de manière que par la combinaison d'un nombre minimum de types élémentaires, on puisse obtenir toutes les notations qu'exige l'état des connaissances acquises.

» Ce sont donc des nécessités de tout genre qui ont amené à construire les tableaux de Lithologie, de Stratigraphie et de Chronologie géognostique. Les nombreuses cases de ces tableaux peuvent paraître, au premier abord, disposées pour tracer, entre les diverses catégories de faits qui y sont distribuées, des démarcations absolues qui seraient antinaturelles. Elles ne sont, au contraire, établies

et multipliées que pour faire ressortir un plus grand nombre de rapports.

» Ces diverses considérations ne donnent-elles pas lieu de penser que l'instrument proposé ici, loin d'être trop compliqué, n'est encore qu'une ébauche fort grossière de l'appareil méthodique dont les Géologues devront bientôt être armés pour satisfaire aux besoins croissants de la civilisation en vulgarisant, dans les Cartes qui résument leurs travaux, les solutions des problèmes infiniment variés que nous offre l'Écorce terrestre ?

» L'institution d'un tel appareil ne peut-elle pas d'ailleurs avoir une importance capitale au point de vue scientifique le plus général et le plus abstrait ?

» Un ensemble, uniformément détaillé, de relevés géologiques embrassant le globe entier, ne serait-il pas la contre-partie de ces tables où les astronomes enregistrent méthodiquement leurs observations, et, de même que, pour le monde planétaire, les tables instituées par Tycho-Brahé ont conduit de la généralisation de Copernic à la classification de Képler dont a été tirée la formule de la *Gravitation*, n'est-il pas permis d'attendre, de l'exécution de ces relevés géologiques uniformisés, les lois primordiales conjuguées d'où se déduirait la formule fondamentale des phénomènes physico-chimiques du monde moléculaire rattachés au principe pour lequel le mot *Lévitation* est déjà préparé ? N'est-ce pas le véritable chemin à suivre pour arriver à la formule générale des actions de réciprocity rapportées au principe unique dont les deux principes complémentaires de la Gravitation et de la Lévitation ne seraient que le dédoublement ?

» Quelle que soit la valeur de ce dernier aperçu, il semble évident, à tous les points de vue, qu'on doit se préoccuper dès à présent de l'établissement d'un *système de relevés géologiques uniformes*, et, après avoir mûri, autant qu'il dépendait de moi, l'étude du projet, je n'hésite pas à sai-

sir l'occasion de réclamer sa mise à l'ordre du jour parmi les questions dont la solution intéresse l'ensemble de l'humanité.

» Le genre de canevas géodésique et le méridien origine des longitudes sont des conditions à régler préalablement. Il ne me paraît pas douteux qu'il n'y ait lieu d'adopter la graduation décimale du cercle, et de revenir au méridien de l'île de Fer, ou mieux de prendre un méridien voisin de Saint-Michel des Açores, qui séparerait encore plus nettement les continents de l'ancien et du nouveau monde. Pour les cartes enfin, les projections gnomoniques me semblent évidemment préférables.

» Terminer par ces motions d'ordre international le programme du Système étudié pour la description géologique de la France, n'est-ce pas se conformer aux traditions du pays où a pris naissance le SYSTÈME MÉTRIQUE DÉCIMAL ? »

I. LITHOLOGIE. (Section gauche du tableau.)

DÉPÔTS SÉDIMENTAIRES.		SILICEUX . . . . . s	SILICO-ARGILEUX. . n	ARGILEUX. . . . . a	SILICO OU ARGILO-MÉTALLIFÈRES. } r	SILICO OU ARGILO-GLAUCONIEUX. } v	SILICO-CALCAIRES OU CALCARO-SILICEUX. } x	ARGILO-CALCAIRES OU CALCARO-ARGILEUX. } m	CALCARO-GLAUCONIEUX. } u	POLOMITIQUES, GYPSEUX ET SALINS. } z	CALCAIRES. . . . . c	CALCARO-FERREUX. . o	FERREUX ET CHARBONNEUX. } e			
GRANULO-SPONGIEUX,	CAILLOUTEUX, GRAVELEUX, NODULEUX,	meubles. . . . . } mous. . . . . } friables. . . . . }	Graviers et cailloutis à éléments principalement siliceux. . . . . } s	Graviers et cailloutis variés. . . . . } n Argiles à silex et à chailles. . . . . }	Cailloutis à galets porphyriques, etc. . . . . } a	Graviers métallifères. . . } Alluvions stannifères, aurifères, etc. . . . . }	Cailloutis à nodules phosphatés (coquins). . . . . } v	Craies tendres à silex. . . . . } x	Cailloutis à galets argilo-calcaires. . . . . } m		Calcaires meubles à rognons dolomitiques (têtes-de-chat). . . . . } z	Pisolithes calcaires. . . } Cailloutis à galets calcaires. . . . . }	Fer pisolitique sans ciment. . . . . } e Tourbes. . . . . }			
		agrégés. . . . . } plastiques. . . . . } fissiles. . . . . }	Poudingues siliceux. . . . . } s	Poudingues porphyriques. . . . . } n		Argiles à nodules pyriteux, à fer géodique, à sphérosidérites. . . . . } r	Grès et Argiles à galets. Nodules glauconieux et phosphates. . . . . } v	Craies résistantes à silex. Calcaires à cherts. . . . . } x	Agglomérats argilo-calcaires. . . . . } m	Agglomérats, calcaires glauconieux et siliceux (tourtia). . . . . } u		Craies et calcaires à nodules dolomitiques (bricans). . . . . } z	Calcaires agglomérés. . . } Calcaires grossiers, coquilliers, à entroques, à encrines, coralliens. . . . . }	Fer carbonaté lithoïde avec combustible. . . . . } e		
	SABLEUX, TERREUX, FIBREUX, GRANULEUX,	meubles. . . . . } mous. . . . . } friables. . . . . }	Sables quartzeux. . . . . } s	Vases, limons sableux. . . } Gaise molle. . . . . } Sables feldspathiques (arènes). . . . . }	Vases argileuses. . . . . } a	Vases ocreuses et sables ferreux. . . . . } r	Sables glauconieux. . . . . } v	Sables coquilliers (faluns). . . . . } x	Vases calc. (tangues). . . } Limos calcarières (loess). . . . . }	Sables calcaro-glauconieux. . . . . } u		Dolomies sableuses. . . . . } z	Sables calcaires (groises). Craies tendres. . . . . } c	Fer oolithique sans ciment. . . . . } e Terre d'ombre. . . . . }		
		agrégés. . . . . } fissiles. . . . . }	Tripolis.—Grès siliceux. . . . . } s	Glaises sableuses grises. } Grès argileux gris. . . } Grès feldspathiques (arkoses). . . . . }	Glaises ou Argiles plastiques blanches et grises. . . . . } a	Glaises bariolées. . . . . } r	Glaises vertes. . . . . } v	Molasses. Grès calcaires. Craies sableuses (tuffeaux). . . . . } x	Marnes grasses (fissiles par dessiccation). . . } Craies sableuses et micacées (tuffeaux). . . . . }	Calcaires glauconieux. . . } Craies glauconieuses résistantes. . . . . }		Marnes magnésiennes. . . } Dolomies oolithiques. . . } Gypses fibreux. . . . . }	Calcaires à miliolites. . . } Craies résistantes. . . } Calcaires oolithiques. . . }	Calcaires oolithiques bleuâtres ou ferrugineux. . . . . } o	Fer oolithique agrégé (mine brune, bleue et rouge). . . . . } e Lignites. . . . . }	
COMPACTES,	A GRAINS INDISCERNABLES,	uniformes. . . . . } massifs, solides, taillables. . . . . }	Silex meuliers. . . . . } s	Gaïses dures. . . . . } n	Argiles solides blanches ou grises. . . . . } a	Argiles ocreuses. . . . . } r	Argiles solides vertes. } Argiles solides glauconieuses. . . . . }	Travertins siliceux. . . . . } x	Marnes solides. . . . . } m		Calcaires verdâtres (banc vert). . . . . } u	Calcaires dolomitiques compactes. . . . . } z	Travertins non siliceux. } Calcaires compactes. . . } Calcaires lithographiques. . . . . }	Calc. compactes bleuâtres ou rubéfiées (lias). } o	Limonites compactes. . . } e Houilles compactes. . . }	
		zonés. . . . . }	Silex zonés. . . . . } s	Jaspes. . . . . } n	Argiles smectiques. . . . } Argiles schisteuses. . . } Argiles schisteuses oléifères. . . . . }	Argiles schisteuses pyritifères (kupferschiefer). } Jaspes ferreux. . . . . }		Calcaires siliceux zonés. } Calcaires marneux zoné. . . . . }							Hématites. . . . . } e Houilles schisteuses. . . }	
GRANULO-LAMELLAIRES,	GRENUS, SCHISTEUX, ESQUILLEUX,	tenaces. . . . . } feuilletés. . . . . } polissables. . . . . }	Grès lustrés. . . . . } s	Grauvakes et psammites gris (keruelles). . . . . } n	Schistes ardoisiers et phyllades grises. . . . . } a	Grauvakes et psammites rouges. . . . . } r	Phyllades vertes satinées. . . . . } v					Dolomies feuilletées (cargneules). . . . . } z	Calcaires esquilleux blancs, gris ou noirs (marbres). . . . . } c	Calcaires esquilleux rouges (marbres). . . . . } o	Anthracites. . . . . } e	
		durs. . . . . } entrelacés. . . . . } clivables. . . . . }	Quartz gras. . . . . } s	Schistes micacés quartzeux. . . . . } n	Schistes pailletés. . . . . } a	Quartzites oligistifères (labirites). } Schistes oligistifères. . . }	Schistes talqueux. . . . . } v						Dolomies saccharoïdes. } Anhydrite. . . . . } Gypses saccharoïdes. . . } Sel gemme. . . . . }	Calcaires saccharoïdes (marbres statuaire). . . } c		Fer oligiste écaillé ou grenu. . . . . } e
	CONGLOMÉRÉS, RUBANÉS, RADIÉS, PORPHYROÏDES,	tenaces. . . . . } feuilletés. . . . . } polissables. . . . . }	Brèches et conglomérats quartzeux. . . . . } s	Conglomérats quartzoschisteux gris. . . . . } n	Conglomérats schisteux. . . . . } a	Conglomérats quartzoschisteux rouges et bariolés. . . . . } r			Calcaires à phthanites et à nodules siliceux. . . . . } x	Calcaires nodulo-schisteux gris (kramenzelstein). . . . . } m		Calcaires nodulo-schisteux bariolés (marbres Campan, cornstones). } u		Brèches calcaires blanches, grises et noires (marbres). . . . . } c	Brèches calcaires et calcaires noduleux rouges (marbres griottes). . . } o	
		durs. . . . . } entrelacés. . . . . } clivables. . . . . }		Gneiss métamorphiques. } Pétrosilex globuleux. . . }	Schistes maclifères. . . . } a		Gneiss talqueux métamorphiques. . . . . } v		Cipolins micacés métamorphiques. . . . . } x	Calcaires nodulo-schisteux métamorphiques. . . . . } m		Cipolins talqueux métamorphiques. . . . . } u			Calcaires saccharoïdes veinés métamorphiques (marbres turquins). . . } o	

R. EXCEPTIONNELLES émanant DES ROCHES BASIQUES X TYPES : MAGNÉTITE, CALCITE.	ROCHES COMMUNES ET DE DÉPART DITES PYROXENIQUES.					ROCHES COMMUNES ET DE DÉPART DITES FELDSPATHIQUES.					R. EXCEPTIONNELLES émanant DES ROCHES ACIDES. U TYPES : QUARTZ, OLIGISTE.	ROCHES ÉRUPTIVES.	
	χ TYPE ÉCLOGITE.	ε TYPE : EUPHOTIDE.	τ TYPE : DIABASE.	α TYPE : DIORITE.	σ TYPE : SYÉNITE.	μ TYPE : KERSANTON.	ο TYPE : OLIGOCLASITE.	γ TYPE : GRANITE.	ρ TYPE : PROTOGINE.	π TYPE : PEGMATITE.		U TYPES : QUARTZ, OLIGISTE.	nettes.
(Eaux minérales) . . . . . Sel. . . . . Soufre. . . . . Pétrole. . . . .			Laves pyroxéniques ou basaltiques. . . . . Obsidiennes lourdes d'un noir opaque (gallinaces). . . . .					Laves feldspathiques ou trachytiques. . . . . Obsidiennes légères complètement vitreuses. . . . .			(Eaux minérales) . . . . . Geyserites. . . . . Sel. . . . . Soufre. . . . .	nettes.	
Boues des salses. . . . . Boues vitrioliques. . . . . Fer pisolithique. . . . . Pisolithes calcaires. . . . .			Cendres lourdes et scories. . . . . Tufs ocreux et Piperins. . . . .				Ponces et Cendres légères. . . . . Pouzolanes et Tufs ponceux. . . . .				Boues des solfatares. . . . . Quartz sableux non cristallisé. . . . . Hématite oolithique. . . . .	imparfaites ou altérées. pulvérulentes.	LAVIQUES.
Pyrites magnétiques. . . . . Fer chromé. . . . . Bitume. . . . .	Ophites. . . . . Lherzolites. . . . . Serpentes. . . . .	Trachydolérites. . . . . Haüyophyres. . . . . Palagonites. . . . .	Basaltes. . . . . Dolérites. . . . .	Andésites. . . . . Néphélinites. . . . . Rétinites foncées (Pechsteins). . . . .	Trachytes syénitiques. . . . . Leucitophyres. . . . .	Trachytes noirs. . . . . Trachytes micacés. . . . . Phonolithes. . . . .	Trachytes br us. . . . . Trachytes oligoclasiques. . . . .	Trachytes jaunâtres ou gris à sanidine. . . . . Sanidinophyres et Rétinites clairs. . . . .	Trachytes verdâtres ou rosés à sanidine. . . . .	Trachytes blancs quartzifères. . . . . Porphyres molaïres. . . . . Perlites. . . . .	Quartz opalin ou rétinite. . . . . Hématite fibreuse. . . . .	nettes.	
Glauconies. . . . . Tufs ferreux. . . . . Gypses fibreux. . . . . Tufs calcaires. . . . .	Serpentes terreuses. . . . . Ophicalces. . . . .		Vakes. . . . . Tufs basaltiques et palagonitiques. . . . .				Domites. . . . . Tufs phonolithiques et trachytiques. . . . .			Domites siliceuses. . . . . Tufs à opales. . . . .	Quartz spongieux ou granulé. . . . . Quartz ferrugineux (gossan). . . . .	imparfaites ou altérées. tuméfiées.	TRACHYTIQUES et BASALTIQUES.
Cuivres pyriteux. . . . . Magnétite compacte. . . . . Bitumes solides. . . . .	Variolites. . . . . Jades amphiboliques. . . . . Epidosites. . . . .	Mélaphyres labradoriques c'est-à-dire à cristaux de labradorite. . . . . Gabbros. . . . .	Mélaphyres pyroxéniques c'est-à-dire à cristaux de pyroxène. . . . . Trapps. . . . .	Porphyres dioritiques. . . . . Cornéennes. . . . .	Porphyres syénitiques. . . . . Porphyrites. P. oligoclasiques avec amplibole. . . . .	Porphyres micacés. . . . . Pétrosiles ou Rétinites foncées. . . . .	Porphyres feldspathiques à oligoclase peu ou point quartzifères. . . . . Eurites brunes. . . . .	Porphyres rouges à orthose plus ou moins quartzifères. . . . . Eurites rougeâtres. . . . .	Porphyres verts à orthose plus ou moins quartzifères. . . . . Eurites verdâtres. . . . .	Pyromérides. . . . . Porphyres très-quartzeux métallifères (Elvan). . . . . Pétrosiles (hällfältina). . . . .	Jaspes. Greisen. . . . . Quartz calcédoines. . . . . Pyrites. Pyrolusites. . . . . Oligistes compactes. . . . .	nettes.	
Ocres. . . . . Anhydrites et gypses. . . . . Dolomies ferrifères. . . . . Calcites. . . . .	Amygdaloïdes à noyaux calcaires. Spilites. . . . .		Tufs trappéens amygdaloïdes. . . . . Brèches mélaphyriques. . . . .		Amygdaloïdes à agates. . . . .	Argilolithes. . . . .		Argilophyres. . . . . Conglomérats porphyriques. . . . .		Argilolithes siliceuses. . . . . Lithomarges. . . . . Calamines. . . . . Hématites. . . . .	Lithomarges siliceuses. . . . . Lithomarges. . . . . Calamines. . . . . Hématites. . . . .	imparfaites ou altérées. terreuses.	PORPHYRIQUES et TRAPPÉENNES.
Galènes. . . . . Fer titané. . . . . Magnétite cristalline. . . . . Graphite écailléux. . . . .	Amphibolites. . . . . Eclogites. . . . . Chlorites. . . . .	Diabases labradoriques ou à labrad. dominant. Euphotides labradoriq. Euphotides à smaragd.	Diabases pyroxéniques ou à pyroxène dominant. Euphotides diallagiques Hyperites. . . . .	Diorites à labradorite ou à oligoclase. . . . . Miascites amphiboliques à néphéline. . . . .	Syénites ou granites amphibole peu quartz, à oligoclase et orthose. S. zirconiennes. Miasc.	Kersantons, granites sans quartz à mica bronzé ou biotite dominant. . . . .	Oligoclasite, granites peu ou point quartzifères sans orthose. . . . . Granites grenatifères. . . . .	Granites communs quartzifères à orth., oligocl., muscovite et biotite. Granites à dichroïte, etc. . . . .	Protogines ou granites quartzifères à orthose, oligocl., biotite et talc. P. amphiboliques. . . . .	Granites très-quartzifères à orthose et muscovite. Pegmatites graphiques à orthose et quartz. . . . .	Hyalomictes. H. tourmal. Quartz hyal. amet. enf. Cassitérite. Oligiste. . . . . Blende. Mispickel. . . . .	nettes.	
Apatites. . . . . Sideroses. . . . . Calciphyres. . . . .	Pierres ollaires. . . . .		Arènes ocreuses. . . . . Brèches diabasiques et syénitiques. . . . .		Arènes syénitiques. . . . .	Minettes. . . . .		Arènes kaolinuses et Arkoses éruptives. . . . . Brèches de granites et de micaschistes. . . . .		Arènes quartzifères. . . . . Kaolins quartzifères. . . . .	Hyalomictes stéatitiques. Quartz laiteux. . . . . Quartz sableux cristallisé Fluorine. Barytine. . . . .	imparfaites ou altérées. arénacées.	GRANITIQUES et DIORITIQUES.
Gneiss et schistes graphitiques. . . . .	Amphibolites schisteuses Talcschiste. . . . .	Euphotides schisteuses. . . . .	Diabases schisteuses. . . . .	Diorites schisteuses. . . . .	Gneiss amphiboliques. . . . .	Gneiss micacés sans quartz. . . . .	Gneiss grenatifères. . . . . Leptynites grenatifères. . . . .	Gneiss communs. . . . .	Gneiss talqueux. . . . .	Gneiss blanc. Leptynites quartz. (weissstein). . . . .	Gneiss et schistes pyriteux (fahlband). . . . .	nettes.	
Cipolins. . . . .	Chlorites schisteuses. . . . .		Schistes chloritiques et talqueux avec amphibole, etc. . . . .			Schistes micacés. . . . .	Micaschistes grenatifères. . . . .	Micaschistes communs. . . . .	Micaschistes talqueux. . . . .	Micaschistes à disthènes. . . . .	Micaschistes quartzifères. . . . .	imparfaites ou altérées. foliacées.	GNEISSIQUES.

CONDITIONS DE L'ÉPANCHEMENT.

Fusion : Hydrothermique ou chimique ~ ; Mixte : + ; Pyrothermique ou ignée ^ .

(Voir l'appendice.)

## APPENDICE AU TABLEAU DES CONVENTIONS DE LITHOLOGIE.

FOSSILES. — FORMES ORGANIQUES qui accidentent les textures générales DES DÉPOTS SÉDIMENTAIRES.				CONDITIONS de la SÉDIMENTATION.			
RÈGNES.	EMBRANCHEMENTS.		CLASSES.		NATURE DES EAUX.		
	DÉNOMINATIONS.	Signes.	DÉNOMINATIONS.	Signes.	Lacustre ou fluviale.	Fluvio-marine ou d'ontense.	Marine.
ANIMAL. (Signes collectifs A, S, O.)	VERTÈBRÉS.	v	Mammifères. . . . . Oiseaux. . . . . Reptiles. . . . . Poissons. . . . .	v s s s	3 3 3 3	3 3 3 3	3 3 3 3
	ARTICULÉS et ANNELÉS.	c	Arachnides. . . . . Insectes. . . . . Crustacés. . . . . Annélides. . . . .	c		s	
	MOLLUSQUES.	m	Céphalopodes. . . . . Brachiopodes. . . . . Gastropodes. . . . . Acéphales. . . . .	m	3 3 3 3	3 3	3 3 3 3
	RAYONNÉS et SPONGIAIRES.	^	Échinodermes. . . . . Polypes. . . . . Aculéphes Spongiaires	^	3 3 3 3		3 3 3 3
	MOLLUSCOIDES et PROTOZOAIRE.	.	Rotifères. . . . . Bryozoaires. . . . . Foraminifères. . . . . Infusoires. . . . .	.	3	s	3
	VEGETAL.		Dicotylédonées et Monocotylédonées. . . . . Conifères et Cycadées. . . . . Fougères, Equisétacées, etc. . . . . Algues, Lichens et Champignons. . . . .		3	3	3

Signes de liaison placés avant la lettre lithologique.

## APPENDICE AU TABLEAU DES CONVENTIONS DE LITHOLOGIE.

CONDITIONS de L'ÉPANCHEMENT.			FORMES INORGANIQUES OU DE CRISTALLISATION qui accidentent les textures générales des ROCHES ÉRUPTIVES.	
MODE DE FUSION.			TEXTURES FONDAMENTALES dans lesquelles se développent les diverses accidentations.	
Hydrother- mique ou chimique.	Mixte	Pyro- thermique ou ignée.	CONDITIONS TYPIQUES D'UNIFORMITÉ.	
3	3	3	. . . Rétinoïde (des rétinites). . . . . . Lithoïde (des pétrosiles). . . . . . Granitoïde (des granites). . .	VITREUSE. COMPACTE. CRISTALLINE.
			TEXTURES ACCIDENTÉES COMBINÉES OU MODIFIÉES.	CONDITIONS TYPIQUES D'ACCIDENTATION.
3	3	3	. . . Tephroïde (des cendres). . . . . . Argiloïde (des argilolithes). . . . . . Arénoïde (des arènes). . .	CONFUSE.
3	3	3	. . . Tuffacée et Scoriacée. . . . . . . . Conglomérée. . . . . . . . Brechiforme. . . . .	FRAGMENTAIRE.
3	3	3	. . . Vacuolaire (des laves). . . . . . . . Amygdaloïde. . . . . . . . Schistoïde (des micaschistes). . . . .	CELLULEUSE.
3	3	3	. . . Perle (des perlites). . . . . . . . Varioloïde (des variolites). . . . . . . . Orbiculaire (granito-globuleuse)	GLOBULEUSE.
3	3	3	. . . Trachyloïde. . . . . . . . Porphyroïde. . . . . . . . Syénitoïde (granito-porphyroïde)	MARQUETÉE.
3	3	3	. . . Moirée (des obsidiennes). . . . . . . . Jaspée (des pétrosiles). . . . . . . . Rubanée (des gneiss). . . . .	ZONÉE.

Signes de liaison placés après la lettre lithologique.

APPENDICE AU TABLEAU DES CONVENTIONS DE LITHOLOGIE.

SUBSTANCES CARACTÉRISTIQUES IMPRÉGNANTES OU DISSÉMINÉES.					
Dans les dépôts sédimentaires.	CATÉGORIES des SUBSTANCES DISTINGUÉES. NON OXYGÉNÉES.	Dans les roches éruptives.	Dans les dépôts sédimentaires.	CATÉGORIES des SUBSTANCES DISTINGUÉES. OXYGÉNÉES.	Dans les roches éruptives.
⋈ ⋈ ⋈	(Cyanures?) Arséniures, etc. (Ammonium?)	⋈ ⋈ ⋈	⋈ ⋈ ⋈	Azotates, Phosphates, etc. (Oxyde d'azote.)	⋈ ⋈ ⋈
⋈ ⋈ ⋈	Carbures d'Hydrogène. Carbone.	⋈ ⋈ ⋈	⋈ ⋈ ⋈	Carbonates. (ac. Carbonique.)	⋈ ⋈ ⋈
⋈ ⋈ ⋈	Métaux.	⋈ ⋈ ⋈	⋈ ⋈ ⋈	Oxydes métalliques.	⋈ ⋈ ⋈
⋈ ⋈ ⋈	Sulfures, Sélénures, etc. Soufre.	⋈ ⋈ ⋈	⋈ ⋈ ⋈	Sulfates, Borates, etc. (ac. Sulfureux, ac. Borique.)	⋈ ⋈ ⋈
⋈ ⋈ ⋈	Fluorures, Chlorures, etc. (Ac. Chlorhydrique.)	⋈ ⋈ ⋈	⋈ ⋈ ⋈	Silicates, Titanates, etc. Silice, ac. Titanique, etc.	⋈ ⋈ ⋈

Signes combinés par subscription avec les traits d'union qui marquent les conditions de la sédimentation ou de l'éruption.

(Tableau transformé.)

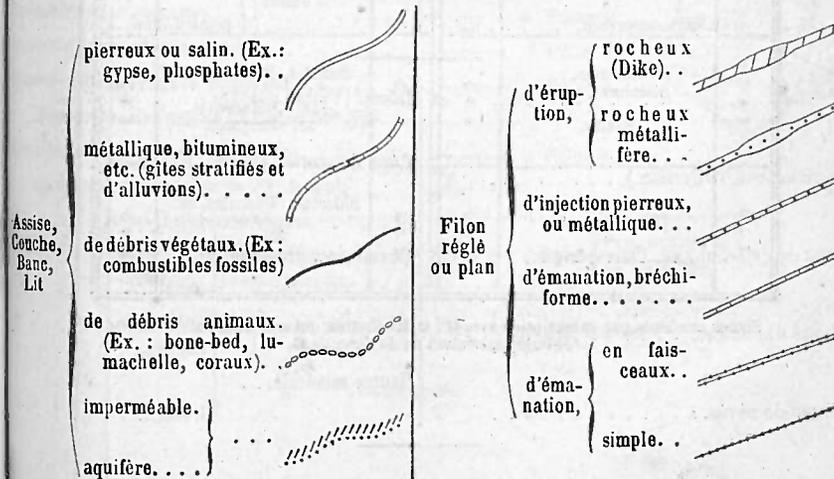
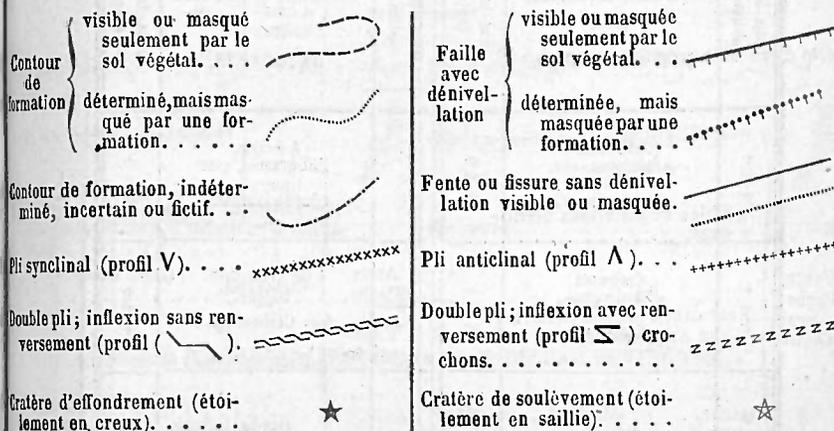
II. STRATIGRAPHIE.

Feuille D. IV.)

ORIENTATION et INCLINAISON des SURFACES STRATIGRAPHIQUES :

Horizontalité	↕	30° à 40° ↗	27° à 36°	70° à 80° ↘	63° à 72°
0° à 10° ↗	0° à 9°	40° à 50° ↗	36° à 45°	80° à 90° ↘	72° à 81°
10° à 20° ↗	9° à 18°	50° à 60° ↗	45° à 54°	90° à 100° ↘	81° à 90°
20° à 30° ↗	18° à 27°	60° à 70° ↗	54° à 63°	—	Verticalité.

ALTITUDE estimée d'un POINT STRATIGRAPHIQUE : Ex (63).



Tuf stalagmitique. . . . .		Colonne, Veine et Filon tubulaire	d'éruption, rocheux. . . . . rocheux métallifère.
Puits naturel comblé de matériaux détritiques. (Tuyau d'orgue). . . . .			
Gîte de fossiles F	{ Végétaux (silicifiés, etc.) . . . Animaux (têts, empreintes, etc.)		d'injection pierreuse, ou métallique. . . . . (Gîte de minéraux M).
Source, puits naturel. . . . .			
Perte d'eau (abîme, entonnoir, endouzoir). . . . .			d'émanation, confus. . . . . net. . . . .

Fente, Poche, Caverne, Grotte.	{ avec stalactites. . . . . comblée de matériaux détritiques. . . . . avec débris animaux. (Ex. brèche à ossements). . . . . sèche. . . . . avec lac souterrain. . . . .	Amas, Poche, et Filon- couche	{ d'éruption, rocheux. . . . . rocheux métallifère, (Stockwerk). . . . . de réaction. (Gîtes calamitaires). . . . . d'imprégnation et cloisonné. . . . . d'émanation, tuffacé. . . . . pisolitique. . . . .	

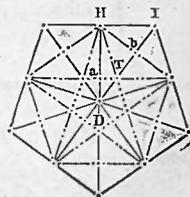
Éboulis. . . . .		Dôme. (Volcan préparé). . . . .
Ensamblément. (Direction). . . . .		Cône de scorie. (Volcan éphémère). . . . .
Cône de déjection. . . . .		Cheminée volcanique. { active. . . . . éteinte. . . . .
Limite des neiges. . . . .		
Cirque de névés. . . . .		Source minérale. . . . . { chaude. . . . . froide. . . . .

Glacier. (Direction). . . . .		Coulée. . . . .	
Moraine. . . . .		Bombes volcaniques. . . . .	
Bloc erratique . . . . .		Solfatare. . . . .	
Puits d'érosion (Ex : marmite de géant). . . . .		Salse. . . . .	
Stries d'érosion. . . . .		Fumerolle. . . . .	
		Moffettes. . . . .	

Jeu des marées. . . . .	Ex. : ± 3,25	Ligne séismique. . . . .	
Côte en voie d'immersion. . . . .		Côte en voie d'émersion. . . . .	
(Vestiges archéologiques : tumulus, restes humains, traces d'industrie préhistorique). . . . .		(Météorite). . . . .	

CERCLES DE COMPARAISON classés par le RÉSEAU PENTAGONAL :

Primitifs. . . . .	-----	Pôles H.
Octaédriques ou Icosaédriques. . . . .	-----	Pôles I.
Dodécaédriques réguliers. . . . .	-----	Pôles D.
Dodécaédriques rhomboidaux. . . . .	-----	Pôles T.
Hémi-Hexatétrédriques diagonaux. . . . .	-----	Pôles a.
Bissecteurs des angles de 60° = 66°, 666.		
Hémi-Hexatétrédriques diamétraux. . . . .	-----	Pôles b.
Bissecteurs des angles de 36° = 40°.		
Auxiliaires. {	-----	Pôles { c; d, e; f, g; h, k, l. m, n; p, etc.
Hémi-Hexatétrédriques. . . . .		
Trapézoédriques. . . . . Diamétraux, Diagonaux, etc. . . . .		



(Ces cercles sont amorcés dans les cadres des feuilles.)

Formations Sédimentaires.

Formations Eruptives.

III. — CHRONOLOGIE GÉOLOGIQUE (Suite).

RÉGIONS DU NORD, DU CENTRE ET DE L'OUEST.

BASSINS DE L'ESCAUT, DE LA MEUSE, DU RHIN, DE LA LOIRE, DE LA VILaine, DE L'ORNE, DE LA SEINE ET DE LA SOMME.

3. DÉSIGNATION ET CARACTÉRISATION

5. — RÉPARTITION DES ÉTAGES ET DES GROUPES PAR SECTEUR GÉOGRAPHIQUE.

4. — DÉSIGNATION ET CARACTÉRISATION

DES Étages.

DES Groupes.

DÉSIGNATION DES TERRAINS.

DÉSIGNATION DES TERRAINS.

TERRAINS RÉCENTS (À SUPERPOSITION DOUTEUSE).

T. Pliocène.

Table with columns for Denominations, Notations, Synonymes, and Fossiles. Rows include Dépôts meubles sur les pentes et dunes, Alluvions modernes et tourbes, Limons et graviers anciens des vallées, etc.

Table with columns for Sector I to Sector VIII, listing geological features and their notations across various regions like Paris, Ardennes, Vosges, etc.

Table with columns for Denominations, Notations, and Synonymes. Rows include Tufs calcaires de l'Auvergne, Laves et scories récentes de l'Auvergne, etc.

TERRAINS RÉCENTS (À ÉPANCHEMENTS ENCHÊTRÉS).

T. Volcanique.



5. — RÉPARTITION DES ÉTAGES ET DES GROUPES PAR SECTEUR GÉOGRAPHIQUE.

SECTEUR I. PARIS. BRAY ET BOULONNAIS.	SECTEUR II. PARIS. ARDENNES.	SECTEUR III. PARIS. VOSGES.	SECTEUR IV. PARIS. CÔTE-D'OR ET FOREZ.	SECTEUR V. PARIS. MASSIF CENTRAL.	SECTEUR VI. PARIS. POITOU ET ANJOU.	SECTEUR VII. PARIS. BRETAGNE.	SECTEUR VIII. PARIS. COTENTIN, NORMANDIE.
<p><b>m<sup>1</sup></b> Bief à silex avec sables bariolés de la Picardie. — Terre à pannes des environs de Montdidier (21). — Argile à meulière de la forêt de Montmorency (48).</p> <p><b>m</b>, Meulière à limnées et planorbis et meulière à potamidés du plateau de Cormeilles (48). — Meulière à limnées de Montmorency et de Carnelle (<b>m</b>) (48).</p> <p><b>m</b>, Sables supérieurs des environs de Marines (32). — Sables et grès, marnes à huîtres et calcaire marin de la butte de Sannois (48). — Sables jaunes de Bréval (47) et du Mont-Valérien (48). — Sables jaunes de Montmorency (48). — Grès à <i>Natica crassatina</i> de Montmorency (48). — Sables ferrugineux avec hématite brune de Montmartre. — Marnes à huîtres de Montmartre (48). — Calcaire compacte à <i>Cerithium trochleare</i> de Montmartre (48).</p> <p><b>e<sup>5</sup></b> Marne à rognons siliceux (rudimentaire) de Montmartre (48).</p> <p><b>e<sup>4</sup></b> Glaises vertes d'Écouen et de Monsoult (48). — Glaises vertes, marnes blanches et marnes jaunes à cyrènes d'Orgemont et de Montmartre (48).</p>	<p><b>m<sup>1</sup></b> Argile à meulière du mont Pagnotte (32) et de la forêt de Villers-Cotterets (33).</p> <p><b>m</b>, Meulière fossilifère du mont Pagnotte (32).</p> <p><b>m</b>, Sables supérieurs du mont Pagnotte (32), de la forêt de Villers-Cotterets et du Tardenois (33). — Argiles jaunes et vertes avec cyrènes et cérithes de Saint-Christophe-en-Halatte (32).</p> <p><b>e<sup>5</sup></b> Marnes blanchâtres et travertins de la forêt de Fère (33).</p> <p><b>e<sup>4</sup></b> Glaises vertes des forêts de Villers-Cotterets et de Fère (33). — Calcaire rubané de la forêt de Villers-Cotterets (33). — Glaises vertes de Dammartin (48).</p>	<p><b>m</b>, Travertin de Doue (49) et du mont Aiguillon (66).</p> <p><b>m</b>, Grès et sables supérieurs de Doue et du Tartre (49). — Sables et grès du mont Aiguillon (66). — Sables jaunes et grès à cérithes de Romainville (48). — Marne à huîtres des Buttes-Chaumont (48).</p> <p><b>e<sup>5</sup></b> Meulière de la Ferté-sous-Jouarre (49). — Meulière fossilifère de Carnetin (49). — Crayon blanc du plateau de la Brie.</p> <p><b>e<sup>4</sup></b> Glaises vertes des vallons de la Brie. — Glaises vertes à rognons et glaises jaunes à cyrènes des Buttes-Chaumont (48).</p>	<p><b>m</b>, Calcaire lacustre de la forêt de Fontainebleau (80).</p> <p><b>m</b>, Grès et sables de la forêt de Fontainebleau (80). — Marnes à huîtres et calcaire miliolitique à fossiles marins de la vallée du Loing. — Marnes à huîtres avec cérithes de Bric-Comte-Robert (65).</p> <p><b>e<sup>5</sup></b> Calcaire fétide de Moret (80) et de Montreuil (81). — Calcaire de Château-Landon et de Souppes (80). — Meulière de la Brie. — Marnes à limnées de Gesson (65).</p> <p><b>e<sup>4</sup></b> Glaises vertes de la Brie, de Moret (80) et de Champagne (81). — Calcaire oolithique d'Héricy (65). — Lit siliceux du Châtelot (66). — Marnes jaunes à strontiane sulfatée de Ville-neuve-Saint-George (65).</p>	<p><b>m<sup>1</sup></b> Sables à <i>Dinotherium</i> de Beaugency (94). — Sables et argiles de l'Orléanais et de la Sologne.</p> <p><b>m</b>, Calcaire à hélices du Gâtinais et de la Beauce. — Marnes blanches, marnes verdâtres et calcaires de la Beauce.</p> <p>Calcaire à <i>Cerithium Lamarcki</i> et à ossements de la Ferté-Aleps (65).</p> <p><b>m</b>, Grès à pavés de la forêt de Fontainebleau (80), de Mondeville et de Chamarande (65). — Grès de Marcoussis (65). — Sables coquilliers d'Ormy (80). — Sables blancs d'Étampes (65). — Sables marins de Jeurre (65), d'Ormesson (80) et de Juvisy (65). — Calcaire à <i>cerithium trochleare</i> de Fresnes-Rungis (65).</p> <p><b>e<sup>5</sup></b> Meulière de Corbeil (65) et de Villejuif (48). — Marnes et calcaires de la Brie. — Travertin fossilifère d'Arpajon (65).</p> <p><b>e<sup>4</sup></b> Glaises vertes d'Étréchy (65). — Glaises vertes et calcaire oolithique à ossements de tortues de Villejuif (48).</p>	<p><b>m<sup>1</sup></b> Faluns de l'Anjou. — Faluns de la Touraine. — Sables et argiles de Praille (79). — Argile bigarrée avec meulière de la forêt de Rambouillet (64, 65) et des plateaux de Meudon (48).</p> <p><b>m</b>, Calcaire fossilifère de Villeromain (108). — Calcaire à hélix de la Beauce. — Calcaire lacustre de Berchères (79).</p> <p><b>m</b>, Grès à pavés d'Orsay (65). — Sables de la forêt de Rambouillet (64, 65). — Sables supérieurs et poudingues d'Auneau (64). — Marnes à huîtres et calcaire à fossiles marins de Chaville (48) et de la vallée de Chevreuse (65).</p> <p><b>e<sup>5</sup></b> Marnes blanches des environs de Palaiseau (63).</p> <p><b>e<sup>4</sup></b> Glaises vertes de la vallée de Chevreuse (65).</p>	<p><b>m<sup>1</sup></b> Sables grossiers et argiles de Nogent-le-Roi (64). — Argile bigarrée à meulière de Montfort-l'Amaury (47).</p> <p><b>m</b>, Marnes fossilifères des Bréviaires (64). — Meulière fossilifère d'Épernon (64). — Meulière à végétaux de Neauphle (47, 48).</p> <p><b>m</b>, Marnes et calcaires à <i>Natica crassatina</i> de la Chaussée (73). — Sables jaunes de Saint-Cyr (48). — Marnes à huîtres de la Ménagerie de Versailles et de Garches (48). — Calcaire grenu et marnes à huîtres de Chaville (48).</p> <p><b>e<sup>4</sup></b> Glaises vertes de Saulx (47).</p>	<p><b>m<sup>1</sup></b> Argiles à meulière du plateau de Cormeilles (48) et du Vexin français (32). — Argiles et sables grossiers des plateaux entre Mantes et Evreux (47). — Terres à pannes de la Picardie et du Vexin. — Sables bariolés grossiers du plateau de Gaillon (31).</p> <p><b>m</b>, Meulière du plateau de Serans (31).</p> <p><b>e<sup>5</sup></b> Marnes blanches et meulière de Houlbec, Chaufour et Bréval (47). — Calcaire lacustre de la butte de Sannois (48).</p> <p><b>e<sup>4</sup></b> Glaises vertes du Vexin, de Bréval (47) et du Mont-Valérien (48).</p>

Sables bariolés et argiles lithomarges en filons des plateaux entre Mantes et Evreux.

Sables bariolés et argiles lithomarges de Babœuf et de Saint-Aubin-Celloville.



---

---

**NOTICE**

SUR LES TRAVAUX DE M. BURDIN.

Par M. TOURNAIRE, ingénieur en chef des mines.

---

Parmi les hommes distingués que le corps des mines a comptés dans ses rangs, un de ceux dont la mémoire mérite le plus d'être honorée est assurément Burdin, ingénieur en chef retraité, correspondant de l'Académie des sciences, qui est décédé à Clermont-Ferrand le 12 novembre 1875, à l'âge de quatre-vingt-trois ans.

Esprit très-original, doué à un haut degré de la faculté d'invention et de cette persistance dans la recherche et l'application des idées justes qui est nécessaire pour les faire accepter et les répandre, il a laissé un nom qui restera dans l'histoire des progrès de la mécanique. Nos *Annales* manqueraient à leur meilleure tradition si une courte notice n'y était consacrée à rappeler ses utiles et féconds travaux. L'affection presque paternelle qu'il me témoignait m'a désigné pour remplir ce devoir.

Né à Lépin, en Savoie, il fit ses premières études à l'École centrale de Chambéry et au lycée de Grenoble. Il était enfant lorsque la Savoie fut, pour la première fois, réunie à notre nation, et à travers les vicissitudes des événements qui ont changé le sort de son pays, il n'a pas quitté la France, qu'il regarda toujours comme sa patrie.

Poussé par une vocation irrésistible vers les sciences mathématiques, surtout vers la branche de ces sciences qui a la mécanique pour objet, il entra en 1808 à l'École polytechnique.

Sa carrière administrative se peut résumer en peu de

mots. A sa sortie de l'École d'application des mines, qui se tenait alors à Moutiers, il fut envoyé à Liège. De 1815 à 1825, sauf une année passée à Vicdessos, il résida à Saint-Étienne, où il remplit à la fois les fonctions d'ingénieur ordinaire et de professeur à l'École des mineurs. Le reste de sa vie s'écoula à Clermont-Ferrand, où il fut nommé ingénieur en chef en 1834, ingénieur en chef directeur en 1847, mis à la retraite en 1848. En ces différents postes, il eut lieu de prendre une grande part aux importantes décisions administratives qui, par l'établissement des concessions, ont réglé la propriété des mines dans les bassins houillers du centre de la France, notamment dans ceux de Saint-Étienne et de Brassac, et dans le district métallurgique de Pontgibaud.

Dès l'âge de vingt-sept ans, Burdin se fit connaître aux savants par un très-remarquable mémoire qui fut imprimé dans le *Journal des mines* de 1815, sous le titre de *Considérations générales sur les machines en mouvement*. Là se trouve exposé pour la première fois, d'une manière générale et claire, le principe qui est devenu la base de toute théorie des machines, à savoir que la demi-somme des forces vives acquises ou perdues pendant une période quelconque du mouvement est égale à la différence positive ou négative de l'effet moteur et de l'effet résistant (nous disons aujourd'hui le travail), en comprenant dans ce dernier l'effet des résistances passives telles que le frottement. Pour arriver à ce beau résultat, l'auteur n'a eu qu'à reprendre la démonstration du théorème que l'on enseignait sous le nom de *principe général de la conservation des forces vives*, en y introduisant la distinction des efforts moteurs et des efforts résistants et en faisant ressortir le rôle capital de la quantité que nous appelons le travail. Avoir saisi l'importance de cette notion et de cette nouvelle forme donnée à l'équation des forces vives a été la marque d'un esprit véritablement scientifique et péné-

trant. Burdin déduit du principe qu'il établit que tout constructeur de machines doit se proposer comme objet essentiel d'annuler autant que possible les forces vives emportées hors des organes par les masses en mouvement, que le maximum d'effet utile qu'on puisse espérer a pour expression l'effet moteur, y compris la demi-somme des forces vives déjà possédées par les masses introduites dans l'appareil. Il montre aussi que les chocs, les compressions entraînent des pertes d'effet qu'il faut éviter, et comment ces pertes se doivent calculer.

Burdin ne voulait pas se tenir dans le domaine des abstractions générales, mais se préoccupait surtout d'appliquer les lois de la mécanique et de la physique au perfectionnement des machines qu'emploie l'industrie ou à la création de machines nouvelles plus économiques.

Ses méditations se portèrent d'abord de préférence sur les roues hydrauliques où l'eau agit par sa réaction contre des palettes ou des canaux mobiles.

En 1824 il présente à l'Académie des sciences un mémoire détaillé sur cette espèce de moteurs. Il y indique les règles qui doivent présider à leur construction, règles fort différentes de celles qu'on avait jusque-là suivies, qui étaient restées tout empiriques et donnaient par suite les plus médiocres résultats. Dans les roues qu'il projette le mouvement de l'eau doit être rationnellement et rigoureusement guidé; il les compose d'une série de canaux ou couloirs, enfermés dans un espace annulaire entre deux surfaces cylindriques ou coniques, et les alimente par une série d'injecteurs fixes. Il apprend à déterminer, au moyen d'un calcul très-simple, pour une hauteur de chute, pour un diamètre et pour une vitesse de rotation donnés, l'angle d'incidence sous lequel il faut lancer l'eau motrice et l'angle que les premiers éléments des canaux doivent faire avec la base supérieure de la roue, l'angle des derniers éléments avec la base inférieure étant d'ailleurs toujours nul ou très-

petit. Il passe en revue les diverses variétés que ces roues peuvent offrir, selon que leur axe est vertical, horizontal ou incliné à l'horizon et selon qu'elles affectent une forme cylindrique ou conique. C'est dans ce mémoire qu'il leur donne le nom expressif de turbines, que le langage a adopté.

Le travail de Burdin, déféré à l'examen de Prony, Dupin et Girard, fut l'objet d'un rapport justement élogieux, que l'Académie approuva, en invitant l'auteur à continuer ses fructueuses recherches.

Déjà il avait voulu démontrer expérimentalement la vérité de ses préceptes et avait fait installer, dans une aiguiserie de la manufacture d'armes de Saint-Étienne, une turbine qui avait fonctionné sous les yeux d'une commission désignée par la Société d'agriculture et de commerce siégeant en cette ville et dont faisait partie l'ingénieur en chef Beau-nier. Les résultats constatés avaient paru avantageux, sans que les essais eussent été assez prolongés pour permettre de les traduire en nombres précis.

Ces études et les nouvelles lumières qu'elles répandaient avaient sollicité les esprits des ingénieurs, et la question des turbines fut mise à l'ordre du jour par la Société d'encouragement pour l'industrie nationale. A cette occasion Burdin rédige un second mémoire, qu'il soumet en 1827 au jugement de la dite Société et pour lequel il obtient un prix de 2.000 francs. Il y mentionne entre autres une turbine qui serait immergée, des turbines dont les aubes seraient comprises entre deux plans normaux à l'axe et recevraient l'eau soit de dedans en dehors, soit de dehors en dedans, combinaison réalisée plus tard par l'ingénieur Fourneyron.

Arrivé en Auvergne en 1825, il reprend, avec ardeur et sur une plus grande échelle, les expériences commencées à Saint-Étienne.

Il établit, dans un moulin de Pontgibaud, une turbine décrite dans les *Annales des mines* de l'année 1833, dont

le système est apte à s'accommoder aux chutes de toute nature. La roue, d'axe vertical, a une faible hauteur. Les couloirs qui reçoivent l'eau sont nombreux. L'inclinaison des premiers éléments de leurs cloisons, comme celle des canaux injecteurs, est calculée, en raison de la différence des niveaux entre la surface du bassin d'alimentation et les orifices de ces canaux et en raison de la vitesse de rotation, de telle façon que le choc soit annulé : les derniers éléments sont horizontaux, et dans la crainte que l'eau abandonnée en repos par chaque couloir ne soit choquée par le couloir suivant, disposés alternativement dans trois anneaux circulaires. Une commission nommée en 1826 par le préfet du Puy-de-Dôme constate l'économie que cet appareil a produite. Plus tard, Burdin, appliquant le frein de Prony à l'arbre tournant, observe un effet utile de 67 p. 100.

Une autre installation fort curieuse, dont il rend compte dans nos *Annales* de 1828, est celle d'une roue qu'il fait monter à Ardes. L'appareil tournant a pour hauteur la moitié de la chute totale, qui est de 6 pieds, et la vitesse normale de la zone annulaire où s'exerce l'action motrice est celle qui serait due à cette moitié de la chute. Il en résulte que, pour réaliser les conditions théoriques du maximum d'effet, il suffit de faire arriver l'eau en jet horizontal et perpendiculaire au rayon et de diriger les buses horizontales de sortie en sens contraire de la rotation. Le tracé des canaux est devenu d'ailleurs indifférent, et Burdin en réduit le système à quatre poches, dont l'ouverture élargie embrasse sur la face supérieure l'intervalle annulaire entier, tandis qu'au bas elles se terminent par les susdites buses. Les effets utiles observés par l'auteur varient de 65 à 75 p. 100.

En même temps qu'il poursuivait ces travaux, l'ingénieur Fourneyron parvint à construire sa célèbre turbine, qui fut le premier type des moteurs de cette espèce satisfaisant à la fois d'une manière complète aux conditions commandées

par la théorie et aux exigences de la pratique. Le succès en fut décisif, comme on le sait, et l'emploi s'en propagea très-rapidement. Ainsi l'œuvre qu'avait entreprise, démontrée et préconisée Burdin fut terminée, non par lui-même, mais par un de ses élèves; car Fourneyron avait reçu ses enseignements à l'École des mineurs de Saint-Étienne.

Les roues d'Ardes et de Pontgibaud avaient été construites avec trop d'économie et avec des matériaux trop peu résistants pour être applicables telles quelles à la grande industrie. Il leur manquait aussi un système de vannes modératrices permettant de régler à volonté et pendant la marche même les ouvertures des buses d'injection, organe nécessaire pour que l'appareil se prête, sans perdre beaucoup de son effet utile, aux variations souvent très-grandes du volume de l'eau motrice.

Burdin n'en a pas moins été incontestablement un des principaux créateurs de ces admirables machines hydrauliques, si simples et si légères dans leur installation, qui s'adaptent si bien à tous les cours d'eau et aux transmissions de mouvement rapides, et dont le nombre ne cesse de s'accroître.

La dernière de ses études se rattachant à cette question est un mémoire inséré dans nos *Annales* de 1836. On y lit la description d'une roue qui a fonctionné dans la forêt d'Avèze, près de Bourg-Lastic, et qui ne diffère de la roue d'Ardes que par le mode d'évacuation, l'eau sortant d'un orifice central autour du pivot de l'axe. La vitesse finale se trouve ainsi à peu près annulée, avec la vitesse relative, par la double action de la gravité et de la force centrifuge. Il est à remarquer que cette machine se rapproche beaucoup de la *Danaïde* de Mannoury Dectot, au sujet de laquelle Carnot avait fait, en 1815, un très-favorable rapport à l'Institut. Burdin cependant l'avait perfectionnée en complétant le système des cloisons, qui manquaient dans la zone annulaire de la cuve tournante de Mannoury.

Le même mémoire renferme des calculs assez développés sur le mouvement des gaz dans les ventilateurs et dans des appareils rotatifs de dispositions analogues qui, au lieu d'agir comme machine soufflante, recevraient l'action d'un jet de gaz ou de vapeur et seraient ainsi transformés en turbines. Il tient compte dans ces calculs du réchauffement ou du refroidissement du fluide élastique, d'après la formule qu'avait donnée Poisson. Afin d'amoindrir les vitesses, qui devraient être énormes si le gaz, arrivant sous une pression un peu forte, se détendait d'un seul coup, il énonce l'idée d'employer des turbines multiples, dont les roues, parcourues successivement par le courant gazeux, seraient montées sur un même axe.

L'étude des moteurs hydrauliques n'avait pas absorbé entièrement Burdin; car, de 1830 à 1852, il s'occupa très-activement d'un projet de locomotive à vapeur destinée aux transports sur les routes ordinaires. Les chemins de fer, déjà nombreux en Angleterre, naissaient à peine sur le continent, et il s'effrayait des capitaux gigantesques que leur établissement devait dévorer. Sa conception était fort ingénieuse, mais d'une application fort difficile. La locomotive qu'il avait imaginée devait porter elle-même les rails, les poser devant le train et les déplacer dans sa marche. Il en fit entreprendre la construction dans les ateliers de Chaillot, mais fut contraint de la laisser inachevée.

Burdin fut un des premiers à comprendre, bien avant que la théorie de l'équivalent mécanique de la chaleur n'eût été créée, que les machines à vapeur, malgré les merveilleux perfectionnements dus au génie de Watt et de ses successeurs, étaient loin d'utiliser le calorique engendré par le combustible de la meilleure manière qu'on pût concevoir et former l'espérance de réaliser.

Dès 1835, il expose à l'Académie des sciences le projet d'une machine dont le jeu consiste à faire agir sur un piston moteur, par sa pleine tension et par sa détente, de l'air

qu'on a préalablement comprimé sous plusieurs atmosphères, puis chauffé en le faisant passer sur un foyer clos, jusqu'à en quadrupler environ le volume. Il démontre l'énorme supériorité qu'aura, au point de vue économique, un pareil moteur, si l'on parvient à le faire fonctionner convenablement.

La plupart des inventeurs qui ont construit ou tenté de construire des machines à air chaud ont adopté la compression préalable proposée par Burdin. Celui-ci a été, jusqu'à la fin de sa vie, persuadé que tôt ou tard le nouvel agent supplantera la vapeur et produira la force à bien meilleur marché, et quand il expliquait ses vues à ce sujet, ses paroles laissaient voir l'enthousiasme dont il était pénétré.

Il a écrit, jusqu'en 1865, un grand nombre de notes sur l'air chaud, qui presque toutes ont paru dans les *Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences*, imaginant des moyens d'exécution variés, sans jamais s'écarter beaucoup du plan général de sa première conception. Plusieurs de ces études ont été rédigées avec la collaboration de M. Bourget. Je citerai entre autres celles qui portent la date de 1857, dans lesquelles est calculé le travail théorique correspondant aux diverses conditions de pression et de température. Les auteurs examinent les deux hypothèses d'une récurrence, analogue à celle qu'employait Ericson, ou de la perte totale du calorique contenu dans l'air qui abandonne le piston : leurs calculs, basés sur la formule de Poisson citée plus haut, montrent qu'on en déduit, en ce qui concerne les gaz, la transformation proportionnelle de la chaleur en travail.

Vers 1864, aidé d'un crédit de l'État, Burdin essaya de mettre à exécution un de ses plans, tentative qui resta interrompue.

A l'inverse des machines de ce genre qui ont marché plus ou moins longtemps, ses projets ont tous comporté de hautes températures. Il en rendait ainsi la réalisation ex-

trêmement difficile; mais ses appareils devenaient moins encombrants, et il se donnait plus de marge pour les pertes d'effet qui résultent des fuites, des frottements, des espaces perdus. Je pense qu'en cela un juste discernement le guidait. Dans un moteur qui fonctionne par différence, si le travail positif n'est pas théoriquement beaucoup plus fort que le travail négatif, les déchets inévitables doivent prendre une importance énorme et même arriver promptement à déterminer l'arrêt dès que les organes se détériorent.

Burdin, dont la riche imagination était toujours active, a étudié plusieurs autres questions, telles que la navigation sous-marine, la direction des ballons. Je les passe sous silence, parce qu'il ne s'y est pas attaché avec la même persistance et n'y a pas fortement marqué l'empreinte de son esprit.

L'Académie des sciences, qui l'avait distingué de bonne heure, lui a donné en 1842 une très-juste récompense de ses travaux en le nommant son correspondant.

En 1865, lorsqu'il était par conséquent retiré depuis longues années des services publics, l'administration se rappela son mérite, et il reçut la croix d'officier de la Légion d'honneur. Il avait été, en 1857, décoré de l'ordre des Saints-Maurice et Lazare par le gouvernement Piémontais.

Ceux qui l'ont connu ont aimé en lui, avec l'originalité de son esprit, la modestie et la simplicité de ses mœurs et la sincérité absolue de son caractère, qui le rendait incapable de dissimuler le moindre de ses sentiments. Il accueillait avec le plus grand empressement toute personne qui venait l'entretenir d'une manière compétente de science ou de machines. Mais pour les jeunes gens surtout sa bienveillance ne connaissait pas de bornes, et il montrait à les conseiller et à les aider un zèle touchant qui jamais ne s'est lassé.

Il a eu la fortune d'associer sa vie à celle d'une compagne en qui il a trouvé un grand dévouement de cœur et les conseils d'une droite intelligence. Ils ont cherché dans deux adoptions successives les joies et les sollicitudes de la paternité, que la nature ne leur avait pas accordées, mais qui étaient un besoin de leurs âmes affectueuses. La mort, à leur grande douleur, avait promptement brisé la première. La seconde a été plus heureuse, et le neveu élevé par eux porte dignement le nom qu'ils lui ont transmis.

Malgré des souffrances souvent répétées, sa vieillesse s'était maintenue très-vigoureuse, et jusqu'à la fin de ses jours il a gardé la plénitude de ses facultés, se passionnant comme jadis aux questions de la mécanique et regardant avec émotion et inquiétude les tristes et redoutables événements dont les dernières années nous ont rendus témoins.

## BULLETIN

### EXPLOSIONS D'APPAREILS A VAPEUR

ARRIVÉES PENDANT L'ANNÉE 1872

---

*Observation.*— La Commission centrale des machines à vapeur ne publie dans le présent Bulletin que le relevé des explosions dont les dossiers lui ont été adressés.— Le résumé est incomplet pour l'année 1872 et sera complété ultérieurement, s'il y a lieu.

BULLETIN

des explosions d'appareils à vapeur arrivées pendant l'année 1872.

560

EXPLOSIONS D'APPAREILS A VAPEUR

DATE de l'explosion.	NATURE ou situation de l'établissement où l'appareil était placé. P. — Nom du propriétaire de l'appareil. C. — Nom du constructeur de l'appareil.	NATURE, forme et destination de l'appareil. — Détails divers.	CIRCONSTANCES de l'explosion.	SUITES de l'explosion.	CAUSE PRÉSUMÉE de l'explosion.
1872 10 janvier.	Ateliers de teinturerie à Reims (Marne). P. MM. Poirier, Mortier et Muller. C. M. Tulpin, à Rouen.	Cylindre d'apprêt en cuivre rouge : Diamètre. . . 0 <sup>m</sup> ,45 Longueur. . . 0 <sup>m</sup> ,90 Épaisseur. . . 0 <sup>m</sup> ,002 L'appareil porte : 1° Sur le tuyau d'introduction, une soupape de sûreté. 2° Sur le tuyau d'échappement, un robinet à l'aide duquel on règle la pression dans le cylindre.	Un ouvrier ayant calé la soupape de sûreté et probablement aussi fermé le robinet d'échappement, la pression est montée dans le cylindre qui a éclaté en produisant des effets de projection considérables.	Un ouvrier tué. Un ouvrier grièvement blessé. Trois ouvriers légèrement blessés ou brûlés.	Imprudence d'un ouvrier qui a paralysé le jeu de la soupape de sûreté.
12 février.	Forges de Commentry (Allier).	Bouilleur - réchauffeur de 7 <sup>m</sup> ,65 de longueur sur 0 <sup>m</sup> ,80 de diamètre. Cet appareil, reconnu en médiocre état, fonctionnait en attendant le bouilleur neuf qui devait le remplacer. La dernière réparation, faite en novembre 1871, n'avait pas été suivie d'une épreuve.	Le bouilleur s'est déchiré à la partie inférieure, en un point où l'épaisseur de la tôle était réduite à 1 millim. Dans ces conditions, la rupture a eu lieu à la pression normale.	Un ouvrier qui se trouvait accidentellement dans le local des chaudières a été grièvement brûlé et est mort des suites de ses blessures.	Défaut de surveillance. L'appareil, très-ancien et plusieurs fois réparé, avait à la partie inférieure une épaisseur tout à fait insuffisante; de plus la dernière réparation n'avait pas été suivie de l'épreuve réglementaire.
14 mars.	Popotaria de Grovelles (Vaucluse).	Timbre. . . 5 kilog. Le cylindre porte une large ouverture rectangulaire surmontée d'un cadre en fer avec porte à charnière d'un côté et à boulons de serrage de l'autre. Ces boulons n'étaient pas tous serrés.	Une tige d'acier, voisine de la partie voisine qui se rompit, deux autres écrous cédèrent, la porte se courba, glissa sous les écrous restants et s'ouvrit en projetant l'eau, la vapeur et les chiffons.	Un ouvrier grièvement blessé.	Défaut d'entretien de l'appareil.
19 mars.	Fabrique de chicorée et de moutarde à Saint-Omer (Pas-de-Calais). C. MM. Dolman frères.	Chaudière cylindrique horizontale : Longueur. . . 3 <sup>m</sup> ,48 Diamètre. . . 0 <sup>m</sup> ,92 Timbre. . . . 5 <sup>k</sup> ,00 Le niveau de l'eau était tenu habituellement au-dessous de la partie supérieure des carnaux.	L'explosion a eu lieu au moment de la mise en marche de la machine. Le fond arrière de la chaudière s'est déchiré suivant une ligne diamétrale horizontale. La partie supérieure du fond a été projetée en éclats. La ligne de rupture présentait des parties dont l'épaisseur était de 2 ou 3 mill. seulement (épaisseur normale, 9 à 10 mill.).	Le chauffeur et une autre personne légèrement blessés par les éclats de la chaudière.	Mauvaise conduite de l'appareil. Le niveau de l'eau étant inférieur à la partie la plus élevée des carnaux, les premiers cylindres ont produit des projections d'eau sur des parties surchauffées; de là élévation brusque de pression et rupture de la chaudière aux points où l'épaisseur était trop réduite.
6 avril.	Bateau à vapeur <i>Marseillais</i> n° 1, quai de la Joliette, à Marseille. P. Compagnie de batellerie maritime. C. Fraissinet et compagnie, à la Madrague.	Chaudière horizontale à retour de flamme. — Deux foyers intérieurs latéraux. — Les courbes de section des conduites sont très-complicquées et nécessitent de nombreuses liaisons. Pression de marche, 1 <sup>k</sup> ,5.	Au départ, lorsque la machine effectuait ses premiers mouvements, la chaudière s'entr'ouvrit dans un des conduits servant de passage aux gaz du foyer. Une bande de tôle de 2 <sup>m</sup> ,20 de longueur a été découpée en plein métal et s'est redressée autour de son attache extrême. L'une des déchirures longitudinales a suivi les trous d'une ligne d'entretoises disposée à la partie inférieure du conduit.	Mécanicien grièvement brûlé et mort des suites de ses blessures. Chauffeur grièvement brûlé. Cheminée renversée.	Amincissement et défaut de soudure d'une tôle à la jonction d'une partie bien entretenue et d'une autre qui ne l'était peut-être pas suffisamment.
7 juin.	Filature de coton, à Nantes. P. MM. Duval et Heurtaux.	Générateur, système Farcot, composé d'une chaudière cylindrique horizontale avec deux bouilleurs-réchauffeurs latéraux superposés.	La plaque annulaire en fonte contre laquelle s'appuie le bouchon autoclavé intérieur s'est rompue.	Chauffeur grièvement brûlé et mort des suites de ses blessures. Dégâts matériels insignifiants.	Surélévation de la pression dans le réchauffeur, due à l'obstruction presque complète du tuyau qui faisait communiquer ce réchauffeur avec la chaudière.

ARRIVÉES PENDANT L'ANNÉE 1872.

561

DATE de l'explosion.	NATURE et situation de l'établissement où l'appareil était placé. P. — Nom du propriétaire de l'appareil. C. — Nom du constructeur de l'appareil.	NATURE, forme et destination de l'appareil. — Détails divers.	CIRCONSTANCES de l'explosion.	SUITES de l'explosion.	CAUSE PRÉSUMÉE de l'explosion.
1872 8 juin.	Fabrique de bougies, à Saint-Denis (Seine). P. MM. Petit frères.	Chaudière horizontale cylindrique à deux bouilleurs : Capacité. . . 21 <sup>m</sup> 3 La chaudière n'était ni déclarée ni munie de tubes indicateurs du niveau de l'eau.	Le bouilleur de gauche s'est déchiré au coup de feu sur une longueur de 1 <sup>m</sup> ,50.	Deux ouvriers grièvement brûlés, l'un d'eux mort des suites de ses blessures. Dégâts matériels sans importance.	Négligence de l'agent chargé de la direction des chaudières (altération du métal au coup de feu par défaut d'alimentation).
20 juin.	Filature à Tourcoing (Nord). P. MM. Duvillez, Duriez fils et Molle. C. M. Meunier, à Fives-Lille.	Chaudière horizontale tubulaire avec boîte à feu à l'avant et dôme de vapeur à l'arrière, le foyer a la forme d'un segment de cercle surbaissé et est en acier. Timbre. . . . 5 <sup>k</sup> ,5 La chaudière a une très-grande surface de chauffe par rapport au volume d'eau qu'elle peut contenir.	L'explosion a eu lieu une heure après la remise en feu, alors que la chaudière était en pression et ne fournissait pas de vapeur aux machines. Le tube indicateur ne fonctionnant pas, le niveau s'est abaissé et une ébullition très-vive, dont la cause n'a pu être constatée, a élevé subitement la pression jusqu'à faire éclater la chaudière, qui s'est rompue en une quinzaine de fragments.	Un élève-chauffeur tué sous les décombres. Dégâts matériels considérables.	Négligence du chauffeur qui a paralysé le jeu de l'indicateur de niveau, a laissé baisser le niveau de l'eau et a permis une vive ébullition causée en partie par un incident resté indéterminé.
22 juin.	Locomotive de la compagnie d'Orléans (n° 175). P. et C. Compagnie d'Orléans.	Locomotive à trois paires de roues dont deux coupées, de 2 mètres de diamètre.—Cylindres et mécanisme extérieurs. Chaudière avec dôme à l'avant. <small>Toute l'enveloppe extérieure de la chaudière est en tôle et est rivetée.</small>	En pleine marche, à 65 kilomètres à l'heure, le corps cylindrique s'est déchiré en tous sens; les boîtes à feu et à fumée sont seules restées intactes, ainsi que les tubes. Les ruptures sont en plusieurs toiles, sont irrégulières et les débris sont	Chauffeur tué. Mécanicien grièvement blessé. Un agent et quatre voyageurs contusionnés. Renversement de la machine les roues multiples, à l'arrière au	Défaut de solidité dans la constitution de la chaudière et notamment trop grand diamètre de l'ouverture du corps cylindrique sous le dôme.
		indrique a un diamètre de 1 <sup>m</sup> ,25 et l'épaisseur du métal y est de 8 millim.; à la boîte à feu cette épaisseur est de 9 millim. Le dôme a un diamètre de 0 <sup>m</sup> ,90, une épaisseur de 6 <sup>mm</sup> ,5; l'ouverture du corps cylindrique sous le dôme a un diamètre de 0 <sup>m</sup> ,80.—L'assemblage des tubes est à double rangée de rivets, sauf au raccordement du dôme avec la chaudière où il n'y en a qu'une rangée. Les tôles d'acier proviennent des usines Pettin et Gaudet.	Un des tubes latéraux de la série supérieure s'est rompu en son milieu suivant sa génératrice supérieure sur une longueur de 0 <sup>m</sup> ,80.	voic. Derangement de tout le train remorqué.	
2 juillet.	Fabrique d'huile, à Beaurains (Pas-de-Calais). MM. Wartel frères.	Chaudière horizontale cylindrique avec deux bouilleurs. — Le corps cylindrique est traversé par vingt-deux tubes qui servent de dernier retour de flamme.—Le tube indicateur du niveau de l'eau était brisé depuis quelques jours.	Un des tubes latéraux de la série supérieure s'est rompu en son milieu suivant sa génératrice supérieure sur une longueur de 0 <sup>m</sup> ,80.	Chauffeur mort des suites de ses brûlures.	Négligence du chauffeur. (Altération du métal par défaut d'alimentation.)
7 août.	Distillerie à Nîmes (Gard). P. M. Champel-Brun.	Chaudière horizontale sans bouilleur, allongée en 1868 et garnie d'un fond presque plat sans armature, d'un diamètre de 0 <sup>m</sup> ,82 et d'une épaisseur de 5 millim. seulement. Timbre. . . . 4 <sup>k</sup> ,5	Quatre heures après la fin du travail, le fond antérieur en tôle s'est déchiré irrégulièrement; une partie de ce fond a été projetée en avant, tandis que la chaudière était repoussée en arrière à 24 mètres de distance et enfonçait deux murs de 0 <sup>m</sup> ,60 d'épaisseur.	Un atelier presque complètement détruit.	Défaut de construction de l'appareil.
14 août.	Fabrique de moulures en bois, 70, rue de Bondy, à Paris. P. M. Sauterne.	Chaudière horizontale cylindrique munie de deux bouilleurs. Au moment de l'explosion, la chaudière était presque vide d'eau et le chauffeur alimentait.	Le bouilleur de droite s'est ouvert au-dessus du foyer sur une longueur de 0 <sup>m</sup> ,80 et un développement de 0 <sup>m</sup> ,40.	Chauffeur mort des suites de ses blessures.	Négligence de l'agent chargé de la conduite de la machine (Alimentation intempestive.)

DATE de l'explosion.	NATURE et situation de l'établissement où l'appareil était placé. P. — Nom du propriétaire de l'appareil. C. — Nom du constructeur de l'appareil.	NATURE, forme et destination de l'appareil. — Détails divers.	CIRCONSTANCES de l'explosion.	SUITES de l'explosion.	CAUSE PRÉSUMÉE de l'explosion.
1872 30 août.	Battage du blé, à Branges (Saône-et-Loire). P. MM. Vadot frères. C. M. Chevallier, à Lyon.	Locomobile tubulaire horizontale donnant le mouvement à une batteuse. Capacité. . . . . 0 <sup>m</sup> ,520 Surface de chauffe. 4 <sup>m</sup> ,50 Construite en 1859. — Réparée en 1868.	L'explosion a eu lieu au moment où l'on venait d'arrêter la machine. La boîte à feu extérieure s'est déchirée à des angles de raccordement avec la chaudière, tandis que la devanture était projetée au loin et la machine repoussée en sens contraire, etc.	Deux ouvriers contusionnés. Grange incendiée.	Insuffisance d'armatures dans les parties planes et manque d'entretien.
31 août.	Minoterie, rue Bab-el-Oued, à Alger. P. M. Probst.	Chaudière horizontale cylindrique à deux bouilleurs. Le corps principal était terminé à l'arrière par une calotte dont l'épaisseur était très-réduite par l'usage. Capacité totale. . . . 12 <sup>m</sup> 3 Pression de marche. 4 <sup>k</sup> ,75	La calotte d'arrière s'est détachée suivant la ligne de rivets et s'est déchirée en deux.	Le chauffeur et un ouvrier très-légerement blessés. Destruction de murs et d'une toiture. Matériaux projetés à une distance de 40 mètres.	État d'usure de la chaudière et épaisseur réduite du fond qui s'est rompu.
5 sept.	Battage de grains, près du bois Saint-Michel (commune d'Evreux)	Locomobile horizontale tubulaire (timbre 5 kilog.) venant de subir une restauration complète qui n'avait laissé de l'ancien appareil que l'enveloppe extérieure.	La face antérieure de l'enveloppe extérieure s'est déchirée et a été lancée à 25 mètres. La partie latérale s'est déchirée et a été projetée à 15 mètres.	Chauffeur et un ouvrier tués. Meule incendiée.	Imprudence dans la conduite de la machine et défaut de construction.
25 sept.	Atelier de maroquinerie, rue du Fer-à-Moulin, à Paris. P. M. Giraud. C. M. Martre.	Récipient en tôle vertical cylindrique à fond intérieur plat, servant à chauffer l'eau destinée à des autoclaves : Diamètre. . . 1 <sup>m</sup> ,00 Hauteur. . . 1 <sup>m</sup> ,25 La vapeur d'un générateur timbré à 6 kilog. est amenée à la partie supérieure du récipient, tandis qu'un injecteur Giffard projette l'eau à sa partie inférieure. Une soupape chargée devait limiter la pression à 1 <sup>k</sup> ,5, mais tout tend à prouver qu'elle ne fonctionnait pas.	L'alimentation d'eau ayant été arrêtée, la tension de la vapeur s'est élevée dans le récipient, le fond intérieur a été projeté sur le sol et le corps cylindrique envoyé à une vingtaine de mètres.	Cinq ouvriers blessés.	Négligence des chauffeurs qui auraient paralysé le

26 sept.

Locomotive de la compagnie d'Orléans (n° 212).  
P. et C. Compagnie d'Orléans.

Locomotive à trois paires de roues dont deux coupées de 2 mètres de diamètre. Cylindres et mécanisme extérieurs. Chaudière avec dôme à l'avant. Toute l'enveloppe extérieure (dôme compris) est en acier fondu. Le corps cylindrique a un diamètre de 1<sup>m</sup>,25 et l'épaisseur du métal y est de 3 millim.; à la boîte à feu cette épaisseur est de 9 millim. Le dôme a un diamètre de 0<sup>m</sup>,90, une épaisseur de 6<sup>mm</sup>,5; l'ouverture du corps cylindrique sous le dôme a un diamètre de 0<sup>m</sup>,80. L'assemblage des tôles est à double rangée de rivets, sauf au raccordement du dôme avec la chaudière où il n'y en a qu'une rangée. Les tôles d'acier proviennent des usines Petin et Gaudet.

Au moment où la machine manœuvrait en tête du train (gare de Limoges), la calotte qui surmonte le dôme a été arrachée et projetée à une centaine de mètres. La rupture a eu lieu au-dessus de la rivure dans la partie médiane de la surface d'emboutissage.

Le mécanicien renversé sans blessures.  
Rails cassés sous la machine.

Allération du métal due à une surchauffe produite soit à la forge, soit beaucoup plus probablement à l'emboutissage.

DATE de l'explosion.	NATURE et situation de l'établissement où l'appareil était placé. P. — Nom du propriétaire de l'appareil. C. — Nom du constructeur de l'appareil.	NATURE, forme et destination de l'appareil. — Détails divers.	CIRCONSTANCES de l'explosion.	SUITES de l'explosion.	CAUSE PRÉSUMÉE de l'explosion.
1872 18 oct.	Laminiers de l'Onzion (Loire). P. MM. Thollière et compagnie.	Chaudière horizontale cylindrique tubulaire à foyer intérieur (chauffée par les flammes perdues d'un four à réchauffer). La chaudière portait une pièce de 0 <sup>m</sup> ,44 sur 0 <sup>m</sup> ,28, appliquée extérieurement sur le foyer intérieur et fixée par une ligne de goujons taraudés.	Une déchirure s'est faite dans la tôle de la chaudière, suivant la ligne des goujons taraudés de la pièce rajoutée. La déchirure s'est propagée ensuite en pleine tôle. La pièce et le foyer présentait des dessoudages intérieurs que des coups de feu fréquents avaient successivement augmentés.	Le chauffeur et trois ouvriers ont été plus ou moins grièvement brûlés. Dégâts considérables à la maçonnerie du rempani et du four.	La tôle du foyer intérieur avait dû être fréquemment surchauffée; en effet, la chaudière ne portait ni flotteur ni sifflet d'alarme, et n'avait qu'un indicateur de niveau en verre assez défectueux. L'épreuve réglementaire n'avait pas été faite après réparation. Manque de surveillance.
11 nov.	Usine à fer de Lorette (Loire). P. Compagnie des fondries et forges de Terre-Noire. C. La Voulte et Besseges.	Chaudière horizontale cylindrique à foyer intérieur également cylindrique : Longueur . . . . . 9 <sup>m</sup> ,50 Diamètre du cylindre extérieur . . . 2 <sup>m</sup> ,20 Diamètre du cylindre intérieur . . . 1 <sup>m</sup> ,30 Éprouvée en dernier lieu, le 25 juin 1867, pour la pression effective de 1 <sup>k</sup> ,5.	Le foyer s'est déchiré. Rupture au-dessus de la grille, à peu près aux deux tiers de sa longueur, suivant une section droite, à une ligne de rivure. L'ouverture embrassait environ un quart de la circonférence à partir de la génératrice culminante. La chaudière n'avait pas été nettoyée depuis quatre mois.	L'eau et la vapeur se sont précipitées à travers la porte du foyer; le chauffeur a été atteint et est mort des suites de ses blessures. Incendie d'un bâtiment par les charbons incandescents projetés.	Surchauffe du ciel du foyer. Négligence du chauffeur qui n'aurait que de temps en temps les robinets de communication de l'indicateur de niveau. Manque de surveillance : l'usine tolérât le fait mentionné ci-dessus et n'avait pas fait tracer la ligne indicatrice du niveau au-dessous duquel l'eau ne doit jamais descendre.
25 nov.	Manufacture de draps droguets, à Blanche-Pontaine, commune de . . . . .	Deux chaudières à bouilleurs cylindriques horizontales entre lesquelles se trouvent deux réchauffeurs superposés l'un à l'autre. La conduite d'alimentation porte un robinet dans la partie comprise entre le réchauffeur le plus élevé et la chaudière.	Le réchauffeur le plus élevé s'est ouvert dans le flanc supérieur en pleine tôle, suivant une génératrice sur une longueur de 0 <sup>m</sup> ,85 et une largeur de 0 <sup>m</sup> ,25.	Le chauffeur, grièvement brûlé, est mort quelques heures après.	Le chauffeur avait laissé forme, pendant l'alimentation, le robinet établi sur la conduite entre le réchauffeur supérieur et la chaudière.
19 déc.	Retorderie à Livet-sur-Authon (Eure). P. M. Chardon. C. Vendu d'occasion par M. Renaux fils, à Rouen.	Chaudière horizontale cylindrique à trois bouilleurs : Surface de chauffe. 10 <sup>m</sup> ²,28 Capacité de la chaudière . . . . . 2 <sup>m</sup> ³,378 Timbre . . . . . 6 <sup>k</sup> Éprouvée après réparation le 18 décembre 1871.	Le bouilleur de droite s'est ouvert longitudinalement sur une longueur de 0 <sup>m</sup> ,84 à sa partie inférieure sur le foyer. Simple déchirure sans projection. Le flotteur magnétique était en bon état. Les tubes en verre indicateurs de niveau n'étaient pas en état de fonctionner.	Dégâts matériels très-peu importants.	Abaissement complet du niveau de l'eau; vidange presque complète de la chaudière et des bouilleurs. Surchauffe de ces derniers.

TOME V, 81-74.

RÉSUMÉ.

Nombre total d'explosions . . . . .	21	Fabrique de chicorée . . . . .	1	Chaudière horizontale cylindrique à foyer intérieur . . . . .	1
Nombre de victimes.	Tués ou morts des suites de leurs blessures . . . . . 13 Blessés . . . . . 32 45	Fabrique d'huile . . . . .	1	Chaudière horizontale à retour de flamme de forme spéciale . . . . .	1
		Fabrique de bougies . . . . .	1	Cylindre sècheur . . . . .	1
		Distillerie . . . . .	1	Cylindre lessiveur . . . . .	1
		Papeterie . . . . .	1	Récipient vertical . . . . .	1
		Maroquinerie . . . . .	1		
		Sciérie . . . . .	1		
		Teinturerie . . . . .	1		
RÉPARTITION DES ACCIDENTS.					
Par nature d'établissements.		Par nature d'appareils.		D'après les causes qui les ont occasionnés.	
Usines métallurgiques . . . . .	3	Chaudières cylindriques horizontales sans bouilleurs . . . . .	2	Imprudence ou négligence des chauffeurs et ouvriers chargés de la conduite de l'appareil . . . . .	10
Filatures, tissage, retorderie . . . . .	4	Chaudières cylindriques horizontales avec bouilleurs . . . . .	8	Défaut de surveillance ou d'entretien . . . . .	5
Chemins de fer . . . . .	2	Chaudières horizontales tubulaires . . . . .	6	Vices de construction ou de fabrication . . . . .	6
Bateaux à vapeur . . . . .	1				
Battage de grains . . . . .	3				
					21

## BULLETIN.

## Statistique de l'industrie minière de l'Allemagne.

Les *Annales des mines* ont donné (7<sup>e</sup> série, t. III, p. 429 — 1873) un extrait du *Journal officiel des mines* publié à Berlin, indiquant pour l'année 1871 les principaux chiffres de la production minière et métallurgique de la Prusse. Nous emprunterons cette année à la même publication les renseignements principaux relatifs à l'exercice 1872.

## Production des mines pour 1872.

NATURE des matières extraites.	POIDS.	VALEUR.	NOMBRE		
			des mines ou exploitation.	des ouvriers employés.	des femmes et enfants des ouvriers.
	tonnes.	francs.			
Houille. . . . .	29.523.775	319.195.605	428	140.544	236.977
Lignite. . . . .	7.449.636	29.839.218	532	17.447	40.944
Minéral de fer. . . . .	3.671.367	42.709.650	1.099	32.229	56.040
Minéral de zinc. . . . .	411.815	10.618.008	74	10.699	15.791
Minéral de plomb. . . . .	90.168	18.599.111	74	16.370	31.498
Minéral de cuivre. . . . .	278.347	8.667.907	15	7.025	12.882
Minéral d'argent. . . . .	10,6	86.673	1	4	3
Minéral de mercure. . . . .	1,5	221	1	12	62
Minéral de cobalt. . . . .	218	72.705	1	69	76
Minéral de nickel. . . . .	13	23.176	—	—	—
Minéral d'antimoine. . . . .	18	2.703	3	15	21
Minéral d'arsenic. . . . .	649	5.028	1	48	115
Minéral de manganèse. . . . .	17.621	869.918	39	507	647
Pyrite. . . . .	149.349	2.288.460	11	830	1.483
Minerais vitrioliques et alunifères. . . . .	27.096	109.725	5	137	315
Sel gemme. . . . .	79.839	828.018	3	301	765
Sels potassiques. . . . .	197.525	2.695.575	1	423	1.074
Sels de magnésie. . . . .	25	37.500	—	—	—
Total. . . . .	41.897.473,1	436.649.199	2.288	226.660	398.693

*Exploitation des mines.* — L'industrie minière en Prusse a pris en 1872 un développement remarquable, grâce au trafic bien soutenu et non interrompu des chemins de fer : le tarif assez élevé des prix de vente a contribué à rendre très-brillants les résultats financiers de cette période.

La production minière de 1872 accuse un progrès considérable relativement à celle de 1871; elle s'est élevée en effet à 41.897.477 t., tandis qu'en 1871 elle n'était que de 36.785.030 t. : la différence à l'actif de 1872 est de 5.111.447 tonnes, tandis que la différence correspondante entre 1871 et 1870 ne dépassait pas 3.652.810 tonnes.

L'accroissement est beaucoup plus remarquable encore si l'on considère les valeurs des produits extraits; la valeur totale est, pour l'exercice 1872, de 442.471.179 fr.; en 1871 elle n'était que de 327.258.145 fr.; la différence est donc de 115.216.034 fr., soit de 35,2 p. 100.

On peut constater aussi, outre une augmentation notable dans le nombre des ouvriers mineurs, une certaine amélioration dans leur travail moyen; cette amélioration aurait été plus sensible encore sans la grève qui s'est produite dans les mines situées près d'Essen, et qui a enlevé à leur travail pendant quatre semaines environ 20.000 ouvriers. Ce résultat mérite une attention particulière, d'autant plus que des plaintes sérieuses se sont fait entendre dans les districts houillers de l'Angleterre et de la Belgique, constatant une décroissance dans la puissance productive individuelle des mineurs de ces contrées.

Le tableau suivant met en regard, pour les principales mines, les chiffres de la production en 1871 et en 1872.

Comparaison de la production des principales mines en 1871 et 1872.

NATURE des matières extraites.	ANNÉES.	POIDS.	VALEUR		NOMBRE	
			totale.	par tonne.	des mines.	des ouvriers.
		tonnes.	francs.	francs.		
<i>Houille</i> . . . . .	1871	25.967.044	228.429.881	8,800	446	131.575
	1872	29.523.775	319.195.605	10,811	428	140.544
Augmentation . . . . .		3.556.731	90.765.724	2,011		8.969
Diminution . . . . .					18	
<i>Lignite</i> . . . . .	1871	6.876.245	26.122.241	3,800	522	16.855
	1872	7.449.636	29.839.218	4,005	532	17.447
Augmentation . . . . .		573.391	3.716.977	0,205	10	592
Diminution . . . . .		2.920.274	31.796.779	10,875	1.126	26.259
<i>Minerai de fer</i> . . . . .	1871	3.671.367	42.709.650	10,888	1.099	32.229
	1872					
Augmentation . . . . .		751.033	10.912.871	0,013		5.970
Diminution . . . . .					27	
<i>Minerai de zinc</i> . . . . .	1871	330.697	6.603.686	19,950		
	1872	411.815	10.618.008	25,777		
Augmentation . . . . .		81.118	4.014.322	5,827		
Diminution . . . . .		92.277	18.312.934	198,775	290	34.270
<i>Minerai de plomb</i> . . . . .	1871	90.168	18.599.111	206,271	163	34.091
	1872					
Augmentation . . . . .			256.177	7,496		
Diminution . . . . .		2.109			127	176
<i>Minerai de cuivre</i> . . . . .	1871	214.014	6.709.391	31,350		
	1872	278.347	8.667.907	31,140		
Augmentation . . . . .		64.333	1.958.516			
Diminution . . . . .				0,210		

C'est, comme d'ordinaire, l'exploitation houillère qui a fourni en 1872 la part la plus importante de la production minière totale en Prusse. Le prix de la houille a subi, par suite de l'activité de la demande, un mouvement ascensionnel considérable.

L'exploitation des lignites accuse aussi, pour 1872, une augmentation assez notable sur 1871.

L'extraction des minerais de fer, déjà fort active en 1871, a pris en 1872 des développements encore plus remarquables; les bonnes qualités ont été entièrement consommées dans le royaume de Prusse; les qualités inférieures seules, et encore en petite quantité, sont passées à l'étranger.

La production en minerais de zinc a considérablement augmenté: dans les mines de la haute Silésie, cet accroissement a principalement porté sur les calamines de qualité inférieure.

La production des minerais de plomb est restée presque stationnaire. Il faut attribuer ce fait à la longue disette d'eau dont ont souffert plusieurs districts miniers, particulièrement dans le Hartz supérieur, et à une importation considérable de minerais d'Espagne et d'Amérique.

Pour les minerais de cuivre, on constate un accroissement notable, auquel ont contribué surtout les mines du Mansfeld.

L'exploitation des mines de manganèse s'est beaucoup développée en 1872: ces minerais ont, pour la plupart, été employés en Allemagne.

La production des pyrites a continué en 1872, comme les années précédentes, à suivre une marche rapidement ascendante: c'est le cercle d'Arnsberg (Westphalie) qui a fourni la presque totalité de ces minerais.

L'extraction des minerais vitrioliques et alunifères a été très-vivement stimulée en 1872 par les besoins d'alun qui se sont manifestés dans diverses branches de l'industrie. Aussi la production s'est-elle accrue de 59 p. 100.

Quant aux minerais d'argent, de mercure, de cobalt, de nickel, d'arsenic, d'antimoine, la production est peu différente de celle de l'exercice 1871.

Enfin, pour ce qui est du sel gemme et des sels potassiques, il s'est manifesté dans leur production un accroissement sensible, et qui est probablement destiné à s'accroître encore dans l'avenir, en raison des gisements énormes de ces matières existant à Stassfurt.

Le tableau qui suit fait connaître les chiffres principaux relatifs aux usines métallurgiques du royaume de Prusse.

Production des usines principales en 1872.

	NOMBRE des usines.	NOMBRE des ouvriers.	PROVENANCE.		POIDS.	VALEUR.
			Minerais indigènes.	Minerais étrangers.		
			tonnes.	tonnes.	tonnes.	francs.
<i>Fonte</i> provenant de combustibles						
minéraux . . . . .	77	15.448	1.314.711	57.213		
végétaux . . . . .	66	4.497	62.242	2.025		
mélanges . . . . .	16	305	21.221	423		
Total . . . . .	159	20.250	1.398.174	59.661	1.457.835	215.864.122
<i>Zinc</i> . . . . .	35	5.947	54.374	3.677	58.052	29.098.118
<i>Plomb</i> . . . . .	18	1.998	49.111	4.896	54.007	25.823.111
<i>Cuivre</i> (maties et cuivre noir). . . . .	10	1.957	6.833	672	7.505	15.522.472

On peut remarquer que la presque totalité de la fonte provient de hauts-fourneaux au coke. Les usines sidérurgiques prussiennes ont pris en 1872 un développement exceptionnel: elles ont recherché particulièrement les qualités de minerais supérieures, telles que les minerais oligistes, spathiques et manganésifères, qui, pour la plupart, ont été traités sur les lieux de production.

Le tableau suivant permet de comparer la production des usines pour les exercices 1872 et 1871.

Comparaison entre 1871 et 1872.

	ANNÉES	POIDS.		VALEUR.	
		tonnes.	francs.	tonnes.	francs.
Fonte . . . . .	1871	1.297.940	134.360.043	1.457.835	215.864.422
	1872	1.457.835	215.864.422	58.103	26.326.132
Zinc . . . . .	1871	58.052	29.098.118	53.047	24.257.636
	1872	53.047	24.257.636	54.007	25.823.114
Plomb . . . . .	1871	6.613	12.486.513	7.505	15.522.472
	1872	7.505	15.522.472		

Le dernier tableau fait enfin connaître les diverses transformations qu'a subies la fonte brute, et les proportions de fonte moulée, fers et aciers, fabriqués pendant l'année 1872.

Production en fonte moulée, fer et acier.

	POIDS.		VALEUR.	
	tonnes.	francs.	tonnes.	francs.
Fonte de deuxième fusion . . . . .	323.976	99.291.106	852.902	272.528.250
Fer provenant de fontes indigènes . . . . .	121.217	47.526.590	113.149	48.633.772
Fer provenant de vieux fers, fontes étrangères, etc. . . . .	174.756	69.308.178		
Acier brut . . . . .			1.586.000	537.297.896
Acier fondu . . . . .				
Total . . . . .				

(Extrait par M. BOUTIRON, ingénieur des mines, du « Zeitschrift für das Berg-Hütten-und-Salinen-Wesen in dem preussischen Staate. » 21<sup>e</sup> volume, 4<sup>e</sup> livraison. 1873.)

## TABLE DES MATIÈRES

### DU TOME CINQUIÈME.

#### MINÉRALOGIE. — GÉOLOGIE.

	Pages.
Notice sur les gisements des minerais d'argent, leur exploitation et leur traitement métallurgique, aux États-Unis (première partie); par M. P. L. Burthe . . . . .	217
Carte géologique détaillée de la France. — Système et mode d'application de la légende géologique générale; par M. A. E. Béguyer de Chancourtois . . . . .	493

#### MÉTALLURGIE. — MINÉRALURGIE.

Notice sur les minerais de plomb argentifère de l'Utah, et leur traitement métallurgique en 1873; par M. P. L. Burthe . . . . .	1
Recherches sur la texture du fer; par M. Janoyer . . . . .	90
Observations sur le mémoire de M. Janoyer; par M. L. Grüner . . . . .	108

#### MÉCANIQUE. — EXPLOITATION.

Du profil rationnel des segments des pistons des machines à vapeur; par M. H. Résal . . . . .	38
Le sondage de Spenenberg (Prusse). Traduction, par extraits, mémoires publiés par M. KESTNER et M. DUNKER dans le Zeitschrift f. d. Berg.-H.-u.-S.-Wesen, XX <sup>e</sup> vol.; par M. H. Voisin . . . . .	51
Mémoire sur les coordonnées curvilignes; p. M. E. Roger . . . . .	110
Note sur les procédés d'extraction des minerais dans les mines; par M. Worms de Romilly . . . . .	169

## CHEMINS DE FER.

	Pages.
Description raisonnée de quelques chemins de fer à voie étroite; par M. Ch. Ledoux :	
Première partie. . . . .	529
Deuxième partie. . . . .	429

## OBJETS DIVERS.

Note sur la stabilité des cloches de gazomètres sous l'action du vent; par M. Maurice Lévy. . . . .	481
Notice sur les travaux de M. Burdin; par M. Tournaire. . . . .	549
Bulletin des explosions d'appareils à vapeur arrivées pendant l'année 1872. . . . .	559

## BULLETIN.

Statistique de l'industrie minérale de l'Allemagne. . . . .	568
---	-----

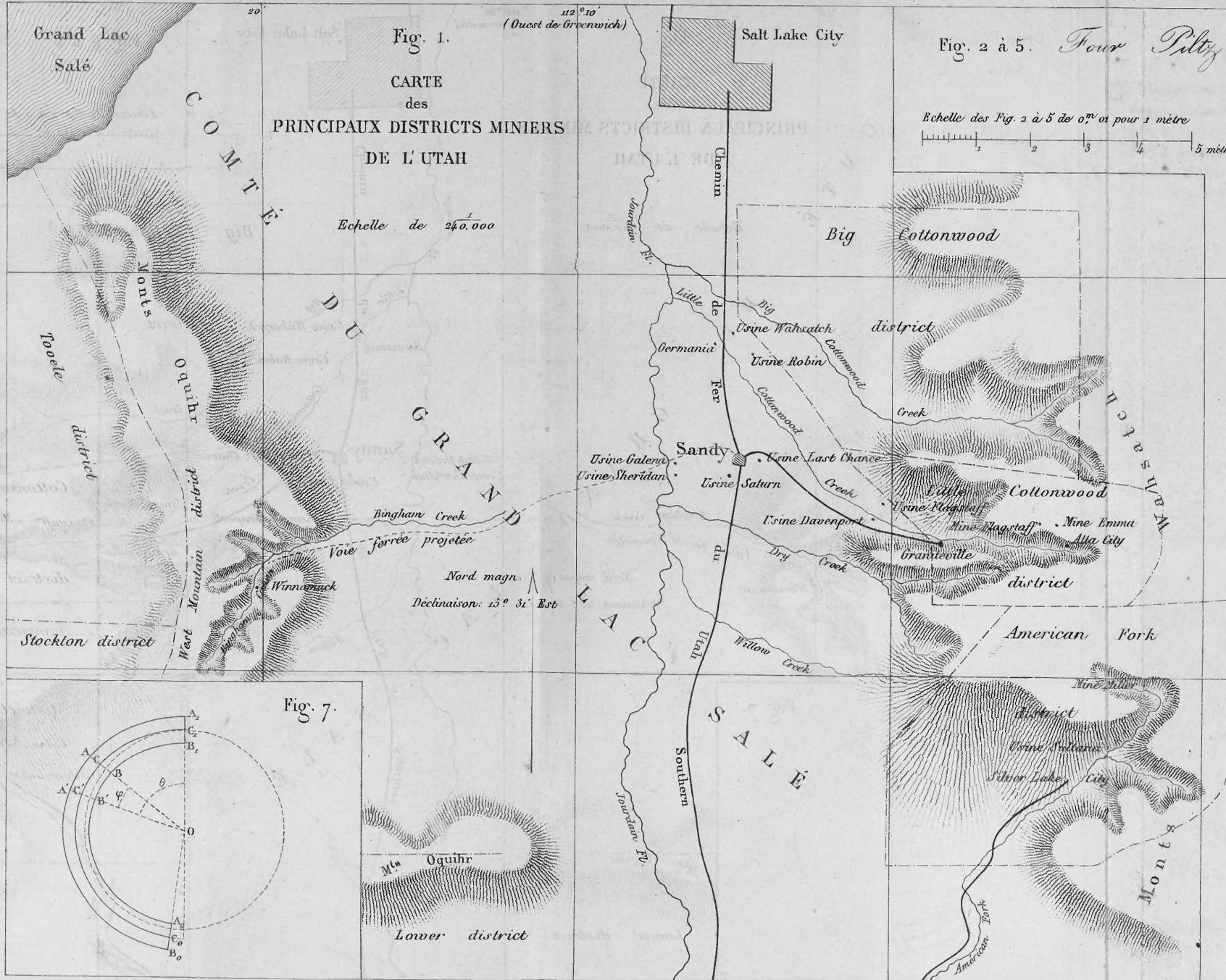
## EXPLICATION DES PLANCHES

## DU TOME CINQUIÈME.

	Pages.
Pl. I, <i>fig.</i> 1. Carte des principaux districts miniers de l'Utah. — <i>Fig.</i> 2 à 5. Four Piltz. — <i>Fig.</i> 6. Machine soufflante de Root. . . . .	1
<i>Fig.</i> 7. Segments de pistons de machines à vapeur. . . . .	38
Pl. II. Sondage de Spenberg. — <i>Fig.</i> 1 à 14. Engin et outils de sondage. — <i>Fig.</i> 15 à 18. Géothermomètre de Magnus et son emploi. . . . .	51
Pl. III. <i>Fig.</i> 1 à 5. De l'extraction des minerais dans les mines. . . . .	169
<i>Fig.</i> 6. Carte géologique à l'échelle de $\frac{1}{20.000}$ des environs du filon de Comstock. — <i>Fig.</i> 7 et 8. Coupes. . . . .	217
<i>Fig.</i> 9. Plan à l'échelle de $\frac{1}{3.000}$ des parties riches du filon de Comstock; portion sud.	
Pl. IV. <i>Fig.</i> 1. Plan de la portion nord. <i>Fig.</i> 2 à 8. Coupes verticales en travers du filon; échelle de $\frac{1}{12.500}$ . — <i>Fig.</i> 9. Mode de boisage.	
Pl. V. <i>Fig.</i> 1. Carte géologique des environs d'Austin, à l'échelle de $\frac{1}{300.000}$ . <i>Fig.</i> 2 et 3. Coupes. — <i>Fig.</i> 4. Plan des mines d'Austin. — <i>Fig.</i> 5. Carte des filons du comté de Gilpin, à l'échelle de $\frac{1}{50.000}$ . — <i>Fig.</i> 6. Machine et pompe de la mine Bobtail. — <i>Fig.</i> 7 et 8. Appareil d'extraction. — <i>Fig.</i> 9, 10 et 11. Coupes transversales du filon Terrible. — <i>Fig.</i> 12. Recette.	
Pl. VI. Chemin de fer d'Ergastiria. . . . .	329
<i>Fig.</i> 1. Carte du Laurium. — <i>Fig.</i> 2. Profil en long. — <i>Fig.</i> 3. Plan d'Ergastiria et d'une partie de la voie. — <i>Fig.</i> 4, 5 et 6. Profils de la voie : 4, en remblais; 5, en déblais; 6, voies de garage. — <i>Fig.</i> 7. Profil du souterrain. — <i>Fig.</i> 8 à 11 et 12 à 14. Pont métallique. — <i>Fig.</i> 15. Diagrammes du travail de la vapeur; travail réel et travail calculé.	

- Pl. VII. *Fig. 1.* Rail de Moktâ-el-Hadid (20<sup>k</sup>,142 par mètre) et son éclisse. — *Fig. 2.* Rail de Moktâ modifié, acier (20<sup>k</sup>,295 par mètre). — *Fig. 3.* Rail de Cessous et Trébiau (12<sup>k</sup> par mètre). — *Fig. 4 et 5.* Crampon d'Ergastiria. — *Fig. 6, 7 et 8.* Plaque tournante pour locomotives. — *Fig. 9 à 12.* Wagon à minerai d'Ergastiria. — *Fig. 13.* Résistance des châssis. — *Fig. 14.* Position la plus défavorable de deux wagons en contact dans une courbe de 60 mètres de rayon.
- Pl. VIII. *Fig. 1, 2 et 3.* Wagon à minerai de Mondalazac. — *Fig. 4 et 5.* Attelage de la locomotive et d'un wagon, au chemin de la Correction des eaux du Jura. — *Fig. 6 à 9.* Essieu et roue d'Ergastiria. — *Fig. 10 à 13.* Locomotive d'Ergastiria. — *Fig. 14.* Tiroir. — *Fig. 15.* Circulation dans les courbes. — *Fig. 16 et 17.* Usure des bandages. — *Fig. 18.* Plan de la remise des machines et de l'atelier d'Ergastiria : *a*, machine motrice; *b*, chaudière; *c*, réservoir; *d*, magasin de l'outilleur; *e*, raboteuse; *f*, tour à engrenages à fileter; *g*, tour simple; *h, h*, établis d'ajusteur; *i*, machine à percer; *k*, machine à tarauder; *l*, établis; *m*, machine à poinçonner et à cisailer; *n*, ventilateur; *o*, bureau du chef d'atelier; *p, p'*, fosses. — *Fig. 19.* Profil de la voie de Moktâ-el-Hadid.
- Pl. IX. *Fig. 1.* Plan de la remise des machines et de l'atelier de réparation du chemin de fer de Moktâ-el-Hadid. . . . . 429  
 Chemin de fer de Moktâ-el-Hadid. Wagon à minerai : — *Fig. 2.* Élévation. — *Fig. 3.* Demi-plan. — *Fig. 4.* Vue par bout.  
 Chemin de fer de Saint-Léon (Sardaigne). Traverses métalliques : — *Fig. 5.* Élévation. — *Fig. 6.* Plan.  
*Fig. 7.* Carte du tracé du chemin de fer de Cessous et Trébiau.
- Pl. X. *Fig. 1.* Chemin de fer de Cessous à Trébiau. Viaduc pour la traversée de la vallée de l'Oguègne.  
*Fig. 2.* Section transversale des souterrains, soit pour une voie, soit pour deux voies.  
*Fig. 3.* Profil transversal de la voie. — *Fig. 4 et 5.* Éclisse. — *Fig. 6 et 7.* Crampon.  
 Wagon à houille. — *Fig. 8.* Élévation. — *Fig. 9.* Plan. — *Fig. 10.* Vue par bout. — *Fig. 11.* Coupe transversale.  
 Locomotive-tender à deux essieux : — *Fig. 12.* Coupe longitudinale de la machine. — *Fig. 13.* Élévation. — *Fig. 14.* Demi-plan. — *Fig. 15.* Coupe longitudinale de la condensation. — *Fig. 16.* Coupe transversale de la condensation.

- Pl. XI. Diagrammes de la distribution :
- Fig. 1.* Locomotives d'Ergastiria;  
*Fig. 2.* Locomotives de Moktâ-el-Hadid;  
*Fig. 3.* Locomotives de Cessous et Trébiau;  
*Fig. 4.* Locomotives de Saint-Léon et de Rochebelle. . . . . 429  
*Fig. 5 à 9.* Stabilité des cloches de gazomètres. . . . . 481



**Fig. 2 à 5. Four Palty.**

Echelle des Fig. 2 à 5 de 0<sup>m</sup>01 pour 1 mètre

Scale: 0 1 2 3 4 5 mètres

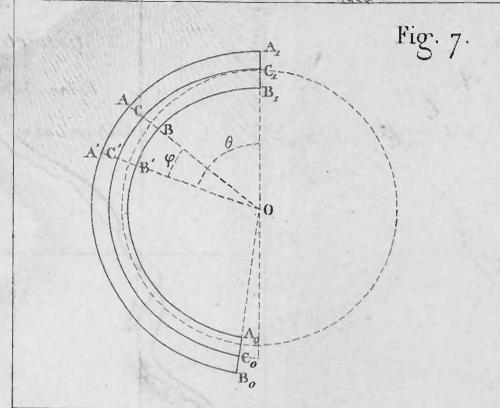
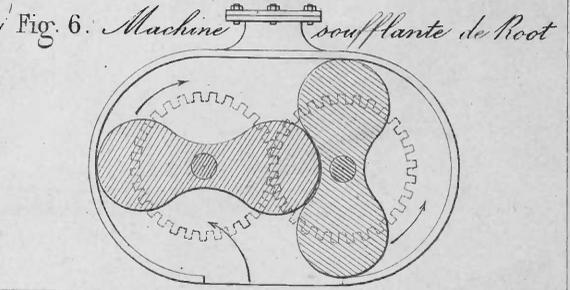
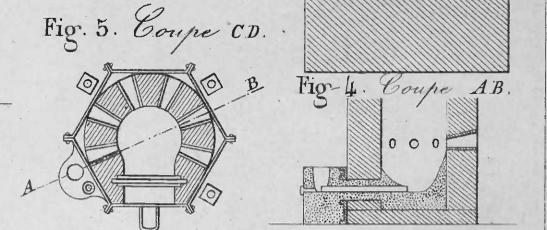
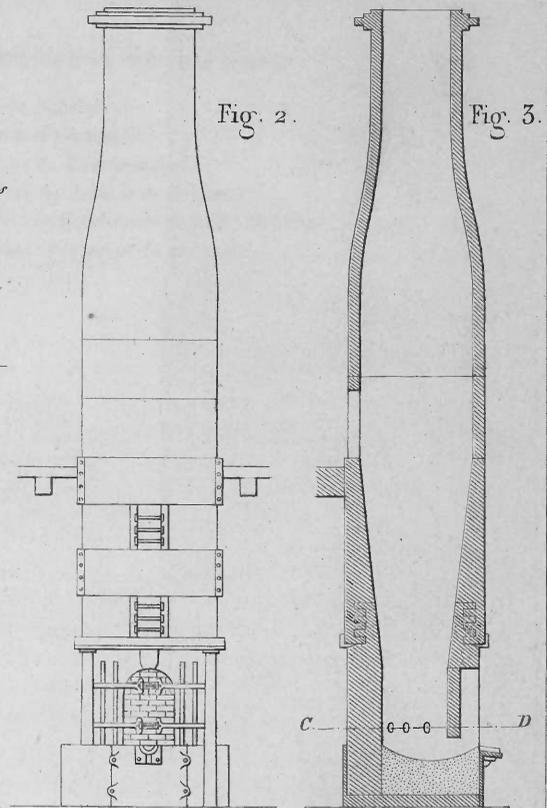


Fig. 1.

Elevation

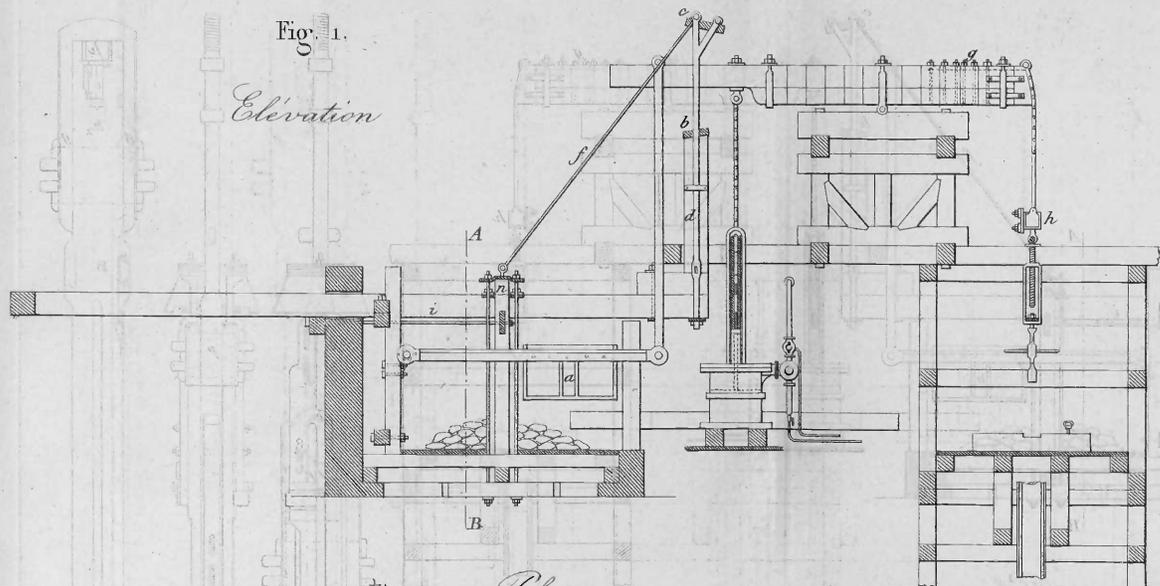


Fig. 2. Plan

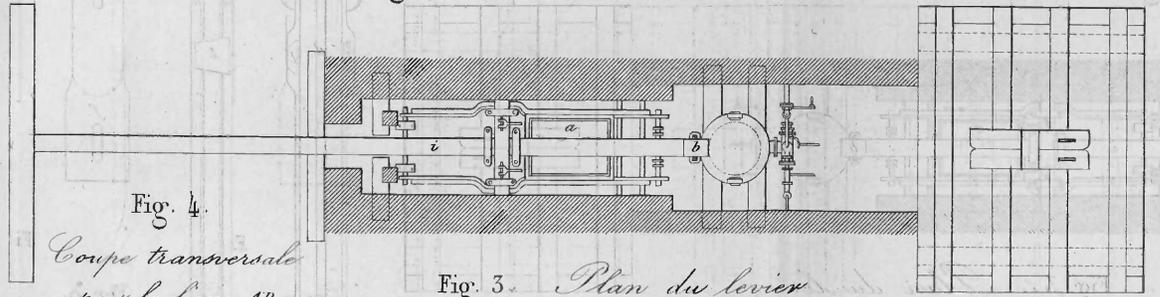


Fig. 4.

Coupe transversale par la ligne AB.

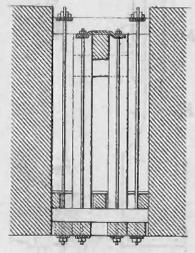
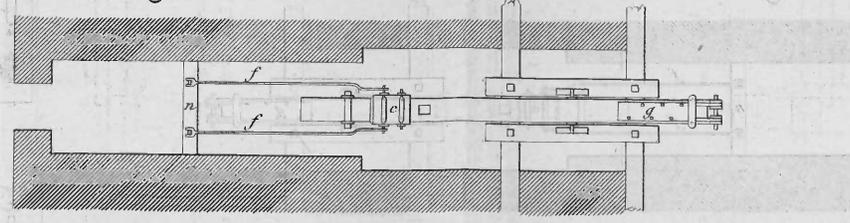


Fig. 3. Plan du levier



Echelle des Fig. 1 à 4 de 0<sup>m</sup> 01 p. 1 mètre

Echelle des Fig. 5 à 13 et 17 de 0<sup>m</sup> 05 p. 1 m.

Echelle de la Fig. 14 de 0<sup>m</sup> 02 p. 1 mètre

Echelle des Fig. 15 et 16 de 0<sup>m</sup> 25 p. 1 mètre

Echelle de la Fig. 18 de 0<sup>m</sup> 025 pour 1 mètre

Fig. 5.

Fig. 6.

Fig. 7.

Fig. 8.

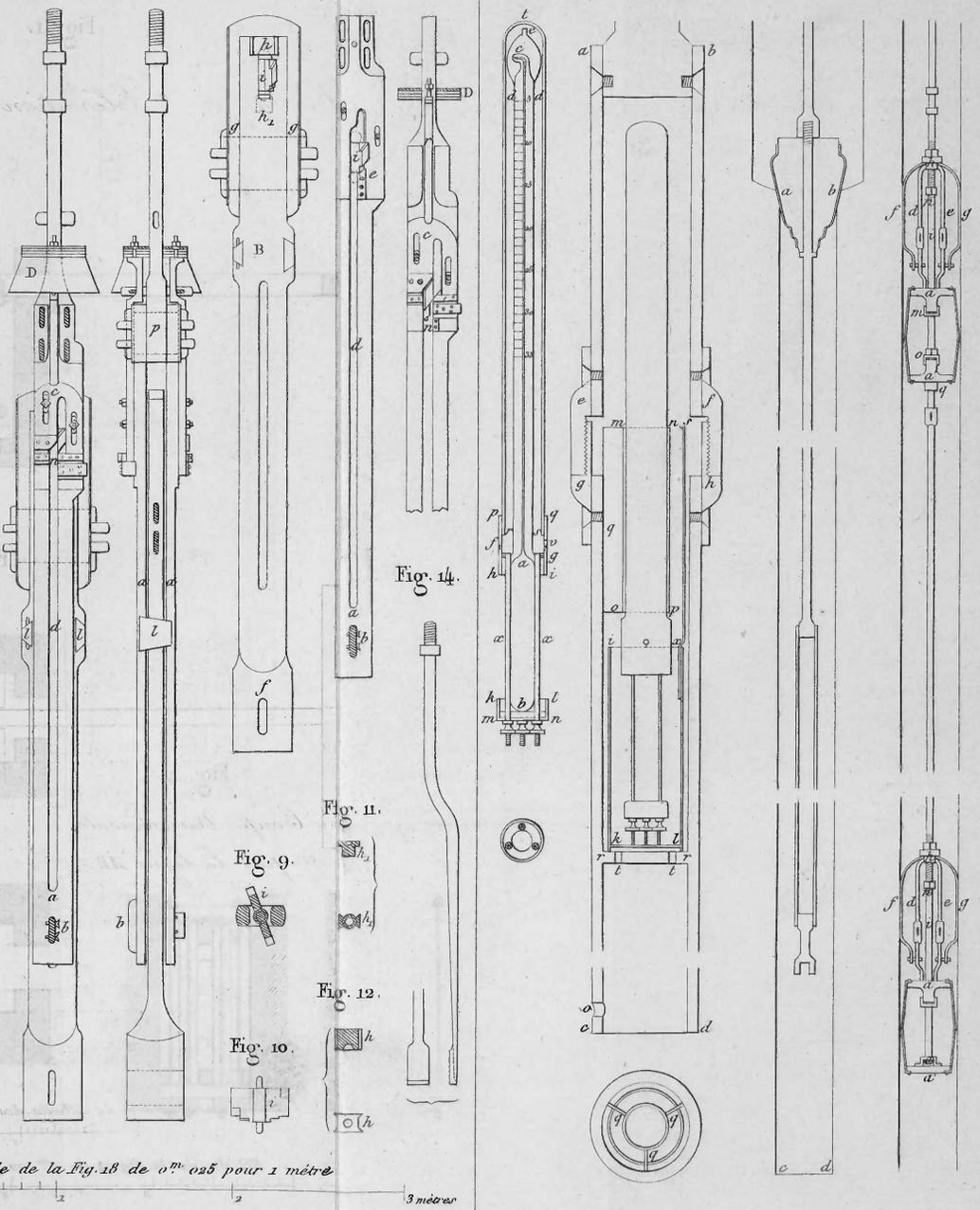
Fig. 13.

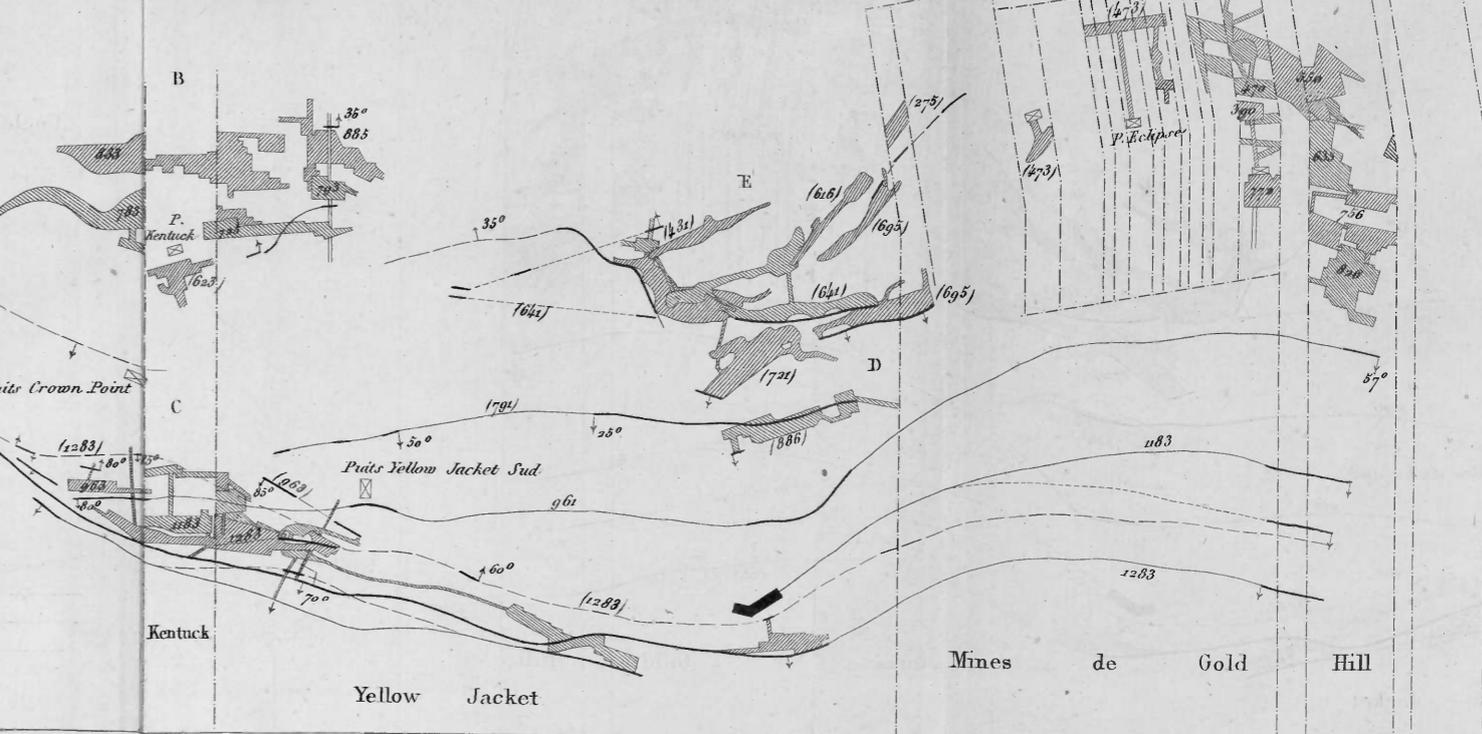
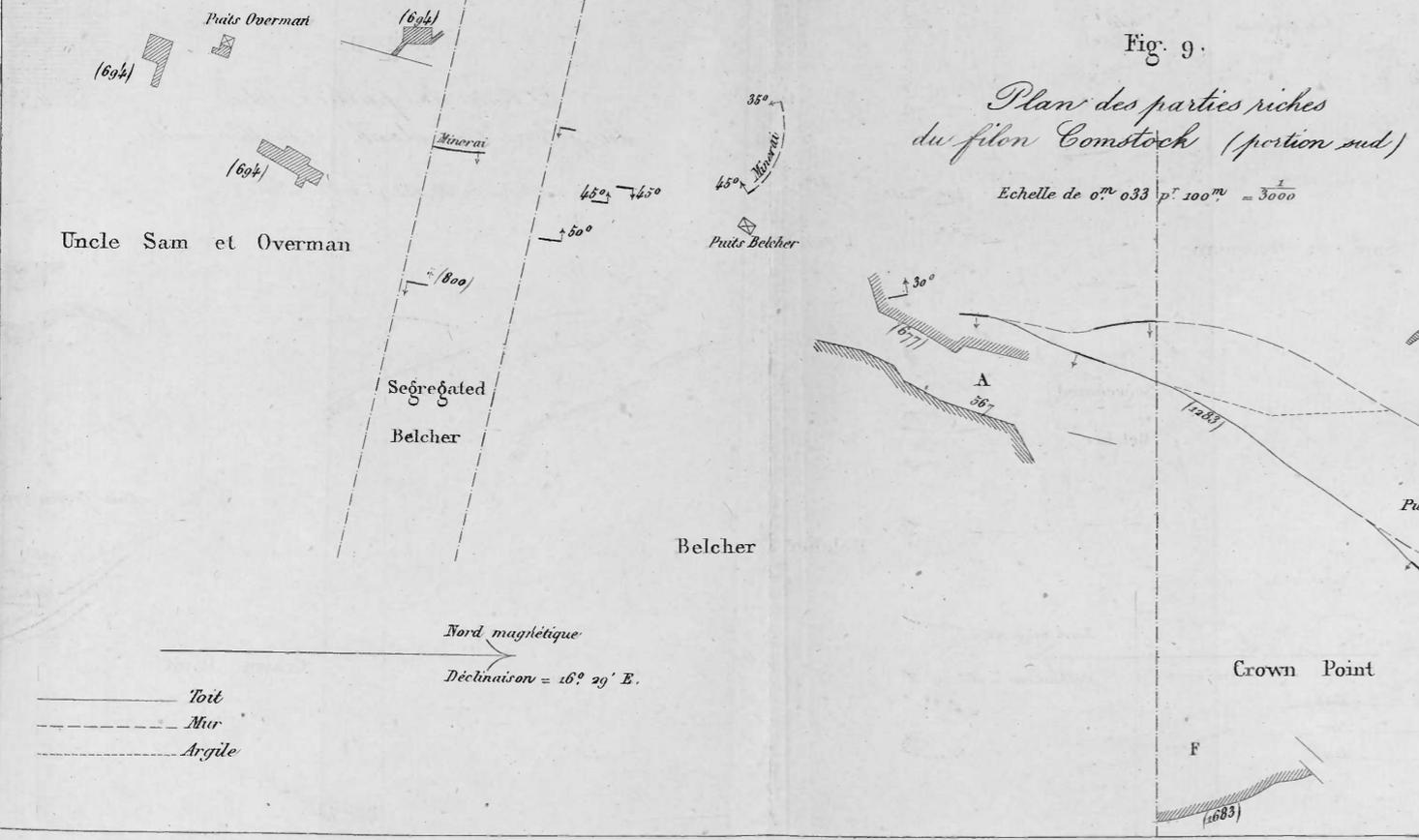
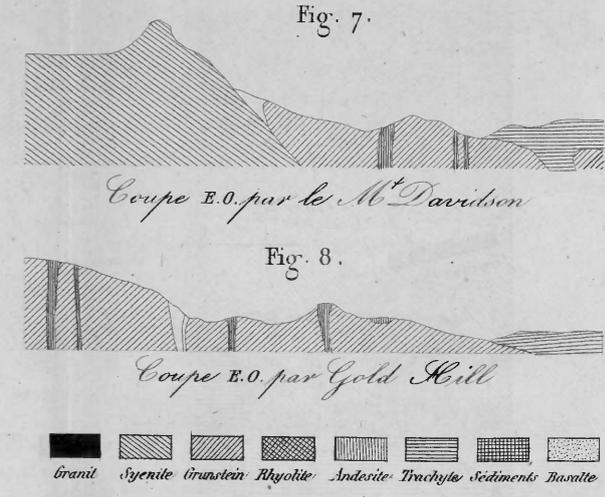
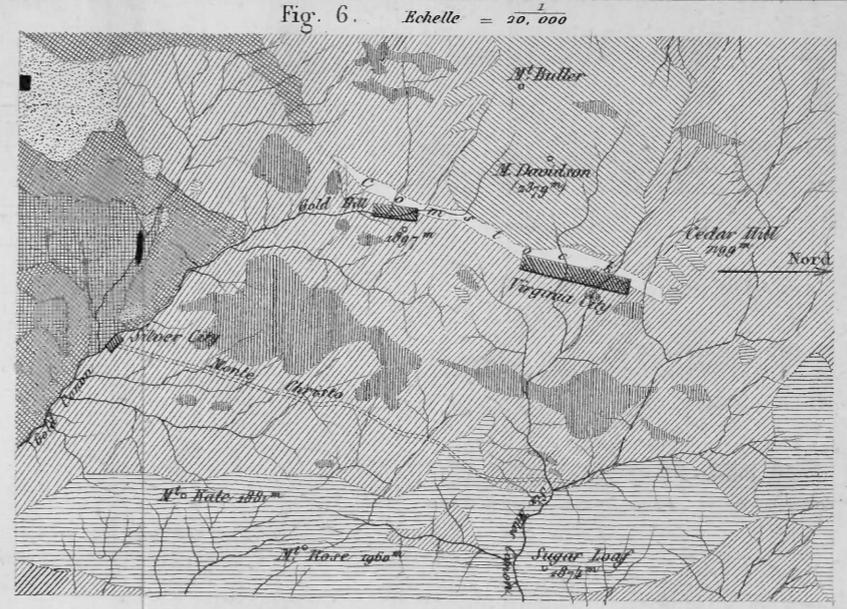
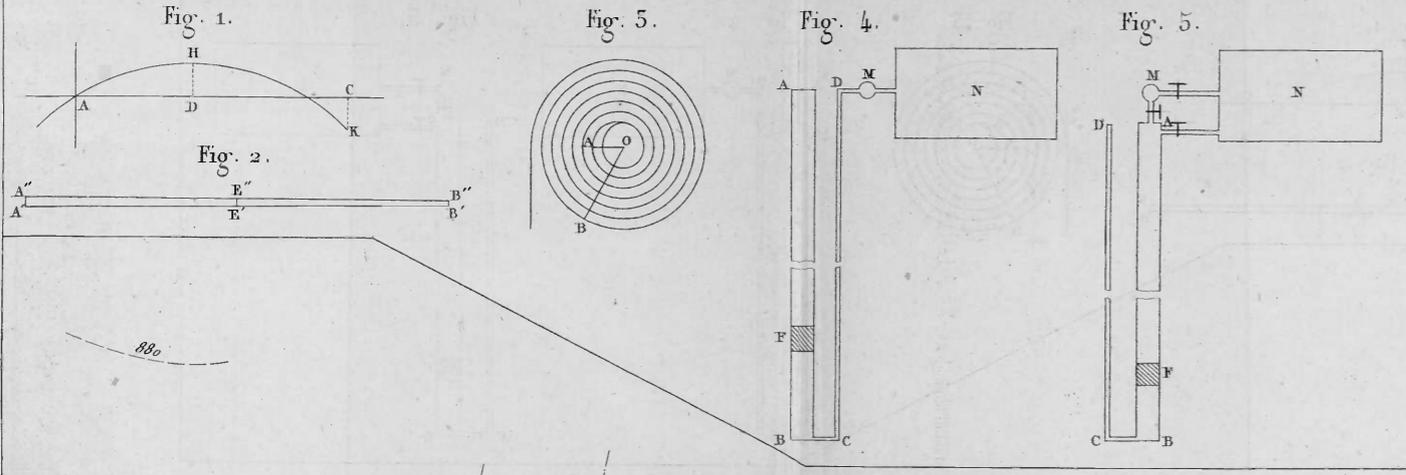
Fig. 15.

Fig. 16.

Fig. 17.

Fig. 18.





Echelle des Fig. 2 à 8 de 0<sup>m</sup> 008 pour 100 mètres  $\frac{1}{12.500}$

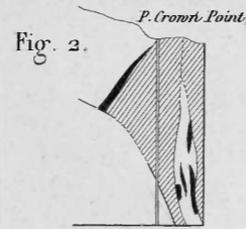


Fig. 2.

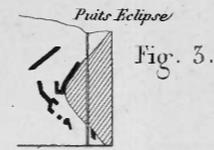


Fig. 3.

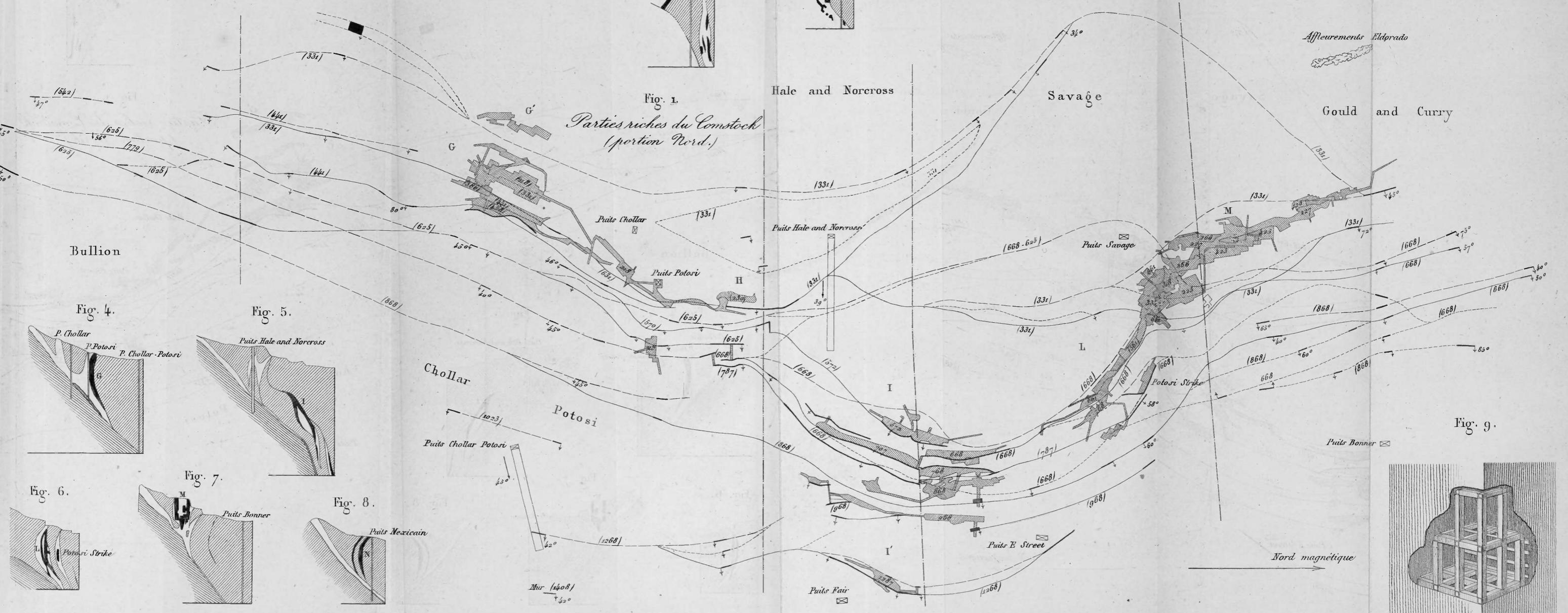


Fig. 1. Parties riches du Comstock (portion Nord.)

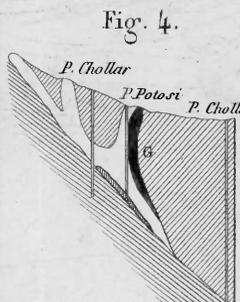


Fig. 4.

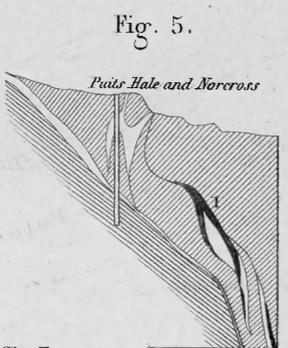


Fig. 5.



Fig. 6.

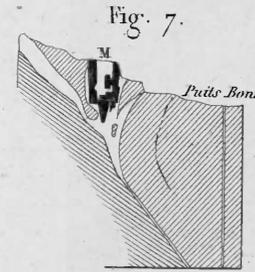


Fig. 7.

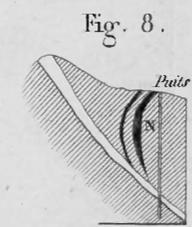


Fig. 8.

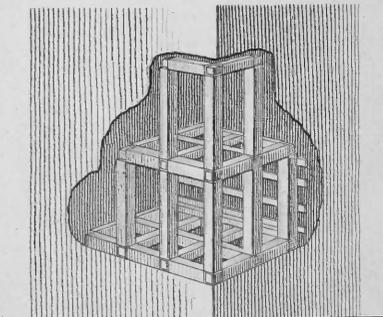
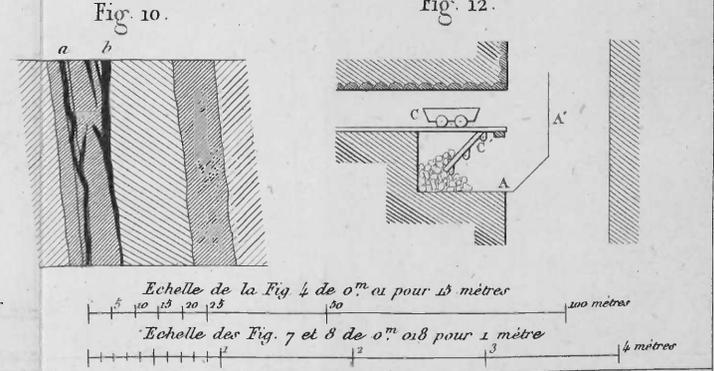
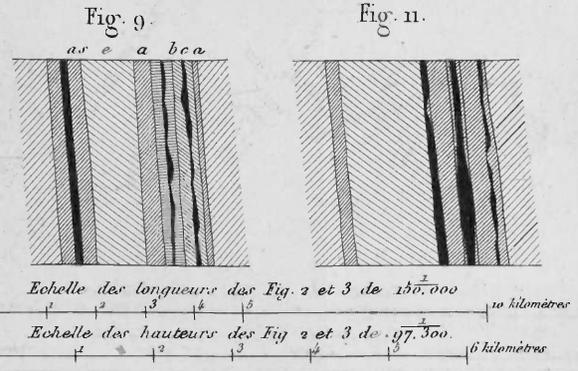
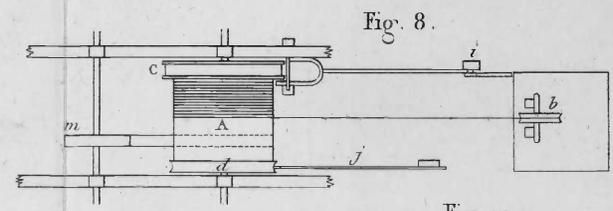
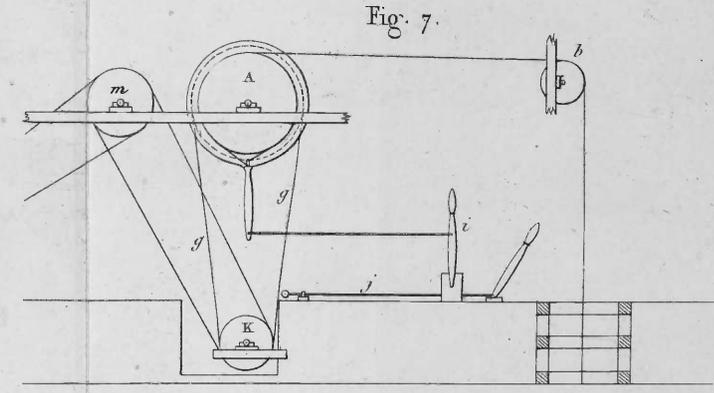
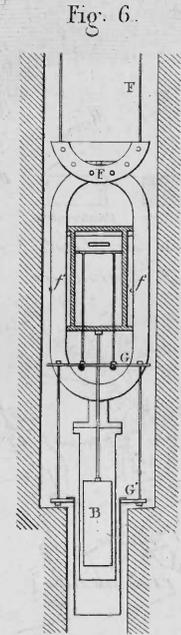
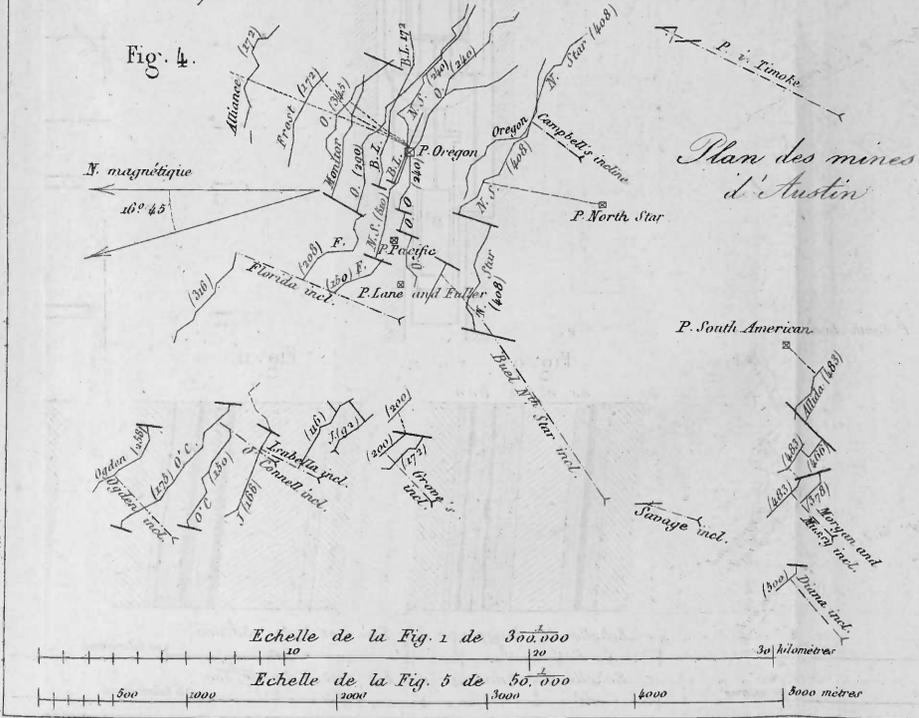
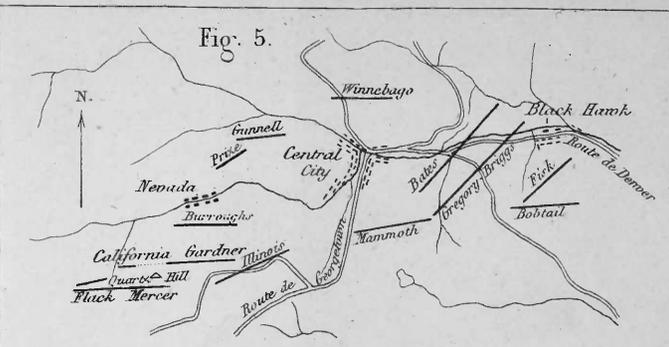
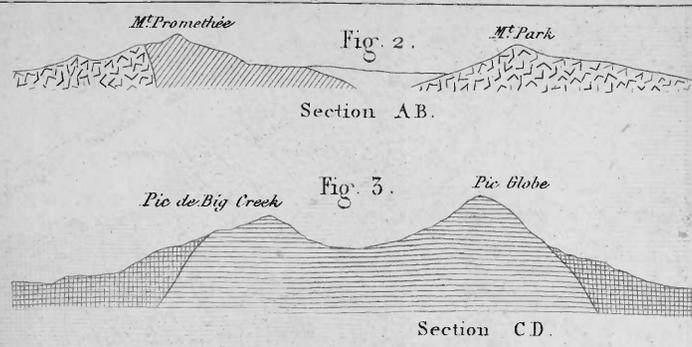
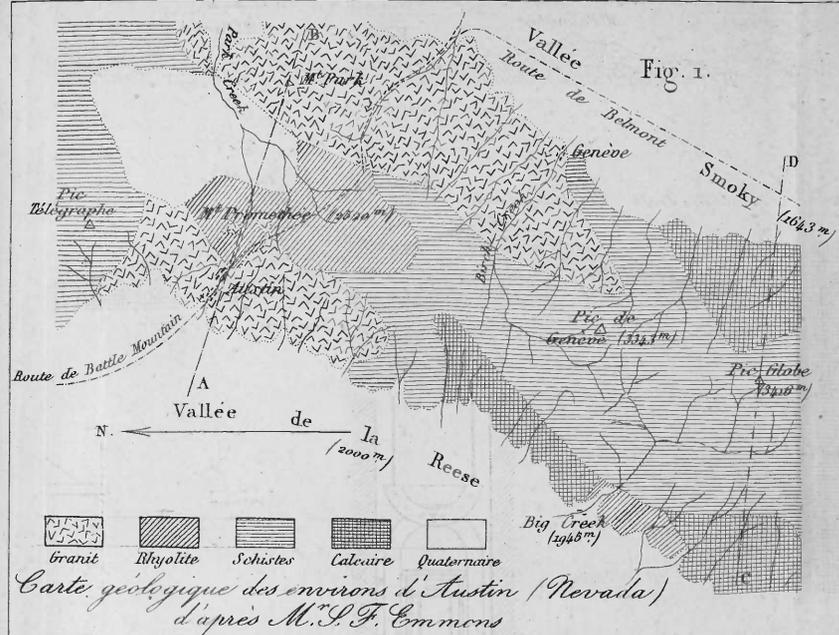


Fig. 9.









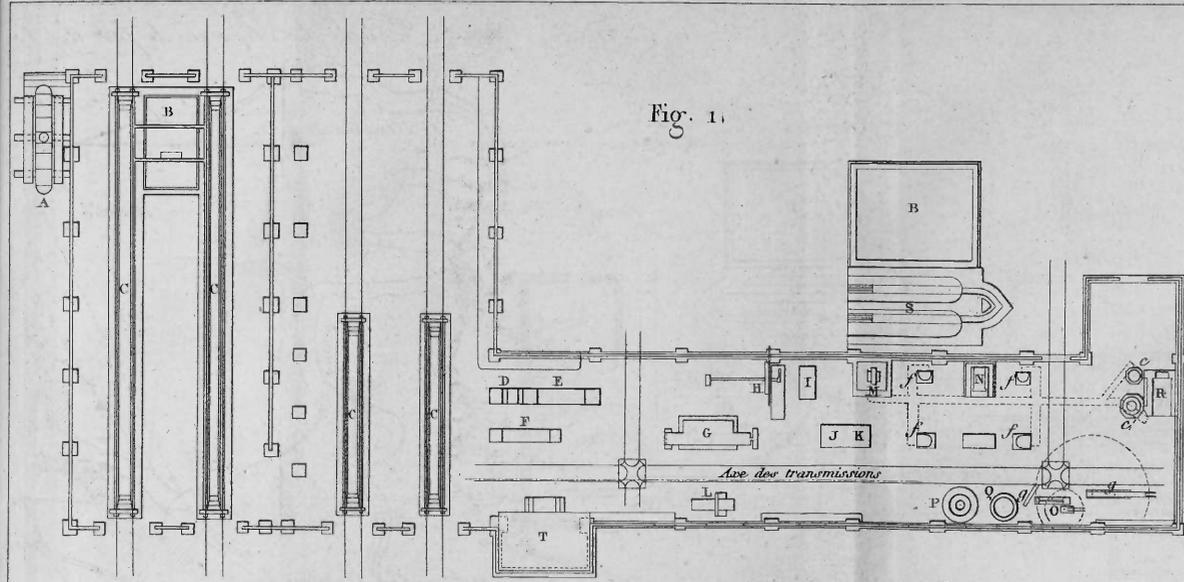


Fig. 1.

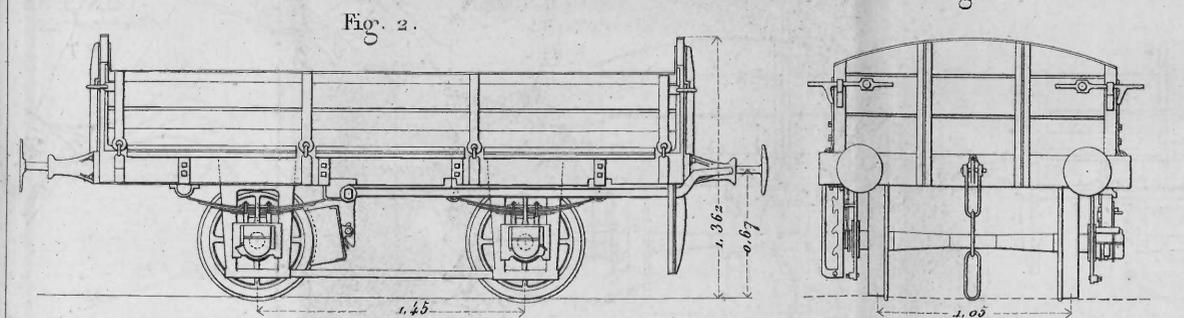


Fig. 2.

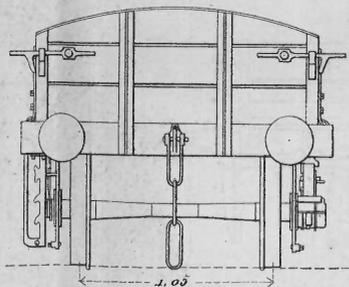


Fig. 3.

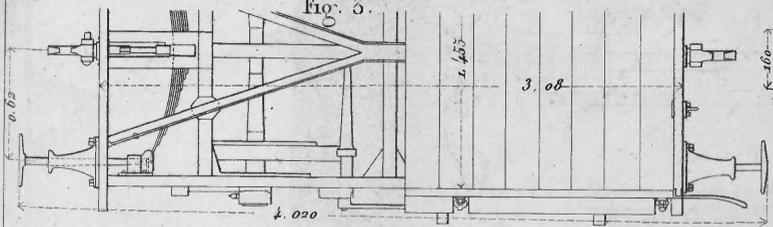


Fig. 4.

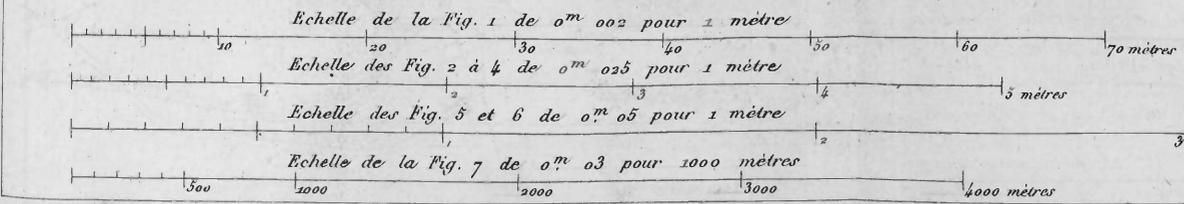


Fig. 5.

Fig. 6.

Echelle de la Fig. 1 de 0<sup>m</sup> 002 pour 1 mètre

Echelle des Fig. 2 à 4 de 0<sup>m</sup> 025 pour 1 mètre

Echelle des Fig. 5 et 6 de 0<sup>m</sup> 05 pour 1 mètre

Echelle de la Fig. 7 de 0<sup>m</sup> 03 pour 1000 mètres



Fig. 7. Tracé du chemin de fer de Cassou à Trélieu

Légende de la Fig. 1.

- A. Alimétation des locomotives
- B.B. Réserve et alimétation des chaudières
- C.C. Fosses
- D. Machine à tarauler
- E.F.G. Tours
- H. Machine motrice
- I. Locomobile
- J. Machine à percer
- K. Machs à poinçonner et cirailles
- L. Mach. à raboter
- M. Ventilateur
- N. Marteau pilon
- O. Mach. à caler les roues
- P. Four pour bandager
- Q. Bassin
- R. Éluve
- S. Chaudières
- T. Bureau
- f.f.f. Forges
- e.e'. Cubilots
- g.g. Crues



Diagrammes de la distribution des locomotives.

Fig. 4. Saint Leon et de Rochebelle.

Course du piston divisée en centimètres

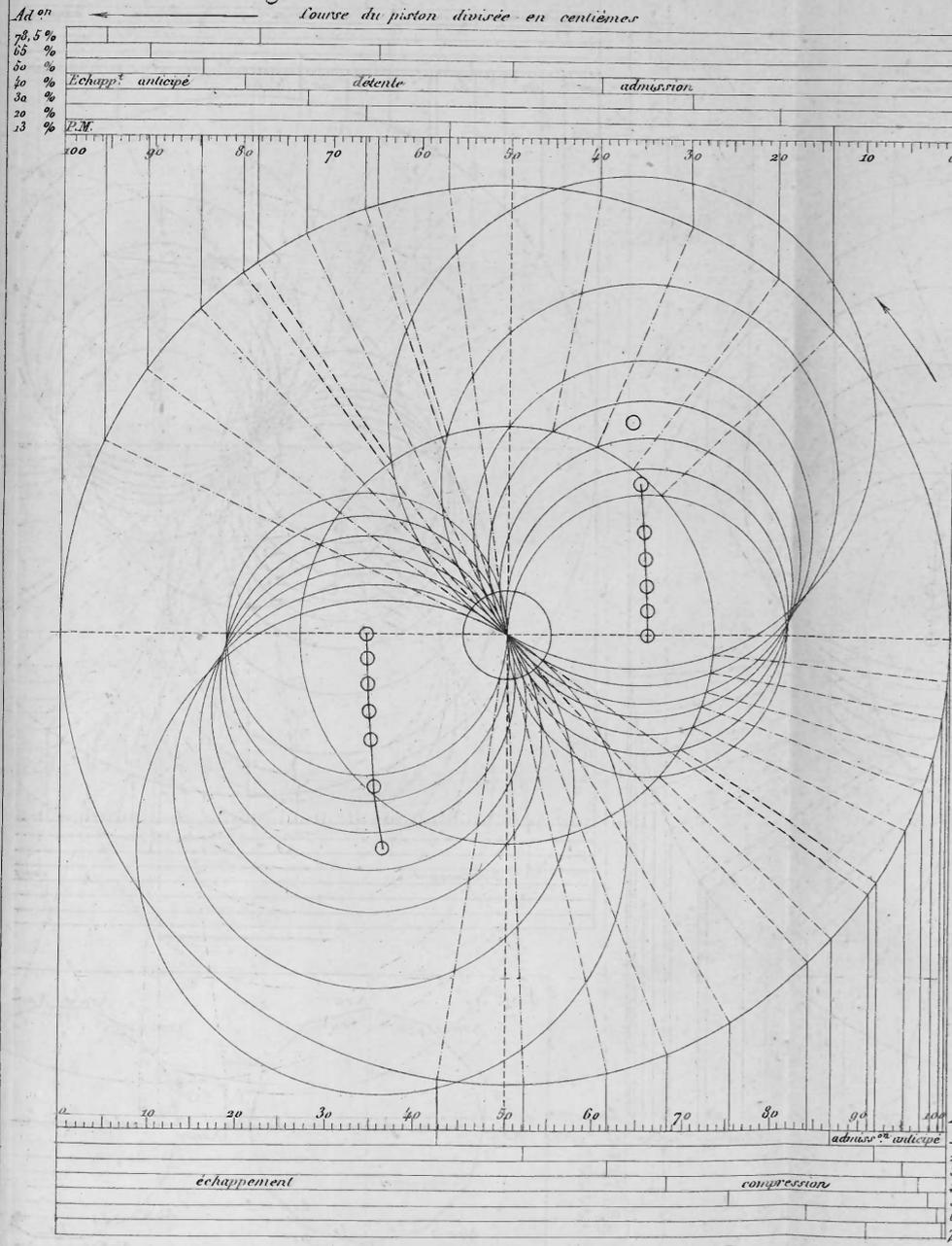


Fig. 5. Lessous et Crébier.

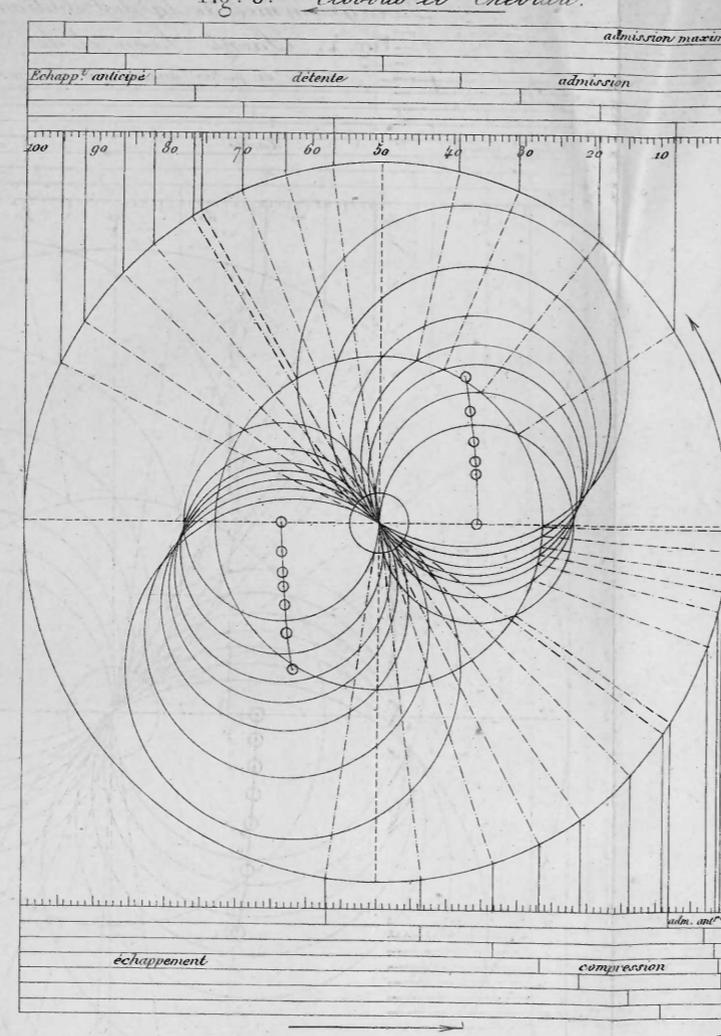


Fig. 2. Mokta-el-hadid

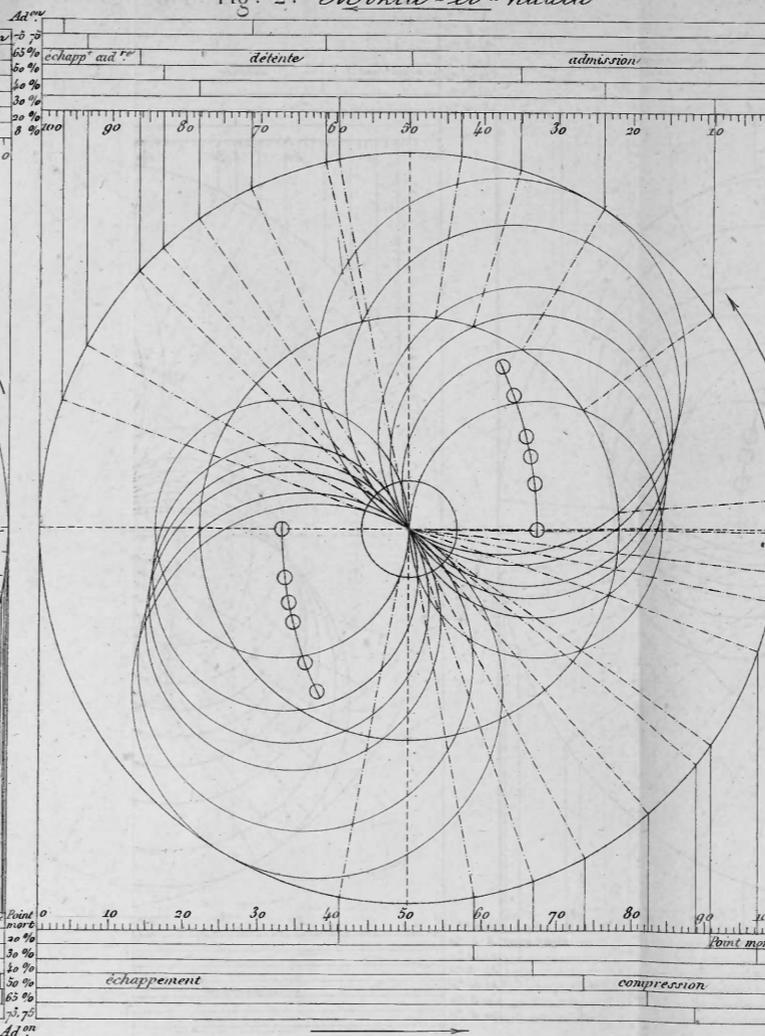
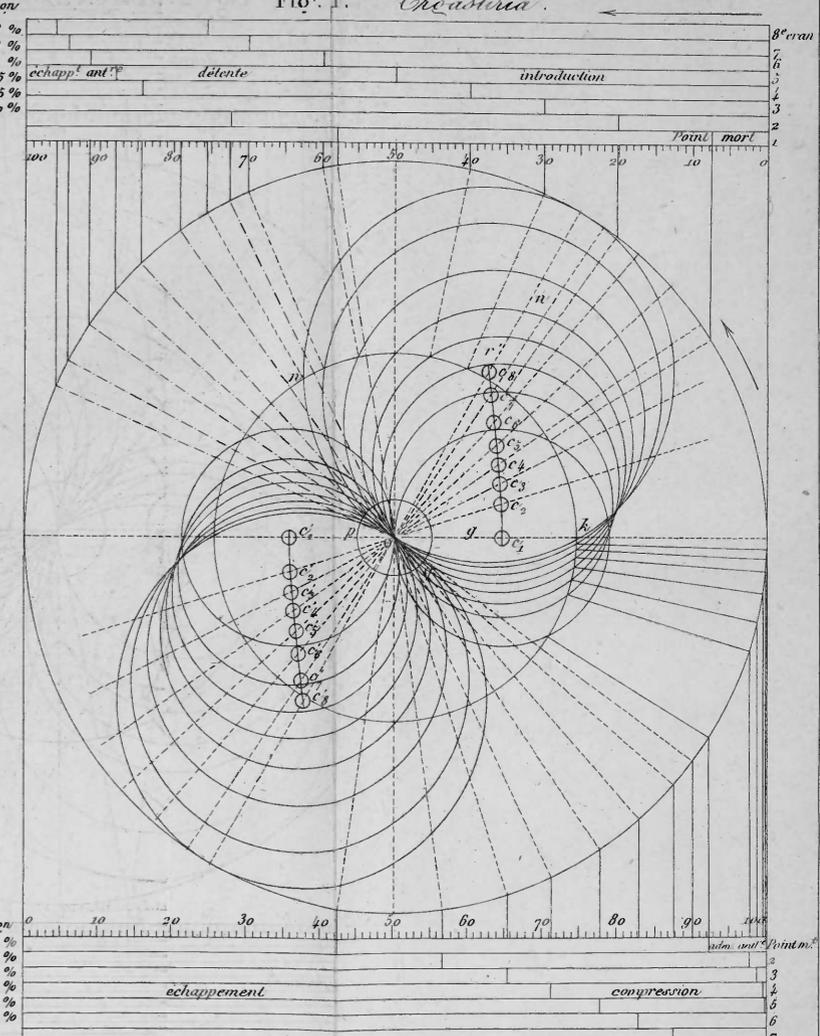


Fig. 1. Ercastia.



Echelles: Fig. 4, triple grandeur; Fig. 1, 2 et 3, grandeur naturelle.

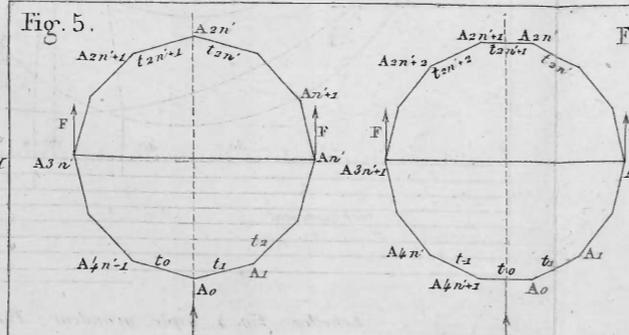


Fig. 6.

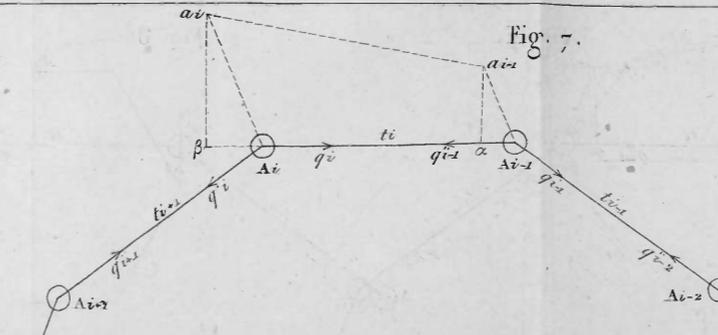


Fig. 7.

Fig. 8.

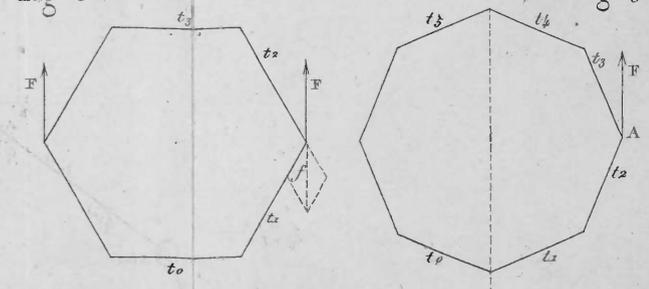


Fig. 9.