

*Nouvelle Collection scientifique*

*Directeur : Émile Borel*

---

4401P

L'évolution  
de  
**la Métallurgie**

PAR

**LÉON GUILLET**

Membre de l'Institut.

Directeur de l'École Centrale des Arts et Manufactures,  
Professeur au Conservatoire national des Arts et Métiers.

---

*Avec 37 figures dans le texte*

---

ÉCOLE CENTRALE DE LILLE



D0000004904

ÉDITIONS A. LAFONT  
**MAIRIE FÉLIX ALCAN**

## NOUVELLE COLLECTION SCIENTIFIQUE

sous la direction de M. ÉMILE BOREL.

VOLUMES IN-16 DE PRIX DIVERS.

### De la Méthode dans les Sciences :

- 1<sup>re</sup> série, par P.-F. THOMAS, EMILE PICARD, J. TANNERY, P. PAINLEVÉ, BOUASSE, E. JOB, A. GIARD, LE DANTEC, PIERRE DELBET, TH. RIBOT, BURKHEIM, LÉVY-BRUHL, G. MONOD. 11<sup>e</sup> mille.
- 2<sup>e</sup> série, par E. BOREL, B. BAILLAUD, JEAN PERRIN, LÉON BERTRAND, R. ZEILLER, LOUIS BLARINGHEM, SALOMON REINACH, GUSTAVE LANSON, LUCIEN MARCH, A. MEILLET. 8<sup>e</sup> mille.
- La Voix. *Sa culture physiologique*, par le D<sup>r</sup> P. BONNIER. 6<sup>e</sup> édit. Illustré.
- Science et Philosophie, par J. TANNERY, de l'Institut, avec une notice par Emile BOREL. 4<sup>e</sup> mille.
- Le Transformisme et l'Expérience, par E. RABAUD, professeur à la Sorbonne. Avec gravures. 3<sup>e</sup> édition.
- La Race slave. *Statistique, démographie, anthropologie*, par L. NIEDERLE, professeur à l'Université de Prague. Traduit du tchèque par L. LEGER, de l'Institut. 2<sup>e</sup> édition.
- L'Évolution de l'Électrochimie, par W. OSTWALD. Trad. E. Philipp. 3<sup>e</sup> édition.
- L'Éducation dans la Famille. *Nos fils*, par P.-F. THOMAS, 7<sup>e</sup> mille.
- L'Éducation dans la Famille. *Nos filles*, par LE MÊME. 3<sup>e</sup> mille.
- Les États physiques de la Matière, par CH. MAURAIN. 4<sup>e</sup> mille.
- L'Évolution des Plantes, par NOËL BERNARD, professeur à l'Université de Poitiers. Avec figures.
- Principes de Biologie végétale, par LE MÊME. Avec figures.
- Le Hasard, par Emile BOREL. 7<sup>e</sup> mille.
- Henri Poincaré, *l'œuvre scientifique, l'œuvre philosophique*, par V. VOLTERRA, J. HADAMARD, P. LANGEVIN, P. BOUTROUX. 3<sup>e</sup> édit.
- Le Système du Monde, *des Chaldéens à Newton*, par J. SAGERET, 3<sup>e</sup> mille.
- Les Atomes, par JEAN PERRIN de l'Institut, professeur à la Sorbonne (avec gravures). 17<sup>e</sup> mille.
- La Conception mécanique de la Vie, par J. LOEB. Traduit de l'anglais par H. Mouton. 3<sup>e</sup> mille. Avec figures.
- Troubles mentaux et Troubles nerveux de Guerre, par G. DUMAS, professeur à la Sorbonne.
- La Chirurgie moderne, par J. FIOLE, professeur à l'École de médecine de Marseille.
- Le Radium. *Interprétation et Enseignements de la Radioactivité*, par F. SODDY, professeur à l'Université d'Oxford. Traduit de l'anglais par A. Lepape. 7<sup>e</sup> mille. Avec figures.
- L'Unité de la Science, par M. LECLERC DU SABLON, professeur de la Faculté des Sciences de Toulouse. Avec figures. 3<sup>e</sup> mille.
- La Molécule chimique, par R. LESPIEAU, professeur à la Sorbonne. Avec figures. 5<sup>e</sup> mille.
- L'Idéal scientifique des Mathématiciens, par Pierre BOUTROUX, professeur au Collège de France. 3<sup>e</sup> mille.
- Le Destin des Étoiles. *Étude d'Astronomie physique*, par S. ARNÉNIUS, professeur de l'Institut de Stockholm. Traduit par M. Seyrig. 3<sup>e</sup> mille.



NI = 4401

no 4401P

~~Dr. L. L. L. L.~~

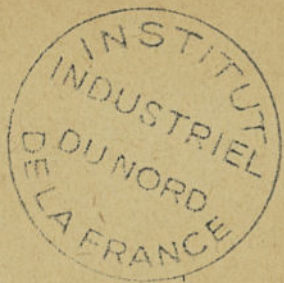
Dewey = 669 #601

21 JUL 1982









**L'ÉVOLUTION**  
**DE LA**  
**MÉTALLURGIE**





# L'ÉVOLUTION DE LA MÉTALLURGIE

PAR

**LÉON GUILLET**

Membre de l'Institut,  
Directeur de l'École Centrale des Arts et Manufactures,  
Professeur au Conservatoire national des Arts et Métiers.

---

AVEC 37 FIGURES DANS LE TEXTE



PARIS  
LIBRAIRIE FÉLIX ALCAN  
108, BOULEVARD SAINT-GERMAIN, 108

1928

Tous droits de reproduction, de traduction et d'adaptation  
réservés pour tous pays.

---

Tous droits de reproduction, de traduction et d'adaptation  
réservés pour tous pays.

Nineteen hundred twenty eight,  
Copyright by Librairie Félix Alcan.

---



## AVANT-PROPOS

---

Lorsqu'un lecteur entr'ouvre un volume, il est fort intéressant, pour lui-même et aussi pour l'auteur, qu'il sache bien ce qu'il peut y trouver.

Ce petit livre n'a nullement la prétention d'être le bref résumé d'un traité de métallurgie ; il ne veut pas non plus examiner un point particulier de cette industrie d'importance capitale ou étudier certains phénomènes, objets de recherches récentes, ayant eu des répercussions sur les fabrications.

Nous avons simplement cherché à indiquer brièvement les magnifiques progrès faits depuis 1850, en général, dans les méthodes métallurgiques elles-mêmes et dans les produits obtenus.

Le spécialiste trouvera peut-être dans ces pages la généralisation de faits qu'il a lui-même approfondis dans la branche qui le préoccupe.

## AVANT-PROPOS

L'industriel sera, sans doute, curieusement frappé de l'extension de certains phénomènes et de leur juste répercussion dans l'usine. Tous voudront bien retenir que la science a apporté dans ces questions une sécurité et une précision vraiment remarquables.

Peut-être quelques lecteurs seront-ils ainsi entraînés vers des études nouvelles ; si leur formation première le leur permet, ils voudront peut-être puiser, dans les laboratoires, des bases solides sur lesquelles ils s'appuieront dans leur carrière.

Qu'ils se disent bien que, en agissant ainsi, ils mettent de leur côté la plus grande chance d'un succès durable.



# L'ÉVOLUTION DE LA MÉTALLURGIE

---

## CHAPITRE PREMIER

### L'ÉVOLUTION DES MÉTHODES SIDÉRURGIQUES

**La situation en 1850.** — Quatre méthodes permettaient d'obtenir les produits sidérurgiques :

La forge catalane et le feu comtois ;

Le haut fourneau ;

Le puddlage ;

La fusion au creuset.

La forge catalane, ou le feu comtois, utilisant directement la réduction du minerai de fer, par le carbone, le fer étant obtenu à l'état solide, était déjà à son déclin. — Ne correspondant qu'à des productions faibles, ne traitant que des minerais riches, donnant des scories à teneurs élevées en fer, la méthode, durant de nombreuses années, avait dominé la sidérurgie, alors que le haut fourneau n'existait pas et que la fonte était un produit, si ce n'est inconnu, du moins fort rare. Utilisant les chutes d'eau, pour la production de l'air comprimé nécessaire, ces petits fours s'installaient localement sur le minerai, en pays de montagne ou sur les bords de rivière.

On en trouve encore des traces nombreuses dans l'Isère et les Pyrénées, et bien des centres métallurgiques ou métallifères sont nés de ces anciennes exploitations, spécialement dans la Nièvre, l'Orne, le Calvados, etc...

On assure d'ailleurs que bien des villes ou des villages, notamment les *Ferrières* que l'on trouve un peu partout, doivent leur nom à ces exploitations locales ; elles sont souvent le centre d'importants gisements de scories que la richesse en fer fait actuellement rechercher comme fondants. En principe, le fonctionnement de ces appareils était basé sur la réduction du minerai oxydé de fer par le carbone.

En somme, le bas foyer a eu son origine dans le tas de charbon qui, une fois allumé, est soumis à l'action de l'air d'un soufflet qui entretient la combustion. Placé dans une maçonnerie extrêmement simple, ce charbon reçoit du minerai. Celui-ci, en traversant le charbon, est soumis à l'action réductrice, et l'on obtient une masse métallique contenant des quantités très importantes de scories. — Retiré de ce petit four, le métal est soumis à l'action du marteau ; ce *cinglage* chasse une grande partie des scories interposées.

Ce très vieux procédé est tout particulièrement décrit, avec gravure à l'appui, dans le fameux traité d'Agricola, *De Re Metallica*. Il a été jadis à la base de la production sidérurgique.

Le haut fourneau est né, dit-on, sous l'influence d'un heureux hasard. Un audacieux aurait surélevé sa forge catalane et aurait été stupéfait de voir s'écouler au bas du petit four un métal liquide et ravi de ne plus avoir à extraire la loupe du foyer.

Ainsi serait née toute la métallurgie moderne



du fer. — Ici, en effet, apparaissent des réactions nouvelles qui sont à la base et de toutes les améliorations et de toutes les difficultés de la sidérurgie. Voici ce qu'il faut entendre par là :

Avant tout se trouvent les réactions qui créent le métal, réactions réductrices de l'oxyde ; mais il ne s'agit plus simplement du rôle réducteur du carbone, mais bien aussi et surtout de celui de l'oxyde de carbone.

Or, ce principe est tout à fait général : *ce dernier corps produit la réduction d'un oxyde à une température plus basse que ne le fait le carbone.*

D'autre part, dans un appareil métallurgique, comme le haut fourneau, il y a deux points à bien souligner :

Le minerai est en contact direct avec le coke, c'est-à-dire avec le carbone ; ils sont tous deux déversés dans l'appareil en couches successives. Donc le métal lui-même, lorsqu'il se produit, est en contact avec le carbone. Et si, dans les conditions de l'opération, il a des aptitudes à l'absorber, on sortira de l'appareil non pas le métal, mais bien un alliage de celui-ci et de carbone.

Fort heureusement, il n'existe que deux métaux courants qui puissent se carburer et donner lieu à des fontes : le fer et le nickel.

Ni le cuivre, ni le plomb, ni le zinc, ni l'étain, ni l'aluminium, ni les métaux précieux ne se carburent ainsi.

Donc le résultat de la réduction de minerais de fer — ce sont toujours des oxydes ou du carbonate — ce dernier étant ramené à l'état d'oxyde par une calcination préalable — le résultat final est toujours la fonte, alliage impur de fer et de



carbone, contenant de plus du manganèse, du silicium, du soufre et du phosphore, impuretés provenant du minerai, des fondants ajoutés pour rendre la gangue fusible, ou du combustible. D'ailleurs, certaines de ces impuretés sont volontairement additionnées soit pour donner à la fonte les qualités requises pour son utilisation directe, soit pour lui permettre aisément sa transformation de fonte en acier.

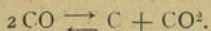
D'un autre côté, il faut bien noter que le coke, dans tout four à cuve, spécialement dans le haut fourneau, est là pour produire la température nécessaire aux réactions.

Sans doute joue-t-il dans le haut fourneau le rôle le plus complexe qu'il puisse avoir, puisqu'il est réducteur — rôle indispensable — carburant, ce dont on se passerait bien — et enfin combustible.

Pour qu'il remplisse ce dernier rôle capital, il est nécessaire d'insuffler dans l'appareil de l'air sous pression — nous verrons plus loin l'intérêt de le chauffer au préalable. — Suivant les réactions trop connues pour qu'il soit nécessaire de les inscrire ici, l'oxygène de l'air, dans le voisinage même des tuyères qui dirigent le jet, se combine avec le carbone pour donner de l'anhydride carbonique, car l'oxygène est en excès ; le gaz montant dans l'appareil, l'anhydride carbonique rencontre le carbone qui descend avec la charge et se transforme en oxyde de carbone, excellent réducteur.

Disons de suite qu'une autre réaction — étudiée beaucoup plus tardivement — se produit au sommet du haut fourneau, alors que la température se trouve aux environs de  $400^{\circ}$ . Cette réaction

est « catalysée » par la présence du minerai et son effet n'est pas négligeable. Elle consiste dans la décomposition de l'oxyde de carbone, suivant la réaction :



Ainsi du carbone se dépose, imprégnant la matière à réduire dès la partie haute de l'appareil, et cela encore aide singulièrement la transformation du minerai en métal.

Quoi qu'il en soit, et sans vouloir entrer ici dans le détail des réactions classiques du haut fourneau, insistons encore une fois sur ce que le produit de la réduction du minerai de fer est toujours une fonte, c'est-à-dire un alliage qui, certes, est intéressant en lui-même, sous forme de moulages, mais qui ne se prête nullement aux multiples applications du fer et de l'acier ; cela pour une raison capitale : il contient en quantités importantes une combinaison de fer et de carbone<sup>1</sup> :  $\text{Fe}^3\text{C}$  ou du graphite, c'est-à-dire du carbone libre, très souvent, ces deux constituants simultanément. Or, l'un et l'autre apportent de la fragilité et le premier cette très grande dureté caractéristique des fontes blanches (c'est-à-dire des fontes qui ne renferment pas de graphite).

Quels que soient les efforts anciens ou récents, quelle que soit l'ingéniosité des inventeurs et le secours qu'ils ont trouvé dans les appareils et méthodes modernes, notamment le four électrique, on peut affirmer que jusqu'à ce jour aucun procédé direct, aucune méthode permettant d'ob-

1. Cette combinaison, d'ailleurs, forme des solutions solides avec d'autres carbures, tels que ceux de manganèse, de chrome, etc...



tenir *directement* l'acier en partant de minerai, n'a pu s'affirmer, généralement parce que d'un prix de revient trop élevé.

La fonte est donc le produit intermédiaire de toute la sidérurgie. Le *puddlage* a été la première méthode industrielle permettant justement de transformer la fonte en fer. Elle a été découverte par Cort en 1784. Son nom provient du mot anglais *puddle* qui veut dire *mélanger, brasser*.

Elle consiste à faire disparaître la plus grande partie des impuretés de la fonte, en mettant celle-ci à l'état liquide en présence d'oxyde de fer. Ce sont donc des phénomènes d'oxydation comme ceux que nous rencontrerons dans les méthodes modernes — qui opèrent la transformation. Mais voici la caractéristique du *puddlage* : tandis que la fonte est introduite à l'état liquide dans le four, qui est un four à réverbère<sup>1</sup>, le produit de l'opération est du fer solide, dont il faut rassembler les grains pour constituer une véritable *loupe*. En un mot, la température de l'appareil est telle que la fonte s'y trouve portée au-dessus de son point de fusion, tandis que le fer y est solide. Il ne faut pas oublier, en effet, que la fonte passe à l'état complètement liquide entre 1.300 et 1.100° suivant sa composition, tandis que le fer pur fond à 1.500°.

On conçoit aisément qu'une telle opération fournisse un produit impur, ayant rassemblé une certaine quantité des scories qui baignent le métal,

1. On appelle *four à réverbère*, un four qui comporte une voûte dont la forme est généralement calculée pour renvoyer la chaleur sur la sole où se trouve la matière à traiter ou à chauffer. Un tel four peut être chauffé par combustible solide disposé sur grille — c'était le cas des fours à puddler —, par gaz, par combustible liquide, par charbon pulvérisé. Dans un tel four, les matières traitées sont en contact avec les produits de la combustion et la sole.



et qu'il doit être soumis à un traitement mécanique énergique pour les chasser et aussi pour souder les grains de fer. — Mais si les fers puddlés, même les meilleurs, ne possèdent point les qualités trouvées dans les produits modernes, du moins jouissent-ils de certaines propriétés qui ont contribué à sa vulgarisation et aujourd'hui où ils ont presque complètement disparu en France, par suite de la destruction dans la dernière guerre des fours de la région du Nord et de la difficulté de se procurer une main-d'œuvre spécialisée, très pénible d'ailleurs, regrette-t-on leur absence sur le marché commercial.

Par suite notamment de la présence de scories interposées, ils présentaient tout particulièrement une facilité de soudure au simple marteau, que le maréchal-ferrant, le forgeron de village, comme le fabricant de chaînes goûtaient tout particulièrement et qu'ils ne retrouvent point dans l'acier, si doux soit-il.

La *fusion au creuset* est le premier procédé de fabrication de l'acier liquide; aussi désigne-t-on encore de façon vraiment bien peu scientifique, sous le nom d'*acier fondu*, les produits de cette méthode, comme si les procédés modernes ne fournissaient point le métal sous le même état liquide.

On sait la curieuse histoire de sa découverte : un horloger de Sheffield, Huntsmann, mécontent des ressorts préparés par soudage qui lui étaient livrés, voulut les fabriquer lui-même et, pour cela, chercha à refondre, dans un récipient réfractaire, les ressorts cassés qu'il possédait. Ses études, qui se poursuivirent aux environs de 1740, durent être longues et pénibles ; car, à sa mort, on trouva,

affirme-t-on, une grande quantité de produits inutilisables. Cependant, dès 1750, il existait dans les environs de Sheffield un certain nombre de fabriques d'aciers au creuset.

Ainsi est né l'un des procédés qui, jusqu'à l'apparition du four électrique, a été le seul produisant les aciers extra-fins, cela pour la raison dominante, à savoir que les réactions chimiques sont réduites au minimum et que, conséquence immédiate, le procédé au creuset est celui qui permet le mieux d'opérer une fusion de matières sans les transformer et qui se prête admirablement à toutes les additions, même de métaux fondant à température élevée.

Alimenté en matières premières de qualité, fer de Suède, fer électrolytique, que l'on carburait par une cémentation préalable, auquel on ajoute maintenant des fontes pures pour obtenir le pourcentage de carbone cherché, le creuset a résisté, malgré son prix de revient élevé, dans la lutte que lui a livrée le four électrique.

Utilisant le chauffage au gaz, avec récupération à inversion, le procédé est cependant très coûteux et ne peut être utilisé, répétons-le, que pour des produits extra-fins.

Telles étaient, trop brièvement résumées, les méthodes sidérurgiques en 1850.

#### **Le problème du chauffage des fours ; la récupération.**

— Il est bon de noter, d'ores et déjà, que la question capitale du chauffage des fours de métallurgie avait bien peu progressé entre 1800 et 1850.

Cependant l'idée de souffler les fours à cuve, tout spécialement les hauts fourneaux, non plus avec de l'air froid, mais bien par de l'air préala-



blement chauffé, avait largement reçu la consécration de la pratique.

Tout au début, suivant Neilson (1828), on chauffait spécialement, par combustible peu coûteux, des tuyaux en fonte, dans lesquels passait l'air sous pression, avant de gagner les tuyères du four.

Ce n'est que plus tard, vers 1860, que l'on utilisa des appareils en briques. Cowper inventa un premier appareil dans lequel les briques étaient superposées ; le nettoyage fréquent était

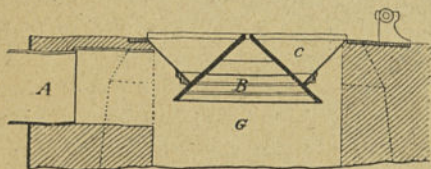


Fig. 1. — Appareil de chargement *cup and cone*.  
A, prise de gaz latérale. — B, cône. — C, cup. — G, gueulard.

extrêmement onéreux et on dut abandonner ces dispositions pour revenir aux tuyaux de fonte. Whitwell, en 1870, inventa l'appareil (fig. 3) qui s'est rapidement répandu et dans lequel les gaz passent à travers des carneaux interrompus alternativement en haut et en bas ; lorsque l'appareil a été porté à température assez élevée, on interrompt l'arrivée de gaz et on fait arriver l'air en sens inverse.

Cowper établit ensuite l'appareillage moderne dont on parlera plus loin.

D'autre part, la question de la récupération des chaleurs entraînées par les gaz sortant des fours, question d'une importance capitale et qui, seule,



a permis de résoudre le problème de la fusion de l'acier sur sole, était en plein épanouissement.

Les frères Siemens avaient établi, dès 1856, l'intérêt qu'il y a à récupérer la chaleur entraînée par les gaz qui sortent des fours.

Nous voudrions faire comprendre en quelques mots le principe même de la récupération Siemens qui a permis la création du procédé Martin.

Le fait de chauffer un four par des gaz et de l'air chauds permet d'obtenir des températures plus élevées que si l'on introduit dans le four un combustible et un comburant froids.

Afin de produire le chauffage des gaz et de l'air de façon économique, les frères Siemens établirent deux paires de chambres remplies de briques superposées placées sous le four intéressé ou dans son voisinage. Ce sont ces chambres qui vont former récupérateurs.

Supposons le four en marche, il reçoit du gaz et de l'air par les brûleurs; ce gaz et cet air arrivent dans le four après avoir traversé chacun une des chambres de l'un des groupes; ces chambres ayant été préalablement chauffées, comme il va être dit, abandonnent leurs calories au gaz et à l'air, et ceux-ci parviennent au four, ayant acquis une température élevée.

Pendant ce temps, les gaz brûlés, sortant du four, passent à travers le groupe des deux autres chambres, et comme ils sont à très haute température — 1.700° dans le cas de fabrication de l'acier — ils chauffent les récupérateurs.

Au bout d'un certain nombre de minutes — disons trente pour fixer les idées par un chiffre rond et approximatif — le groupe des deux premières chambres qui sont traversées par l'air et le



SOCIÉTÉ METALLURGIQUE DE SENELLE-MAUBEUGE

Installation des Hauts fourneaux N<sup>os</sup> 3 & 4

Coupe transversale

— Légende —

- A Accumulateurs à minerais
- B Accumulateurs à coke (réserve)
- C Treuil du monte-charge
- D Monte-charge
- E Haut-Fourneau
- F Appareil Cowper
- G Cuve à poussières
- H Epuration par voie humide
- I Epuration par voie sèche

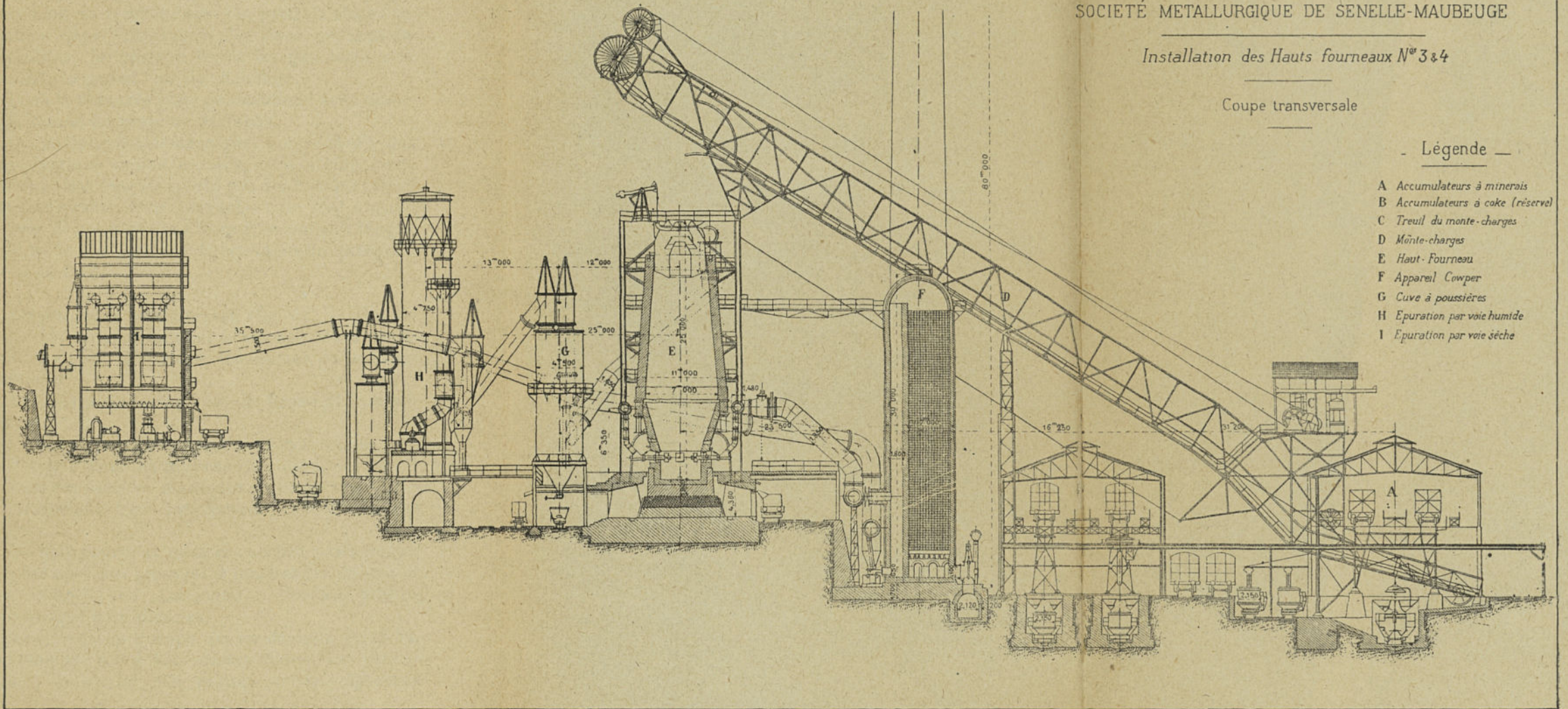


Fig. 2.







gaz froids se rendant au four, a cédé ses calories, tandis que le second groupe, qui reçoit les gaz chauds sortant du four, a vu augmenter singulièrement sa température. On produit alors l'inversion dans l'utilisation des deux groupes de chambres. Le premier reçoit les gaz brûlés, le second, le gaz et l'air de chauffage.

D'où le nom très juste de chauffage avec inversion donné au système Siemens.

On comprend aisément que, pour obtenir des températures moins élevées, ce système complexe puisse être remplacé par des récupérateurs sans inversion dans lesquels l'air seul circule autour de poteries dans lesquelles passent les gaz brûlés, le gaz arrivant directement du gazogène dans le four.

Les progrès du haut fourneau (fig. 2). — Depuis 1850, les progrès du haut fourneau ont été continus. On peut, d'ailleurs, les classer de la façon suivante :

Progrès dans la capacité, la forme et la construction ;

Progrès dans les moyens de manutention ;

Progrès dans les moyens de chauffage ;

Progrès dans les méthodes de contrôle.

Analysons très brièvement chacun de ces points :

Le haut fourneau moderne atteint couramment en Europe une production journalière de 300 et 400 tonnes; en Amérique il fournit parfois 800 tonnes quotidiennes.

Tandis qu'en Europe, on ne dépasse guère un volume de 300 à 600 mètres cubes, aux États-Unis on atteint 800 mètres cubes. Ajoutons

d'ailleurs que, vers 1870, on a même été vers des capacités exagérées (1.100 mètres cubes en Amérique) et que l'on est sagement revenu à de plus justes proportions.

D'autre part, dans sa construction même, le haut fourneau a subi des transformations importantes ; beaucoup moins trapu, bien plus élancé, l'appareil actuel peut être caractérisé par les rapports suivants dans ses principales dimensions :

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| Hauteur maximum . . . . .  | 35 mètres. |
| Diamètre maximum . . . . . | 10 —       |

Et pour la plupart des appareils :

|                    |                 |
|--------------------|-----------------|
| Hauteur . . . . .  | 20 à 26 mètres. |
| Diamètre . . . . . | 5 à 6 —         |

(Il s'agit du diamètre au ventre),

avec 1<sup>m</sup>,50 à 2 mètres de profondeur du creuset, où se rassemblent les produits liquides.

Tandis que, vers 1850, on cherchait avant tout à forcer l'épaisseur des parois, de façon, pensait-on, à conserver la chaleur dans l'appareil même, que l'on a été jusqu'au haut fourneau à double paroi, avec interposition d'une matière calorifique, actuellement l'appareil est construit avec une seule épaisseur de briques dont les qualités varient d'ailleurs avec les régions et les températures qui y règnent.

La préoccupation est, alors, de refroidir puissamment par un ruissellement extérieur d'eau, toujours abondant à la partie basse, au creuset où se rassemblent laitiers et scories, coulant parfois même sur une grande partie de l'appareil.

Lorsque le four a pris sa capacité moderne,



d'autres modifications ont été naturellement envisagées ; il a fallu rendre indépendantes les deux parties du four : la partie haute reposant sur un encorbellement métallique soutenu par des colonnes ; la partie basse, sujette à des réparations plus fréquentes, reposant par le creuset sur le sol convenablement préparé.

Enfin, les alentours mêmes du haut fourneau ont dû recevoir des dispositions très différentes, car les produits ont actuellement des destinations inconnues en 1850 et, d'autre part, une aire de coulée devant recevoir 30 tonnes de produits ou 400 tonnes par vingt-quatre heures ne peuvent être analogues.

L'écoulement, la granulation, la reprise des laitiers nécessitent des dispositions spéciales, parfois importantes ; le fait de recueillir la fonte à l'état liquide pour l'entraîner de suite vers l'aciérie (ou vers le mélangeur) réclame évidemment une disposition autre que celle de la coulée en gueuses ; plus exactement, le haut fourneau moderne réclame une double disposition : d'une part l'aire de coulée en sable pour les jours d'arrêt de l'aciérie ; d'autre part le chenal de coulée qui, placé à hauteur convenable au-dessus du sol de l'usine, permettra à la fonte d'être reçue directement dans la poche destinée au mélangeur.

Les *appareils de chargement*, inexistants en 1850, sont actuellement les indispensables serviteurs du haut fourneau. Les humbles monte-charges verticaux, permettant aux wagonnets remplis les uns du lit de fusion, les autres de coke, de gagner le plan du gueulard, où on les déplaçait à la main, ont longtemps subsisté et existent encore dans les petites unités. L'appa-



reillage moderne correspond évidemment à une automaticité très remarquable : la benne, qui a été chargée en passant sous les silos contenant les matières premières, est entraînée vers le gueulard, s'y pose doucement, empêchant les gaz de sortir, tandis que, toujours de façon automatique, se baisse le fond de ce wagonnet, laissant ainsi s'écouler la charge dans le four. Montecharges formant plans inclinés et que l'on appelle *skips*, très employés dans les grandes installations de l'Est, telle que celle de Hagondange, montecharges verticaux rejoignant le haut fourneau par passerelles horizontales, tels que les utilisent les usines de Caen, ce sont là les deux principaux dispositifs modernes.

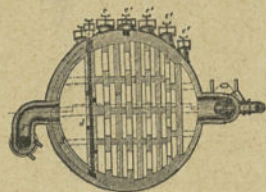
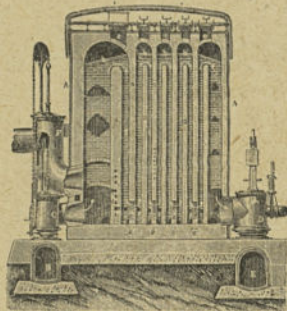


Fig. 3. — Appareils Witwell.

années, ceci a conduit à l'emploi d'un appareil connu sous le nom de *cup and cone* (fig. 1) : formé d'une coupe annulaire obstruée par un cône

Depuis longtemps déjà s'est fait jour un autre souci dont nous avons dit quelques mots : l'utilisation des gaz du haut fourneau. Nous en parlerons plus loin (chap. III); signalons seulement que l'appareil de chargement est de ce fait plus complexe et aussi parce qu'une autre préoccupation s'ajoute à celle-là : la bonne répartition dans le four des matières à traiter et, depuis de longues

qui peut se soulever ou s'abaisser, l'appareil fermé reçoit les matériaux et s'ouvre, par simple déplacement vertical du cône, pour laisser se répandre la matière sur tout le pourtour du four. Cette disposition constitue maintenant le fond même du wagonnet qui vient obstruer le gueûlard au moment du chargement, alors que généralement un rideau métallique, qui s'écarte en temps voulu, s'oppose à la répartition des gaz dans l'atmosphère.

Bien remarquables sont ces progrès, et cependant ils n'empêchent nullement le haut fourneau d'avoir un caractère difficile, une humeur changeante.

Aussi l'un des perfectionnements les plus importants s'est-il fait en dehors de lui-même; afin d'avoir une composition aussi constante que possible dans le produit final, ne pouvant l'obtenir d'un four, on mélange la fonte provenant de toute la série de hauts fourneaux de l'usine, cela dans un vaste appareil, dont la capacité atteint souvent 1.000 tonnes.

Ce mélangeur est généralement chauffé, il ne l'a pas toujours été. Il produira d'ailleurs un commencement d'affinage, soit par simple décanation qui permet au sulfure de manganèse de remonter à la surface du bain, soit par action oxydante de minerais. En tous les cas, il sera l'appareil d'alimentation de l'aciérie moderne.

Ajoutons enfin que le chauffage du vent a été particulièrement étudié et que l'on atteint couramment à l'heure actuelle des températures de 800-850°.

A cet effet, on a substitué, aux anciens appareils de Witwell, les appareils Cowper constitués



par une tour comprenant une cheminée cylindrique de section ronde ou mieux elliptique, située tangente au revêtement intérieur, et de multiples carneaux verticaux formés de briques creuses. Lors de l'arrivée des gaz, ceux-ci brûlent dans la cheminée cylindrique et les produits de la combustion descendent à travers les carneaux verticaux. L'appareil étant chaud, la marche de l'air soufflé a lieu en sens inverse. Ces appareils, généralement au nombre de cinq pour un haut fourneau, ont le plus souvent une hauteur de 30 mètres et un diamètre de 6 mètres ; ils sont disposés en ligne en arrière des hauts fourneaux, parfois à leurs côtés. — Récemment on a perfectionné ces appareils — dans le but d'en diminuer le nombre et la capacité — en soufflant les gaz qui doivent y brûler et activer ainsi les échanges. Il faut, en effet, rappeler que dans les Cowpers ordinaires le chauffage demande trois heures, tandis que le refroidissement par l'air se fait en une heure. Avec les Cowpers soufflés, système Pfoser-Stracke-Stusmm ou P.-S.-S., il faut seulement deux à trois appareils par four au lieu de quatre à cinq appareils anciens.

Enfin, ajoutons que les méthodes de contrôle, dont nous parlerons plus loin, jouent ici un rôle qui prend sans cesse de l'importance : mesure des pressions, mesure des températures, analyses très développées des matières premières et des produits finis, ainsi que des gaz. Rappelons aussi que le haut fourneau est l'un des appareils qui a donné lieu aux plus belles études systématiques, depuis les recherches classiques de Lowthian Bell qui avait placé de distance en distance des prises de gaz et d'échantillons, jusqu'aux travaux



tout récents que l'on poursuit sur les fontes de tous les côtés.

Nous ne pouvons pas ne pas dire un mot d'une question fort controversée, celle de la dessiccation du vent. Elle fit un bruit considérable, amena de longs mémoires, de grandes discussions pendant un certain nombre d'années. En 1904, Gayley signala les résultats obtenus à Pittsburgh, lesquels correspondaient à une augmentation de 25 p. 100 de la production et simultanément une économie de 20 p. 100 de coke, cela en faisant au préalable une dessiccation du vent. D'autres expériences furent faites et l'on dut conclure que dans les essais de Gayley sont intervenues non seulement la question de dessiccation du vent, mais aussi d'immenses modifications apportées aux autres facteurs, notamment à la température de ce vent. D'autre part on poursuivit dans l'est de la France des recherches fort intéressantes sur le procédé Daubiné et Roy, dans lequel la dessiccation est obtenue — non pas par l'air liquide comme dans le procédé américain, mais bien par le chlorure de calcium. Les résultats furent beaucoup plus économiques et cependant cette méthode, pas plus que celle de Gayley, n'a pris d'extension. L'industrie ne paraît pas pouvoir compter sur une économie telle qu'elle doive monter avec sécurité des services de dessiccation même avec les perfectionnements de dessiccation par un gel de silice.

**La découverte du procédé Bessemer.** — C'est vers 1855 que fut découvert le procédé Bessemer, le premier procédé permettant d'obtenir une grande masse d'acier liquide.

Bessemer n'était nullement métallurgiste ;

inventeur ayant touché à de multiples questions<sup>1</sup>, la conservation des insectes, la frappe du velours, il n'eut aucun succès avec un bateau antimal de mer qui ne fit jamais qu'une traversée entre Douvres et Calais.

C'était à l'époque de la guerre de Crimée; Bessemer inventa un obus à ailettes, que rappellent singulièrement certains engins utilisés dans la dernière guerre; il vint en France, proposa son invention et fut renvoyé devant une Commission qui siégeait à Vincennes; les conclusions de celle-ci furent très nettes: l'obus était intéressant, mais il n'existait aucun canon, même aucun métal à canons qui pût permettre de le tirer.

Non découragé, Bessemer retourna en Angleterre et chercha à produire le métal très résistant qui devait permettre de constituer le canon désiré. Il eut cette idée, qui n'eût sans doute jamais germé dans le cerveau d'un métallurgiste de l'époque, de faire passer un courant d'air froid dans de la fonte liquide, chauffée dans un four réverbère. Il était extrêmement observateur et possédait un réel esprit scientifique: il nota que, contrairement à toute attente, le métal, sous l'influence de cet air froid, voyait s'élever sa température; il eut alors l'idée de la fameuse cornue qui devait être à la base de l'un des grands procédés modernes de la sidérurgie. Au début, elle avait la forme d'un cubilot comportant à la partie supérieure une ouverture pour l'échappement des gaz, sur le côté une autre ouverture pour l'introduction de la fonte, cette ou-

1. Voir l'étude de M. Henry Le Chatelier, *Revue de métallurgie*; 1910, Mémoires, p. 301.



L'ÉVOLUTION DES MÉTHODES SIDÉRURGIQUES

verture étant bouchée pendant la marche, et enfin, à la partie inférieure et régulièrement réparties, des tuyères amenant l'air sous pression.

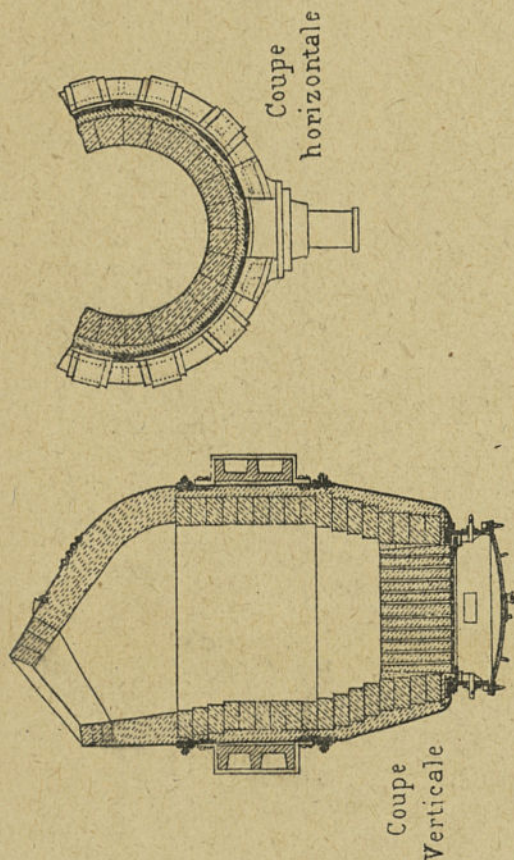


Fig. 4 et 5. — Convertisseur d'acier.

Actuellement (fig. 4 et 5) on utilise partout la cornue ne comportant qu'une seule ouverture, un bec rejeté sur le côté; la cornue est portée par deux tourillons horizontaux et peut tourner autour de



son axe. Elle est constituée par une enveloppe de tôle avec fort garnissage réfractaire. L'air soufflé arrive par des tuyères placées à la partie inférieure de la cornue et traversant le garnissage ; la boîte à vent est raccordée à la tuyauterie d'air comprimé qui forme l'un des tourillons, cela afin que l'air arrive sans difficulté pendant la rotation du convertisseur ; l'autre tourillon porte un engrenage, lequel est actionné par une crémaillère verticale permettant de donner le mouvement de bascule. Dans le procédé de Bessemer, le revêtement est acide, il est donc formé de silice que l'on agglomère par de l'argile réfractaire. — En renversant convenablement la cornue, elle reçoit la fonte liquide ; on la redresse pour l'opération même ; la coulée se fait par un nouveau mouvement de renversement. Donc la cornue Bessemer est un appareil métallurgique non chauffé ; elle reçoit la fonte à l'état liquide, et le convertit en acier, par oxydation des impuretés sous l'influence du courant d'air.

Mais le métal ainsi obtenu était tantôt d'excellente qualité, tantôt il se fendait au laminoir. Des observations faites dans la fabrication des aciers au creuset, notamment par Mushet, conduisirent Bessemer à ajouter, avant coulée, du manganèse. Les résultats furent meilleurs, mais non réguliers. Quelques années après, il fut établi que les fontes phosphoreuses ne pouvaient être utilisées, le phosphore demeurant dans le bain.

A l'heure actuelle, la théorie du procédé Bessemer nous apparaît fort simple : la combustion intermoléculaire de certains éléments de la fonte, carbone, silicium, manganèse, dégagent une quantité de chaleur importante et tandis que la fonte

voit diminuer ces impuretés qui passent à l'état gazeux ou dans les scories, et devient ainsi de l'acier, la température du bain s'élève et, bien que son point de fusion soit fort élevé, il demeure à l'état liquide et peut aisément être coulé de la cornue dans la poche à la fin de l'opération.

Nous n'avons point à entrer ici dans les détails d'une opération, mais nous devons toutefois bien insister sur la question suivante : la cornue Bessemer, qui possède un revêtement siliceux, ne peut éliminer le phosphore contenu dans la fonte ; et cela, comme l'ont établi les magnifiques mémoires de Gruner<sup>1</sup>, parce que l'action de l'air peut bien transformer le phosphore en anhydride phosphorique, mais celui-ci est immédiatement réduit par le carbone et le phosphore passe à nouveau dans le bain. Pour se débarrasser du phosphore, notons-le de suite, il faut donc fixer l'anhydride phosphorique par une base énergique, la chaux ; mais, complication sérieuse, cette chaux ne peut être ajoutée dans un convertisseur à revêtement siliceux, car elle se porterait sur celui-ci pour le détruire. Toute la question du traitement des fontes phosphoreuses au convertisseur revient donc à créer dans la cornue une paroi basique. Nous verrons, un peu plus loin, comment a été résolu ce délicat problème.

Depuis son invention, le procédé Bessemer a subi des progrès de dimensions d'appareils, de dispositions d'ateliers ; mais, sur le continent du moins, les progrès visent surtout le procédé basique que nous étudierons ultérieurement.

1. *Annales des Mines*, 1859, t. XV, p. 291, et 1860, t. XVIII, p. 553.



La découverte du procédé de fusion sur sole. — Bien peu d'années après la découverte du procédé Bessemer, se poursuivirent d'importantes recherches en vue de fondre au four à réverbère le fer ou l'acier doux. Deux grandes difficultés devaient être surmontées : la première consistait en l'obtention d'une température assez élevée, dans un espace relativement important ; la seconde, dans l'emploi de matériaux suffisamment résistants à ces températures et pouvant alors constituer parois et voûte de l'appareil.

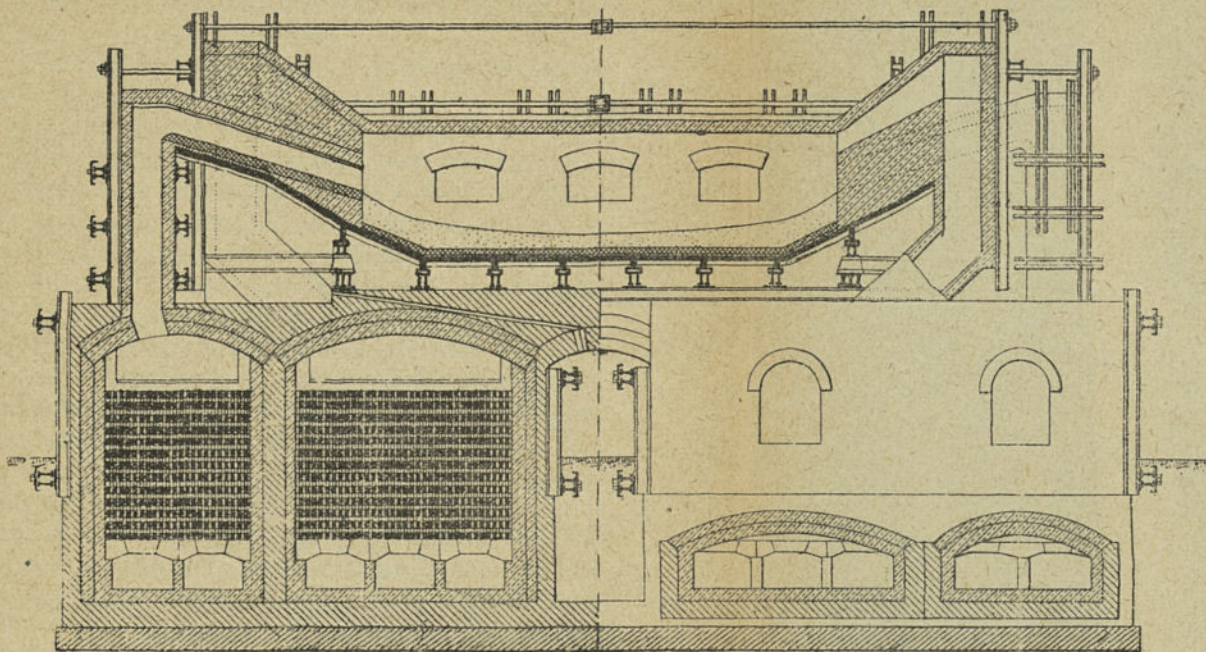
Louis Le Chatelier, en relations suivies avec William Siemens, eut certainement l'idée d'utiliser le principe de la récupération afin d'obtenir dans un four à réverbère la température cherchée. Il faut noter que le premier brevet relatif à la température fut pris par Frédéric Siemens, le 2 décembre 1856.

Les essais eurent lieu à Montluçon à l'usine de Boignes, Rombourg et C<sup>ie</sup>. Louis Le Chatelier et William Siemens les conduisirent eux-mêmes ; la correspondance publiée par Henry Le Chatelier (*Revue de Métallurgie* 1907, Mémoires, p. 212) le prouve nettement.

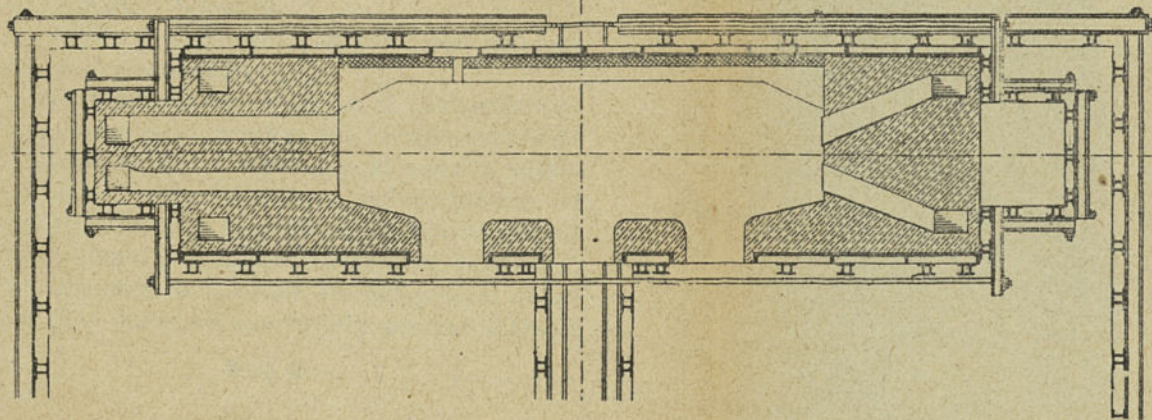
L'échec de ces essais fut dû simplement à la mauvaise qualité des produits réfractaires utilisés et William Siemens considéra toujours Louis Le Chatelier comme le véritable inventeur du procédé de fusion de l'acier sur sole.

Emile et Pierre Martin reprirent le problème et purent atteindre le but visé, grâce à l'emploi de briques siliceuses de meilleure qualité ; le 8 avril 1864, le premier acier fondu sur sole était obtenu ; des brevets furent pris et d'ailleurs





Plan







une participation aux bénéfiques fut attribuée par Martin à William Siemens.

A partir de 1867, les fours à récupération se répandirent avec le plus grand succès.

Un four Martin (fig. 6 et 7) est caractérisé par l'utilisation du combustible gazeux, provenant de gazogène, sa distribution dans le four réverbère par un ou plusieurs brûleurs, placé au-dessous de celui qui amène l'air, ces brûleurs fonctionnant tantôt pour amener combustible et comburant, tantôt pour entraîner le gaz brûlé; il possède une sole qui peut être acide ou basique, une voûte en brique silicieuse; le four proprement dit est placé à une certaine hauteur au-dessus du sol de l'atelier; ceci, afin de permettre de couler le métal dans une poche qui dessert ensuite les lingotières; un plancher de chargement permet d'introduire les matières dans le four par des portes situées sur la face opposée à celle de la coulée; naturellement la sole comporte une pente qui permet de vider le four par le trou de coulée; l'enlèvement des scories a lieu par les portes de chargement. Ainsi que nous l'avons noté, la principale caractéristique du four Martin se trouve dans les quatre chambres de récupération Siemens.

Les grands progrès des fours Martin peuvent se résumer comme suit :

Au point de vue construction, il faut spécialement signaler la séparation des récupérateurs du four même, et leur emplacement sous la plateforme, afin d'augmenter leur indépendance, et surtout les heureuses modifications apportées dans la disposition des brûleurs : autrefois verticaux, débouchant près de la voûte, ils fatiguaient celle-ci; d'où une direction à 90° à leur arrivée dans le



four et enfin actuellement une inclinaison très marquée afin de former un véritable chalumeau qui frappe la sole en un point déterminé. Ainsi l'opération est-elle plus rapide.

D'ailleurs ces brûleurs, qui souffrent beaucoup, ont pu être rendus indépendants du four même, de telle sorte que leur changement est rapide et facile. De plus, pour certaines opérations intéressantes, on a rendu tout le four basculant, les brûleurs restant fixes; ceci permet notamment un enlèvement rapide des scories et l'action successive de plusieurs scories.

Au point de vue dimensions, le four Martin présente une élasticité vraiment remarquable; on désigne le four par la quantité de métal correspondant à une coulée; dans ces conditions, l'industrie utilise des fours de 3 tonnes, et toutes capacités jusqu'à 70 tonnes et même plus, sans parler des fours oscillants de 200 tonnes.

Avec les progrès dans les gazogènes, de meilleures dispositions et utilisations des récupérateurs, la grande longueur des brûleurs, leur inclinaison et le refroidissement des têtes de brûleurs, l'augmentation de capacité du four, on est arrivé à une durée plus grande du four, à une rapidité remarquable de l'opération, à une économie très accusée de combustible, tous facteurs qui ont la plus heureuse influence sur le prix de revient.

Il faut encore ajouter l'utilisation dans le four Martin de gaz résiduels, tels que ceux des fours à coke qui, employés avec précautions, apportent encore des économies considérables.

Enfin il est nécessaire de bien noter toute la souplesse de la marche d'un Martin; susceptible

de n'être qu'un four de fusion, tel qu'il avait été désiré au début et de rendre par conséquent utilisables tous ces innombrables résidus du travail des aciers sur machines-outils, le four Martin permet de plus un excellent affinage et de la fonte et des matériaux impurs qu'on peut y traiter.

En milieu acide il donne, sans qu'on puisse peut-être l'expliquer de façon absolument sûre, — bien que l'hypothèse d'une bonne désoxydation soit très plausible, — il donne, disons-nous, des produits de haute résilience que l'on n'obtient peut-être pas aussi sûrement sur sole basique, cette dernière permettant, comme on va le voir, la déphosphoration. Sa marche lente, une coulée se fait en quatre, six ou même huit heures, permet une surveillance très précise du produit obtenu, une mise au point de la composition du bain qui donne vraiment une grande sécurité; dans certaines usines, on va même jusqu'à placer sur la plate-forme du four des laboratoires d'analyse chimique qui suivent l'opération. Enfin le four Martin constitue l'appareil désiré pour la fabrication en grandes masses des aciers spéciaux.

**La découverte du procédé Thomas-Gilchrist.** — Nous avons indiqué comment Gruner avait, entre 1860 et 1867, établi la théorie de la déphosphoration. Tout le problème industriel revenait donc principalement à la création d'un revêtement basique, sans parler de la nécessité d'un sursoufflage.

Muller, professeur à l'École Centrale des Arts et Manufactures, prit en 1869 des brevets extrêmement précis en vue de la création d'un revêtement de magnésie dans la cornue Bessemer, cela



en vue de pouvoir enlever le phosphore aux fontes traitées dans l'appareil.

Mais l'invention de Muller resta sans lendemain. La guerre de 1870 éclata et toute l'énergie de l'éminent professeur fut dirigée vers un autre but, la fabrication des munitions.

Les essais de Tessié du Mottay, en 1872, ceux de Lencauchez en 1874 fixent encore l'attention sur l'importance du revêtement basique et l'intervention de la chaux comme agent de fixation de l'anhydride phosphorique formé et, en 1875, paraît le traité de Gruner qui précise définitivement et magistralement les conditions à remplir.

Mais c'est à Thomas et Gilchrist — cousins germains — que l'on doit réellement la mise au point du convertisseur basique et de la méthode même de la déphosphoration.

Fonctionnaire à la Police Court de Londres, Thomas suivait les cours du soir, et l'un de ses professeurs signala comme problème du plus haut intérêt, celui de la déphosphoration des fontes au convertisseur.

Il se rapproche de son cousin Percy Gilchrist qui était chimiste, crée un laboratoire pour y poursuivre ses recherches. En 1877 tous deux commencent leurs essais. En novembre de cette même année, un premier brevet est pris, les essais donnent des résultats intéressants et en 1878 paraît un remarquable mémoire dans le journal de l'*Iron and Steel Institute*, et l'année 1879 fut vraiment décisive : le revêtement dolomitique était créé ; l'action d'une addition de chaux et d'une période de sursoufflage — nuisible dans le procédé ordinaire — était nettement prouvée.

Et enfin l'utilisation des scories de déphosphoration comme engrais apparaissait comme une question tellement importante qu'elle faisait écrire à Thomas que l'acier deviendrait un produit secondaire. Atteint de tuberculose, Thomas voyagea à travers le monde entier ; il vint habiter Paris, y mourut le 1<sup>er</sup> février 1885, âgé de trente-cinq ans, et fut enterré dans le joli cimetière de Passy où se trouve encore sa tombe. On y lit cette phrase lapidaire :

Il livra un bon combat.

Le procédé Thomas engendra d'ailleurs le procédé Martin basique ; ce furent deux ingénieurs français, MM. Pourcel et Valrand, qui, dès 1879, firent les essais l'un à Terrenoire, l'autre au Creusot. Ceci n'est pas assez su et ce fut vers 1887 seulement que le procédé de déphosphoration sur sole fit son apparition en Angleterre.

Les progrès du procédé Thomas consistent surtout dans des questions de dimensions d'appareils, de dispositions d'ateliers et aussi quelques modifications même dans le processus. Actuellement les convertisseurs de 15 à 25 tonnes sont d'utilisation courante.

Bien entendu, la capacité de la cornue est bien supérieure au volume du métal traité, environ dix fois le volume de la fonte. Le garnissage est fait, répétons-le, en dolomie frittée, additionnée d'un peu de goudron.

Les halls de convertissage, depuis fort longtemps, comportent une ligne de convertisseurs (autrefois ceux-ci étaient placés sur un arc de cercle pour desservir par une poche tournante



les lingotières placées elles-mêmes sur une circonférence); le hall a plusieurs étages, la fonte liquide arrive du mélangeur à la plate-forme supérieure, à moins qu'elle ne soit apportée par poche et pont roulant; à mi-hauteur se trouve la plate-forme qui supporte les tourillons; en bas l'aire de coulée; celle-ci se fait par poche entraînée par pont roulant, les lingotières étant en ligne.

Le procédé Thomas est, du moins sur le continent, le gros producteur de profilés et de rails.

Les autres procédés. — Il ne nous semble nécessaire que de signaler ici quelques procédés, développement ou accouplement de ceux que nous venons d'étudier.

*Procédé Talbot* qui agit sur de grandes masses, en vaste four Martin, d'au moins 100 tonnes. On a soin de conserver du métal dans le four à chaque coulée, constituant ainsi un important volant de chaleur qui contribue singulièrement à la rapidité des opérations. Généralement on coule 30 p. 100 de la charge. Mais la nécessité d'un outillage considérable, entraînant des frais d'entretien élevés, la difficulté dans le changement de nuance du métal ont empêché la vulgarisation du procédé.

*Procédé Duplex*, qui utilise un convertisseur acide, qui commence l'affinage et envoie son métal dans un four Martin basique qui l'achève et qui donne ainsi une échelle plus grande dans le choix de matières premières.

*Procédé Bertrand Thiel*, qui emploie deux fours Martin, le premier commençant l'affinage de la fonte, le second achevant la mise au point

de l'acier venant du premier four, cela notamment au point de vue phosphore.

**Les procédés du four électrique.** — On peut bien dire que ces procédés, essentiellement modernes puisqu'ils ont vu le jour vers 1900, sont nés en France, à l'exception de l'un d'eux qui n'est pas le plus important, celui qui utilise le four à induction. Les noms de Héroult, Chaplet, Girod, Keller, notamment, resteront attachés à l'établissement des appareils et aussi des méthodes.

Ayant pour principale application la fabrication de l'acier, le four électrique est cependant utilisé, dans certaines régions où le prix du courant, la situation et la nature du minerai sont convenables, pour la préparation de la fonte.

Trois principaux principes ont été appliqués dans le four électrique à acier : le phénomène de résistance opposée par le métal au passage du courant, qui n'est plus employé seul ; le phénomène d'induction auquel est soumis le métal placé dans un canal circulaire, entouré des bobines voulues ; l'arc électrique, simple ou multiple, éclatant dans le four à électrodes.

Ce sont ces derniers appareils qui sont les plus couramment utilisés ; soit que le courant entre et sorte par les électrodes (four Héroult, fig. 8 et 9), soit que, passant par une électrode, il poursuive son chemin à travers le métal pour gagner la sole partiellement ou totalement conductrice (four Chaplet, fig. 10 à 12).

Du point de vue industriel, quels sont donc les avantages présentés par le four électrique ? Employé pour la fusion directe des déchets et « ferrailles », le four électrique se prête admi-



ablement à l'utilisation de ces matières, sans

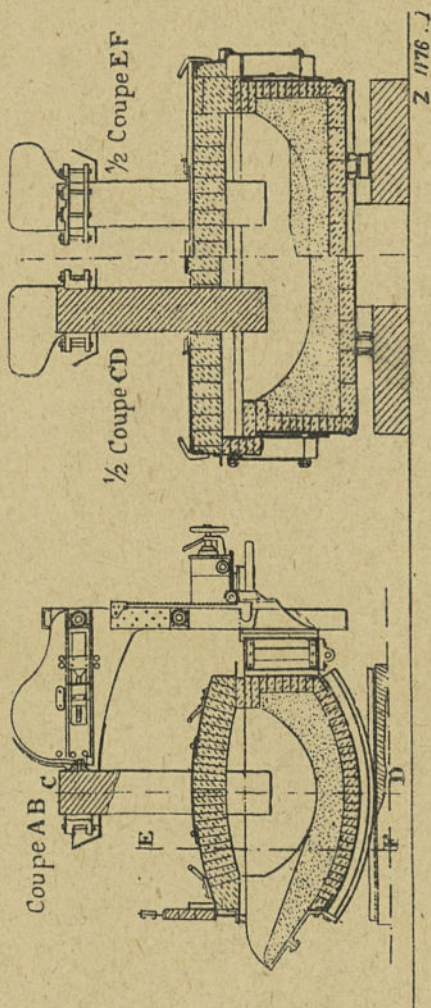


Fig. 8 et 9. — Four électrique Héroult (Coupe).

aucune préparation, sans aucun rassemblement

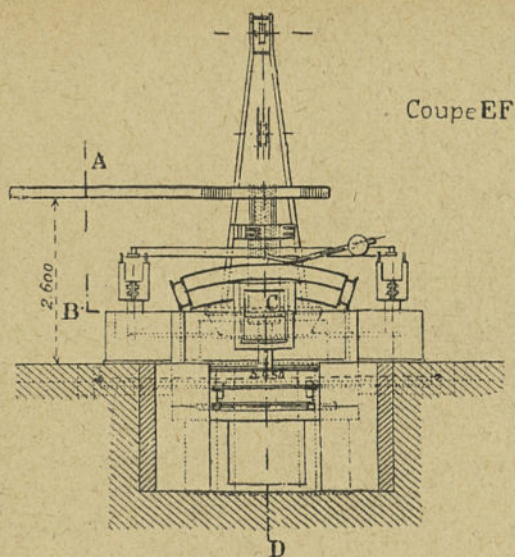


Fig. 10. — Four électrique Chaplet (Coupe).

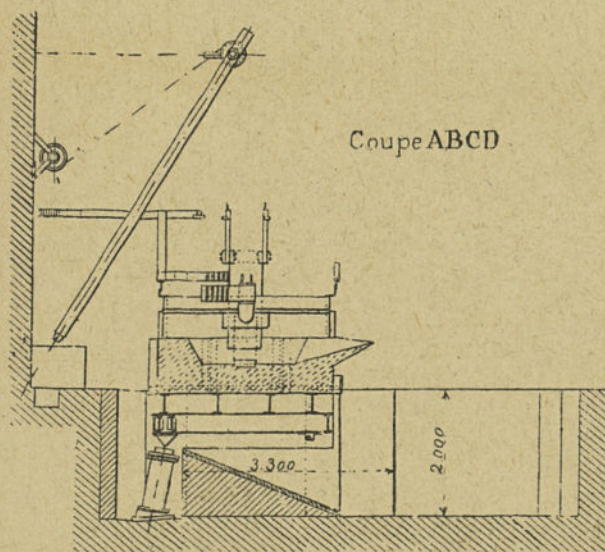


Fig. 11. — Four électrique Chaplet (Coupe en travers).



## L'ÉVOLUTION DE LA MÉTALLURGIE

préalable; il permet, en outre, — et c'est le point capital, — non seulement une excellente déphosphoration, mais aussi une remarquable désulfuration, par l'emploi de laitier extra-cal-

Plan

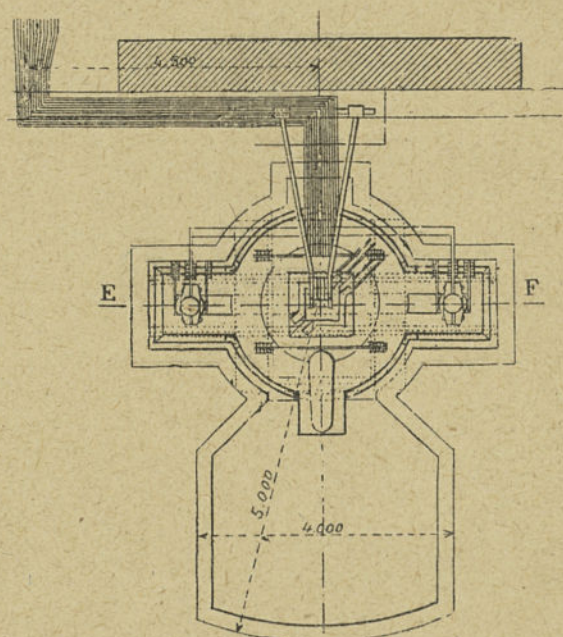


Fig. 12. — Four électrique Chaplet (Plan).

caire, ne fondant pas dans les autres appareils; d'ailleurs le four électrique basculant, qui s'est généralisé, permet — on le conçoit aisément — l'emploi successif de laitiers différents qui conduisent à un affinage très prononcé; on admet actuellement que la différence est bien faible

entre l'acier au creuset et l'acier électrique, si celui-ci est fabriqué convenablement. Enfin le four électrique permet, tant au point de vue du carbone que des autres éléments, même les moins fusibles, une mise au point et une homogénéité de composition fort remarquables. On sait d'ailleurs que le four électrique a permis, durant la guerre, la préparation de la fonte synthétique, en partant de ferrailles. Rien ne peut mieux prouver l'importance de la gamme des produits qu'il permet de fabriquer.

Utilisé pour le superaffinage de l'acier, le four électrique prend au convertisseur ou au four Martin un métal liquide dont le traitement n'est pas encore achevé et, en un temps relativement court, avec une dépense supplémentaire peu élevée, il le transforme en acier demi-fin ou fin, opérant notamment une désulfuration très poussée, une mise au point précise.

Il ne faut donc pas concevoir le four électrique comme un appareil alimenté simplement par les chutes d'eau ; il devient l'heureux adjoint des fours sidérurgiques courants, l'énergie électrique étant fournie par les gaz résiduels des fours à coke ou des hauts fourneaux.

Dans l'évolution et le développement si rapide du four électrique, il faut signaler la grandeur des appareils ; on atteint à l'heure actuelle de façon courante les fours de 10 tonnes, on signale quelques fours de 15 tonnes ; l'utilisation générale des fours à sole basique et aussi de quelques fours à sole acide qui permettent une meilleure désoxydation ; l'emploi remarquablement intéressant de l'électrode continue, qui diminue singulièrement le prix de revient, l'électrode étant



L'ÉVOLUTION DE LA MÉTALLURGIE

préparée et cuite sur le four même, pendant l'opération.

Situation actuelle des différents procédés. — Voici quelques chiffres qui fixeront sur la production mondiale des aciers et sur l'importance relative des différents procédés ; ils ont trait et à l'année 1913 — dernière année normale avant guerre — et à l'année 1925. Il s'agit de millions de tonnes :

| PAYS                       | 1913        |              | 1925               |              |
|----------------------------|-------------|--------------|--------------------|--------------|
|                            | Production. | Pourcentage. | Production.        | Pourcentage. |
| Etats-Unis . . . . .       | 31.802      | 42,4         | 45.200             | 50,9         |
| Allemagne . . . . .        | 17.361      | 23,1         | 12.500             | 14,0         |
| Grande-Bretagne . . . . .  | 7.500       | 10,1         | 7.500              | 8,4          |
| France . . . . .           | 5.093       | 6,8          | 7.300              | 8,4          |
| Russie . . . . .           | 4.018       | 6,5          | 1.870              | 2,1          |
| Belgique . . . . .         | 2.612       | 3,6          | 2.450              | 2,7          |
| Autriche-Hongrie . . . . . | 2.683       | 3,6          | 1.476 <sup>1</sup> | 1,0          |
| Divers . . . . .           | 2.870       | 3,9          | 10.468             | 13,9         |

|                            | 1913      | 1925      |
|----------------------------|-----------|-----------|
| Acier Martin . . . . .     | 1.582.478 | 2.103.469 |
| Acier Thomas . . . . .     | 2.806.475 | 5.175.815 |
| Acier Bessemer . . . . .   | 252.704   | 78.903    |
| Acier électrique . . . . . | 21.124    | 75.433    |
| Acier au creuset . . . . . | 24.085    | 12.843    |

1. Tchécoslovaquie.

## CHAPITRE II

### L'ÉVOLUTION DES MÉTHODES DANS LES MÉTALLURGIES AUTRES QUE CELLES DU FER

L'évolution de la métallurgie de cuivre. — *Les méthodes en 1850.* — La métallurgie du cuivre était alors basée sur trois méthodes, deux utilisant la voie sèche, c'est-à-dire des réactions se passant à température élevée, la troisième employant la voie humide, c'est-à-dire des opérations de dissolution et de précipitation.

La *méthode allemande* consistait essentiellement dans un grillage de minerai, le sulfure, pour le transformer en oxyde, puis dans la réduction de cet oxyde par le carbone.

La caractéristique de cette méthode se trouve principalement dans l'emploi de fours à cuve ; le combustible utilisé est le coke ou le charbon de bois. Avant le grillage à mort, le sulfure de cuivre est concentré comme il sera dit plus loin. Le produit de l'opération était un cuivre noir, contenant environ 88 à 95 p. 100 de cuivre, le reste étant du fer.

Il subsiste bien peu de choses de la méthode allemande : cependant elle est encore utilisée dans le Harz ; elle y produit d'ailleurs de faibles quantités de cuivre.



Toutefois, il faut bien noter que les minerais oxydés sont réduits au four à cuve, à moins qu'ils ne puissent être ajoutés à un lit de fusion à base de sulfures.

La *méthode anglaise* était basée sur un tout autre principe, celui de la *matte*. On donne ce nom à des sulfures complexes de cuivre et de fer, que l'on peut représenter d'une façon générale par la formule :  $\text{Cu}^2\text{S}, n\text{FeS}$ .

Cette formule montre que les proportions de cuivre et de fer peuvent être singulièrement variables et que l'on peut, pour  $n = 0$ , atteindre  $\text{Cu}^2\text{S}$  pur. D'ailleurs on note que la *matte* contient le cuivre à l'état de  $\text{Cu}^2\text{S}$  ; elle est formée, en effet, à température élevée et, dans ces conditions,  $\text{CuS}$  est décomposé.

Partant d'un minerai sulfuré, la méthode anglaise, principalement pratiquée à Swansea, procédait de la façon suivante :

Un grillage oxydant partiel suivi d'une fusion permet d'obtenir une concentration du cuivre dans une quantité moindre de matière. En effet si l'on soumet un mélange de sulfure de fer et de sulfure de cuivre à l'action de l'oxygène de l'air, cela à température convenable, on peut transformer le sulfure de fer en oxyde, avant d'atteindre le sulfure de cuivre. En fondant en présence de silice le produit d'un tel grillage, on fait passer le fer dans la scorie et la *matte* restant s'enrichit en cuivre. On procède par opérations successives, la *matte* atteignant facilement une teneur de 70 à 75 p. 100 Cu.

La méthode anglaise est caractérisée par l'emploi du four à réverbère. Elle ne joue plus qu'un rôle insignifiant dans la production mondiale du cuivre.

Les méthodes de voie humide sont très diverses; elles jouissent encore, dans des cas particuliers — minerais du Rio-Tinto, certains minerais allemands — d'une certaine vogue. Elle utilise, bien entendu, des minerais plus variés, oxydes, carbonates, sulfures. On peut indiquer ici deux principes importants relatifs à la première partie de ces procédés qui consiste à opérer la mise en solution du cuivre :

A cet effet, on peut tout d'abord utiliser un acide, tel que l'acide chlorhydrique. C'est ainsi que l'on opère à Marberg (Westphalie). On obtient alors une solution de chlorure.

D'un autre côté, on peut aussi par un grillage convenablement conduit transformer les sulfures en sulfates; le procédé ne s'applique pas alors aux oxydes. C'est ce qui a lieu au Rio-Tinto, où le minerai est traité en tas importants; le même principe est appliqué aux Etats-Unis pour des minerais à très faible teneur en sulfure de cuivre; mais là on opère le grillage sulfatant dans des fours mécaniques très puissants; on arrive à extraire ainsi 98 p. 100 du cuivre contenu dans la matière première.

C'est aussi ce principe qui est appliqué dans une très curieuse méthode, qui n'est employée qu'en Allemagne, à Mansfeld, et cela depuis 1841. Le minerai renferme du sulfure d'argent, du sulfure de cuivre et du sulfure de fer notamment. Un grillage bien conduit comme température permet de transformer successivement le sulfure de fer, puis le sulfure de cuivre et enfin le sulfure d'argent en sulfates. Bien entendu, lorsque le cuivre a été mis en solution, il faut opérer la précipitation. Cela se



fait soit par l'intermédiaire du fer, soit par électrolyse.

La précipitation par le fer conduit à un cuivre impur et en grande partie sous forme impalpable. Il faut ou bien le refondre ou bien l'oxyder pour le transformer ensuite, par action de l'acide sulfurique, en sulfate, produit commercial très important.

Cette méthode a toutefois été perfectionnée, par l'emploi des éponges de fer, obtenues par réduction à basse température de minerais très purs.

La précipitation par électrolyse introduite assez récemment dans la métallurgie même — et non dans l'affinage où elle est connue depuis longtemps — donne du métal très pur.

Disons de suite que ces méthodes se sont singulièrement perfectionnées aux Etats-Unis, comme il sera dit plus loin.

Quant à l'affinage, il était basé sur une fusion oxydante produisant l'oxydation des principales impuretés : fer, zinc, plomb, arsenic, etc. L'opération se passait généralement au réverbère.

**Les méthodes modernes.** — Bien peu de choses, nous l'avons dit, subsistent encore des deux méthodes par voie sèche que nous venons de rappeler. — Actuellement la métallurgie de cuivre est dominée par deux méthodes :

L'une de voie sèche, la conversion de la matte en cuivre ;

L'autre mixte, consistant dans un grillage avec dissolution et précipitation.

La *conversion de la matte* en cuivre est une méthode complexe qui, du point de vue appa-

reillage et même principe, a subi des perfectionnements très importants que nous tâcherons de faire ressortir après avoir rappelé le principe.

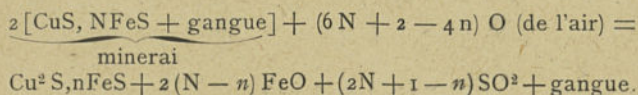
Avant tout, il faut préparer une matte convenable.

A cet effet, on opère un grillage suivi de fusion scorifiante :

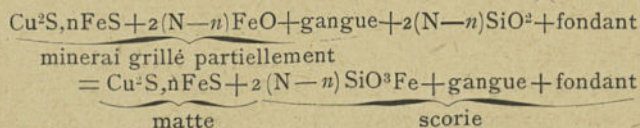
On part, en somme, d'un minerai ; écrivons-le [CuS, NFeS + gangue].

On veut obtenir une matte :  $\text{Cu}^2\text{S}$ ,  $n\text{FeS}$  ; pour laquelle  $n < N$  ; en un mot on va concentrer tout le cuivre du minerai — et aussi les métaux précieux or et argent — dans cette matte ; il faut donc enlever du fer et séparer la gangue. Le fer étant plus oxydable que le cuivre, on fera un grillage qui transformera une partie de FeS en FeO. Puis, soumettant cette matière à une fusion scorifiante, c'est-à-dire à une fusion faite avec addition de produits susceptibles de transformer la gangue en une scorie fusible dans laquelle passera d'ailleurs l'oxyde de fer FeO, on séparera la matte. Ces opérations peuvent être approximativement représentées par les équations suivantes :

a) Grillage partiel :



b) Fusion pour matte :





## L'ÉVOLUTION DE LA MÉTALLURGIE

Le grillage s'opère maintenant en four mécanique qui déplace la matière, la soumettant ainsi à l'action oxydante de l'air (fig. 13 et 14). Sou-

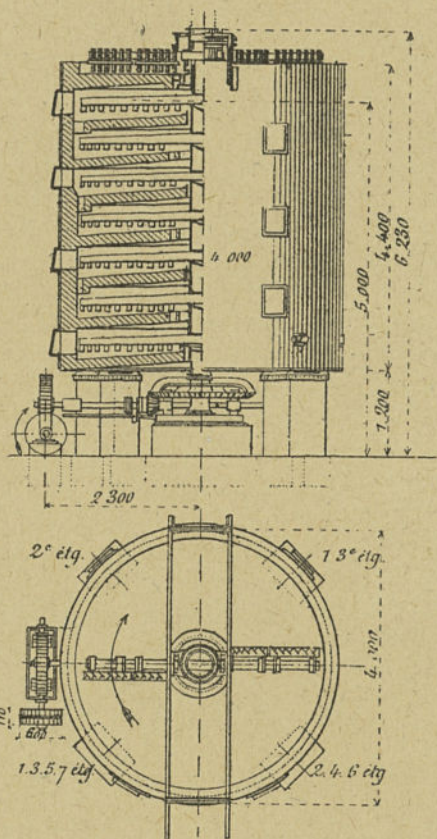


Fig. 13 et 14. — Four de grillage Heuschof.

vent ces fours sont à tablettes placées les unes au-dessous des autres, les râbles mécaniques étant fixés à un axe qui passe au centre du four cylindri-

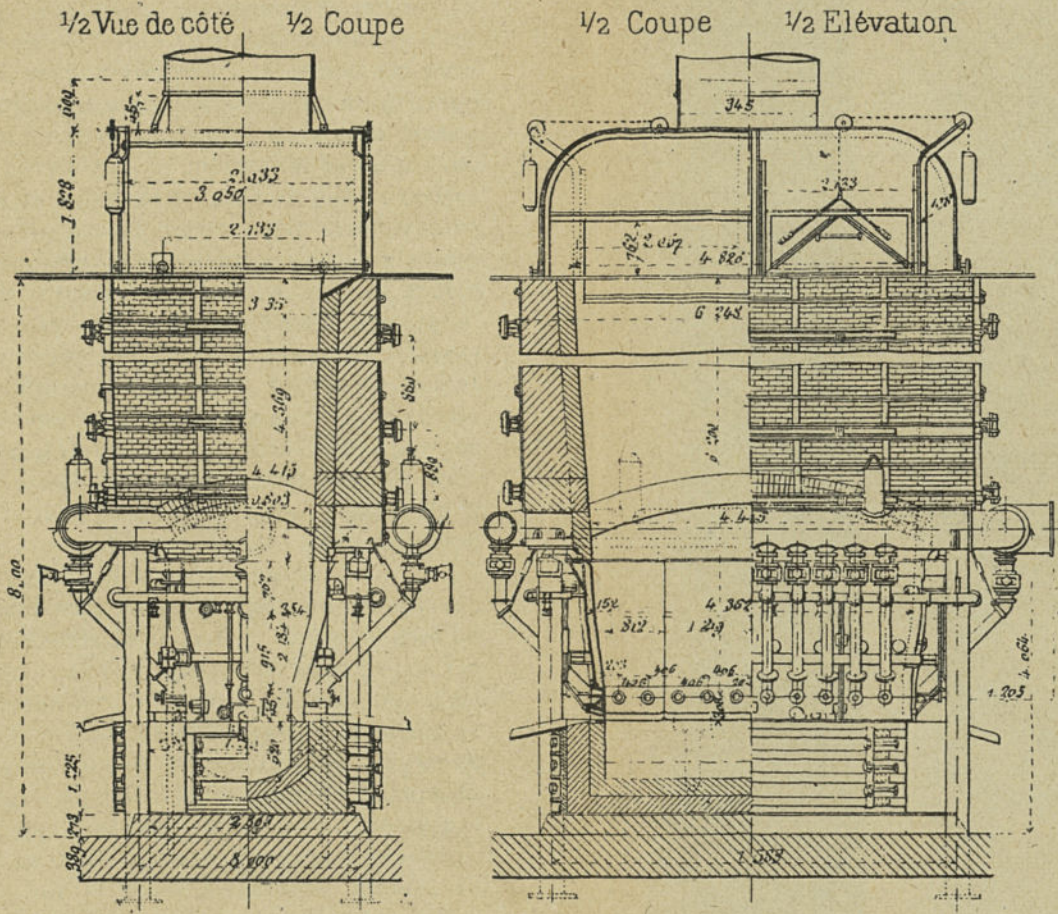


Fig. 15 et 16. — Four Water-jacket.





que et agissant sur chaque sole. Parfois aussi ces fours sont constitués par une grande sole, sur laquelle tournent des râteaux qui se passent la matière, l'obligeant à se rendre d'une extrémité à l'autre. En général pour les minerais de cuivre, la teneur en soufre est telle qu'aucun chauffage n'est nécessaire, il suffit d'amorcer la réaction. On aura une idée de ces grandes installations de grillage utilisant des fours mécaniques, lorsqu'on notera que ceux-ci ont jusqu'à 10 mètres de hauteur avec un diamètre de 6 mètres et que l'on peut y traiter jusqu'à 100 tonnes de pyrites par vingt-quatre heures (notamment avec injection d'air comprimé sur les soles inférieures). La fusion pour matte proprement dite, utilise de très vastes appareils. Jusqu'à ces toute dernières années, le *Water-Jacket* dominait cette opération. Le *Water-Jacket* (fig. 15 et 16) est un four à cuve généralement de section rectangulaire, qui est caractérisé par ses parois constituées en grande partie par des caissons métalliques, avec circulation d'eau. On y charge donc les matières à fondre avec du coke. Le vent est soufflé à la partie basse.

Ces *jackets* sont en acier doux ou en cuivre ; l'eau arrive, froide, à la partie basse de chaque caisson et sort, chaude, à la partie supérieure. On peut se demander pourquoi un tel four s'est imposé dans certaines métallurgies ; la raison se trouve dans une durée beaucoup plus longue de l'appareillage ; on évite complètement l'usure du revêtement par réaction chimique et même par frottement ; en effet, au bout de très peu de temps, il se forme, sur la paroi métallique même, un véritable « colmatage » des matières fondues et les produits descendent non plus contre le water-



jacket, mais sur cette paroi artificielle. — Il faut évidemment que la température du four ne puisse faire craindre la fusion fréquente du métal constituant le caisson. Comme nous le verrons, la métallurgie du cuivre n'est pas la seule à utiliser ce curieux système de fours; celles du plomb, du nickel l'emploient aussi couramment.

Ajoutons que ces appareils ont souvent des dimensions formidables, ceux de l'Anaconda ayant des sections de  $15^m,30 \times 1^m,40$  et  $25^m,10 \times 1^m,40$ , traitant 1.500 et 2.500 tonnes de minerai par vingt-quatre heures et donnant 250 tonnes de mattes.

Actuellement le water-jacket est singulièrement contre-battu par le four à réverbère (fig. 17 et 18). Celui-ci se vulgarise de plus en plus, pour différentes raisons: il permet de traiter les minerais en poussière, sans aucune agglomération préalable, ce que ne peut faire le water-jacket qui est un four soufflé; il n'exige pas le coke comme combustible; il peut même, grâce au charbon pulvérisé, utiliser des combustibles de faible valeur; son chargement est aisé, par déversement des matériaux dans de vastes silos situés au-dessus des fours, et enfin on peut récupérer par des chaudières les chaleurs perdues. Actuellement ces fours atteignent très bien 40 mètres de longueur sur 6 mètres de largeur et traitent 300 tonnes de minerai par vingt-quatre heures. La matte étant préparée, il faut maintenant et immédiatement la convertir en cuivre brut. A cet effet la matte est déversée liquide dans le convertisseur.

Il est peut-être logique d'indiquer ici comment est née cette méthode. Au lendemain de la découverte du procédé Thomas, en 1878, on s'est préoccupé en Angleterre d'appliquer le même pro-

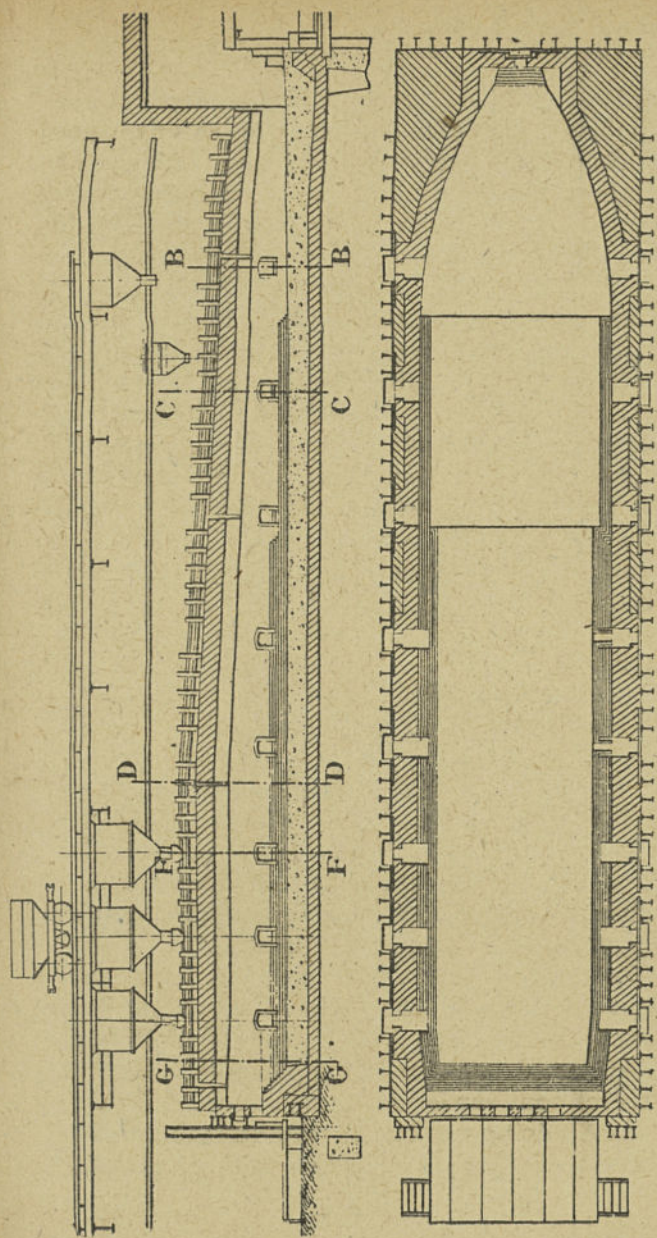


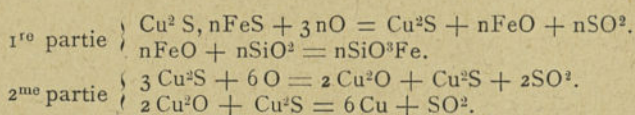
Fig. 17 et 18. — Four à réverbère pour traitement de minéral de cuivre.



cédé en vue d'enlever au cuivre l'arsenic et l'antimoine susceptibles de former des sels fixes avec la chaux. — L'opération ne parut pas intéressante. Mais en 1880 elle fut reprise, à un autre point de vue, dans une petite usine française à Éguilles, près Avignon, et l'on doit noter que c'est là, sous l'influence de deux ingénieurs français, David et Manhès, que fut établie la méthode qui domine la métallurgie du cuivre dans le monde entier.

La matte, introduite liquide dans le convertisseur, y est soumise à l'action de l'air sous pression. Le fer s'oxyde le premier et, la paroi du convertisseur étant siliceuse, forme une scorie. — Le fer étant ainsi éliminé, le cuivre commence à s'oxyder ; l'oxyde formé réagit sur le sulfure restant et, tout comme dans le procédé anglais, donne du cuivre brut.

Cette opération peut se résumer dans les réactions suivantes :



On notera de suite que la silice permettant au fer de se scorifier est prise à la paroi même du convertisseur et que, de ce fait, celui-ci doit être soumis à des réparations fréquentes.

Le type courant de ces convertisseurs acides rappelle la constitution d'un convertisseur Bessemer : paroi métallique avec garnissage réfractaire en silice agglomérée par de l'argile. Mais ici les tuyères sont sur le côté et non au fond de l'appareil, afin de ne pas oxyder le métal même. D'ailleurs il y a des convertisseurs de type vertical, et

d'autres constitués par un cylindre horizontal, ce qui permet par simple rotation de faire varier la hauteur d'arrivée d'air dans le bain.

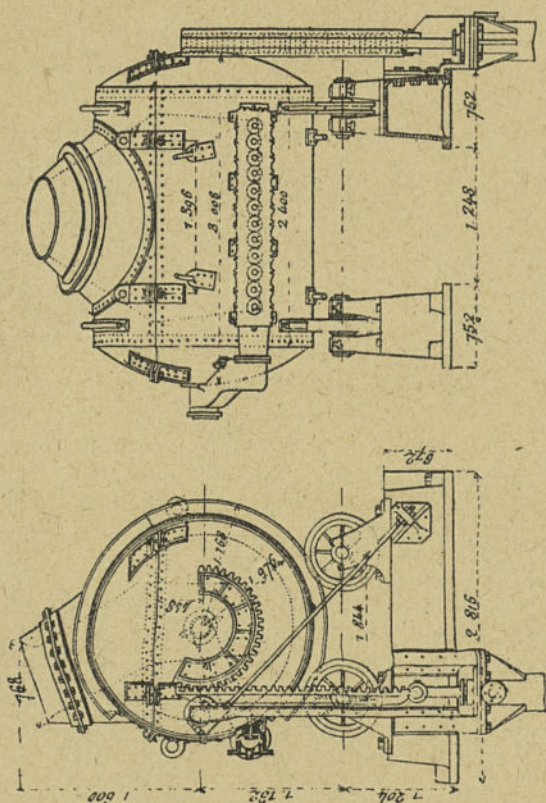


Fig. 19 et 20. — Convertisseur basique de la métallurgie du cuivre.

Mais cette opération ne se pratique plus ainsi, et c'est vraiment l'un des grands progrès de la métallurgie du cuivre que l'emploi du *convertisseur basique* (fig. 19 et 20); à tous points de vue, cette évolution mérite quelques minutes d'atten-



tion. Donc ici la paroi sera constituée de briques en magnésie. Mais, première difficulté, sous l'influence de l'élévation de température, la magnésie se gonfle, la paroi tend à se disloquer ; pour éviter cela on intercale, de temps en temps, entre les briques, des planchettes de bois qui, se carbonisant, donnent une certaine élasticité à l'ensemble du revêtement. La paroi étant ainsi constituée, la matte liquide est toujours soumise à l'action de l'air sous pression ; le fer oxydé doit être scorifié. A cet effet, on ajoute, dans le convertisseur, de la silice qui s'empare de l'oxyde formé. Mais alors, nouvelle difficulté, très curieusement vaincue, d'ailleurs : la silice se portera aussi sur la paroi magnésienne pour la détruire. Il faut donc protéger celle-ci : à cet effet, à la première charge de matte, on pousse le soufflage ; il se forme, non plus  $\text{FeO}$ , mais bien  $\text{Fe}^3\text{O}^4$  ; on balance le convertisseur, de telle sorte que cet oxyde, peu fusible, se dépose sur les parois, y formant un véritable vernis protecteur qui empêchera la silice de se combiner à la magnésie. Les convertisseurs basiques peuvent affecter différentes formes, cylindre à axe horizontal, cornue à axe vertical : quant au soufflage, il se fait sur le côté par une boîte à vent.

La dolomie, utilisée dans le procédé Thomas, ne donne pas ici un garnissage qui ait une durée suffisante.

Le cuivre du convertisseur est très impur ; il renferme du fer, de l'arsenic, de l'antimoine et aussi tous les métaux précieux du minerai initial. C'est la matière première de l'affinage par électrolyse, merveilleux progrès sorti du laboratoire et conduisant à un métal extrêmement pur, correspondant à 99,9 p. 100 de Cu. D'autre part,

cette intéressante opération, dans laquelle le cuivre impur provenant du convertisseur forme l'anode, tandis qu'une mince feuille de cuivre pur constitue la cathode où se forme le dépôt, l'électrolyte étant une solution étendue de sulfate de cuivre légèrement acidulée, cette méthode a le très gros avantage de permettre la séparation des métaux précieux qui se rassemblent sous forme de boue au fond du bac d'électrolyse.

Lorsqu'on considère dans son ensemble cette évolution de la métallurgie du cuivre, on est frappé par l'importance de l'appareillage, la précision des méthodes et l'intérêt que présente, de par sa pureté, le métal final. Cependant on conçoit que le point de départ, la préparation de la matte, soit d'autant plus aisé que le minerai est plus riche et l'on ne saurait s'étonner de l'importance prise par l'autre méthode moderne qui tient de la voie humide. — Rendre soluble dans l'eau le sulfure de cuivre est chose aisée par une transformation en sulfate, c'est-à-dire un grillage oxydant à température relativement peu élevée; mais l'opération industrielle, s'adressant à des minerais à faible teneur en cuivre, ne peut être réalisée que grâce à l'emploi des grands fours mécaniques dont nous avons déjà parlé. — Quant à la suite de l'opération, elle s'entrevoit tout naturellement: la mise en solution dans l'eau acidulée qui sépare la gangue et donne une liqueur qui sera soumise à l'électrolyse; bien entendu, dans cette précipitation, il ne s'agit plus de transporter du cuivre de l'anode à la cathode, mais bien de déposer le cuivre en solution; ceci entraîne l'emploi d'anodes insolubles, platine, charbon, etc..., qui agissent comme simples conducteurs.



Ajoutons quelques mots sur la situation mondiale économique de la métallurgie du cuivre, en donnant les productions en 1913 et 1925 (en tonnes).

|                              | 1913      | 1925      |
|------------------------------|-----------|-----------|
| Production mondiale. . . . . | 1.002.300 | 1.434.716 |
| Etats-Unis . . . . .         | 557.400   | 774.749   |
| Japon. . . . .               | 73.200    | 65.692    |
| Espagne et Portugal. . . . . | 54.700    | 58.000    |
| Mexique . . . . .            | 52.800    | 53.636    |
| Australasie . . . . .        | 47.300    | 12.318    |
| Chili . . . . .              | 40.200    | 189.103   |
| Canada . . . . .             | 34.900    | 51.020    |
| Russie . . . . .             | 33.900    | 6.578     |
| Pérou. . . . .               | 25.700    | 37.358    |
| Allemagne . . . . .          | 25.300    | 22.000    |
| Afrique. . . . .             | 22.000    | 107.657   |

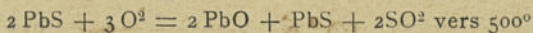
La production française est de l'ordre de 12.000 tonnes.

**L'Évolution de la métallurgie du plomb.** — *Les méthodes en 1850.* — Le seul minerai important de plomb est la galène, sulfure de plomb. Pour en extraire le plomb, deux méthodes se présentent; toutes deux ont été utilisées; la première seule est généralement employée.

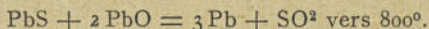
Dans celle-ci, la galène est grillée *à mort*; c'est dire que le sulfure est transformé aussi intégralement que possible en oxyde. Puis on opère une fusion réductrice; c'est dire que traité en four à cuve, par le coke, le minerai grillé donne le métal, tandis que la gangue fond, grâce aux additions voulues. Notons de suite que l'on obtient ainsi le plomb d'œuvre, c'est-à-dire un plomb assez impur, renfermant — ce point est capital — tous les métaux précieux du lit de fusion. Dans

l'autre méthode, qui utilise le four à réverbère, le sulfure est soumis à un grillage oxydant partiel, qui transforme une certaine proportion de sulfure en oxyde ; puis la température étant nettement augmentée, l'oxyde réagit sur le sulfure pour donner le métal.

En un mot, on a :



puis :



Notons que cette méthode, grillage et réaction, qui a été utilisée principalement dans la province de Murcie, nécessite un minerai très pur, contenant peu de silice, sans quoi l'oxyde de plomb formé au début passe à l'état de silicate.

Cependant elle n'est pas abandonnée et notamment à Herculanum (États-Unis) elle a pris récemment une vigueur nouvelle grâce à l'emploi de fours mécaniques dont les râbles assurent le contact entre le sulfure et l'oxyde, et augmentent par conséquent le rendement. On y traite du minerai renfermant au moins 65 p. 100 de plomb.

La seule méthode importante est la première : grillage et réduction. Voyons donc son évolution.

**La méthode moderne.** — Le premier progrès, qui date d'une trentaine d'années, a eu pour but de perfectionner l'opération du grillage, de façon que tout le sulfure soit bien transformé en oxyde. Ceci est un point capital. En effet, dans le grillage il se forme, en même temps que l'oxyde, du sulfate et il peut rester du sulfure.



Au four à cuve, le sulfate donnera du sulfure, celui-ci ne sera pas transformé en métal ; donc pure perte de charbon tant au point de vue chauffage qu'au point de vue réduction du sulfate. On a donc abandonné les vieux fours réverbère à portes multiples où s'opérait le grillage par des « ringardages » pénibles. On procède en deux temps : l'un abaissant la teneur en soufre dans une forte proportion ; cette opération se passe en four réverbère mécanique, avec foyer, car le chauffage est indispensable ; l'autre faisant disparaître la dernière quantité de soufre, du moins jusqu'aux environs de 2 p. 100 ; cette phase se passe dans des appareils très spéciaux, tout à fait automatiques tels que la chaîne Dwight et Lloyd (fig. 21 et 22) formée de petits wagonnets avec grille se déplaçant de façon continue ; les matières s'enflamment à l'endroit où se trouve un chalumeau ou un foyer, passant au-dessus d'une boîte d'aspiration et continuant leur course, en formant une chaîne sans fin et déversant leur contenu dans des wagons. Un point très important est le suivant : le grillage moderne n'a pas seulement pour but de produire la transformation aussi intégrale que possible du sulfure en oxyde, mais aussi d'agglomérer la matière toujours pulvérulente. Le produit du grillage est un véritable gâteau, spongieux, se prêtant donc admirablement à la réduction et d'une dureté suffisante pour pouvoir résister à la pression de la charge et au vent dans le four à cuve. C'est là en somme le gros, le très gros progrès de la métallurgie du plomb. Ajoutons que, dans la réduction même, les appareils ont singulièrement évolué : aux fours à cuve à muraillements épais, dont on trouve encore quelques exemples

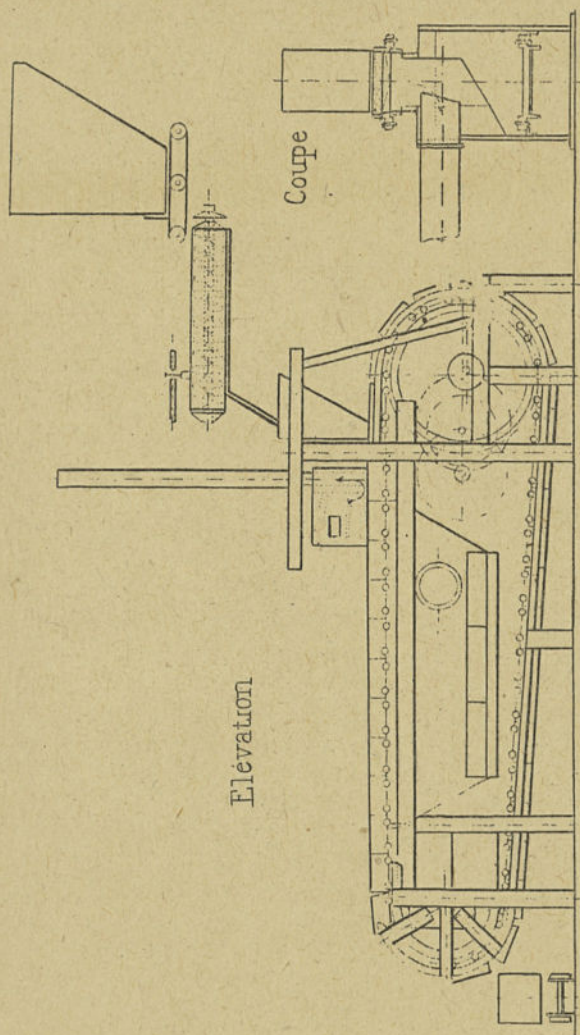


Fig. 21 et 22 — Chaîne Dwight et Lloyd pour grillage.

dans le Harz, se sont substitués les water-jackets qui ressemblent singulièrement à ceux de la



métallurgie du cuivre, mais dont la méthode de coulée est toute différente : le plomb est soutiré, en effet, par un siphon partant du fond du four et aboutissant à un bassin où s'accumule le plomb. On l'y puise à la cuiller pour remplir des lingotières placées généralement sur un manège qui tourne sous la moindre poussée.

Le gros souci du fondeur de plomb est de ne point livrer du métal qui contienne de l'argent et de l'or, si répandus dans la galène ; il faut donc traiter le plomb d'œuvre pour extraire les métaux précieux. Durant de nombreuses années, deux procédés permettaient d'atteindre le but visé : le premier en date (1833), le pattinsonnage ; le second (1842), la « parkérisation » utilisant le zinc ; ce second s'est largement développé et le premier est presque complètement disparu ; mais un troisième procédé, basé sur l'électrolyse, gagne chaque jour du terrain.

Le premier procédé est exclusivement basé sur la liquation : lorsqu'on fond du plomb argentifère et qu'on le laisse refroidir, entre certaines températures, une partie de l'alliage est liquide, une autre solide ; cette dernière n'est composée que de plomb pur ; si donc, on opère à bonne température, on peut retirer un liquide enrichi en argent et en agissant ainsi, à plusieurs reprises, on obtiendra un plomb argentifère à teneur relativement élevée en métaux précieux — sans pouvoir dépasser une certaine limite<sup>1</sup>. Cet alliage est ensuite soumis à la *coupellation*. Cette opé-

1. En théorie, cette limite correspond au point eutectique du diagramme Pb-Ag. En pratique, on ne peut guère dépasser 25 grammes au kilogramme de plomb.

ration est ainsi dénommée parce qu'elle se passe dans un four réverbère dont la sole a la forme d'une coupelle et est constituée de matériaux spéciaux, marne, ciment, cendres d'os ; la coupellation, quel que soit le four, est essentiellement une fusion oxydante, dans laquelle le plomb est oxydé, tandis que l'argent demeure intact. Sans entrer dans le détail des deux méthodes, disons que l'une, la méthode allemande très peu utilisée, emploie un four à voûte mobile qui est chargé au début de chaque opération ; l'autre, la méthode anglaise, est caractérisée par un four de faible capacité, à sole mobile, où l'on *file* le plomb à traiter durant toute l'opération jusqu'à ce que la coupelle soit remplie d'argent, tandis que la litharge s'écoule ; ajoutons que l'argent produit de l'opération, est traité par électrolyse, tandis que l'oxyde est lui-même réduit dans un nouveau four ou mis directement sur le marché, s'il n'a pas entraîné d'argent. — Cette méthode demandant une main-d'œuvre très spéciale n'est plus employée, croyons-nous, en tant que liquation, qu'en Allemagne, dans quelques usines, et encore nous ne les avons pas visitées depuis 1913. Elle s'imposait pour traiter les plombs contenant du bismuth qui ne peut être séparé dans la seconde méthode. Mais l'électrolyse a mis bon ordre à cet inconvénient.

La *parkérisation* est basée sur un tout autre principe : si, à un bain de plomb d'œuvre, porté à une température de  $500^{\circ}$ , donc supérieure au point de fusion du zinc ( $420^{\circ}$ ), et qu'on laisse refroidir aux environs de  $350^{\circ}$ , on recueille des cristaux d'un alliage ternaire : plomb-argent-zinc qui, si les additions de zinc ont été bien faites, peuvent con-



tenir tout l'argent du bain. L'alliage ternaire est alors soumis à une distillation vers 950°, qui chasse le zinc, recueilli d'ailleurs dans un condenseur et enfin le plomb argentifère est « coupellé ».

Répétons que cette méthode beaucoup moins coûteuse, beaucoup plus rapide, beaucoup plus simple, a gouverné toute la question de désargen-tation jusqu'à l'apparition de l'électrolyse. Celle-ci est relativement récente, date des environs de 1900. Son principe est identique à celui déjà indiqué en métallurgie du cuivre : le plomb d'œuvre formant cathodes, le plomb pur se déposant aux anodes, les métaux précieux se déposant au fond des cuves avec d'autres impuretés, notamment le bismuth et l'antimoine. Si l'électrolyse du plomb est plus récente que celle du cuivre, cela est dû uniquement aux difficultés que l'on a rencontrées dans la mise au point d'un électrolyte ne donnant pas de plomb spongieux, pulvéru-lent. Actuellement on utilise une solution d'hydrofluosilicate de plomb, additionné de petites quantités d'un colloïde, comme la gélatine. Il faut bien remarquer que là encore le but n'est pas seulement l'obtention d'un plomb pur, mais tout particulièrement la séparation de l'or et de l'argent — et du bismuth, ce qui est important — sous forme de boues.

Notons que la métallurgie du plomb n'utilise aucune méthode de voie humide et que l'électrothermie n'y présente actuellement aucun intérêt.

*Situation mondiale de la métallurgie du plomb.* — Les chiffres suivants fixent la situation mondiale de la métallurgie du plomb (en tonnes) :

## MÉTHODES AUTRES QUE CELLES DU FER

|                            | 1913      | 1925      |
|----------------------------|-----------|-----------|
| Production mondiale . . .  | 1.193.517 | 1.548 928 |
| Etats-Unis . . . . .       | 407.800   | 611.073   |
| Espagne . . . . .          | 203.000   | 138.200   |
| Allemagne . . . . .        | 181.000   | 91.680    |
| Australie . . . . .        | 110.000   | 150.263   |
| Mexique . . . . .          | 62.000    | 186.120   |
| Belgique . . . . .         | 50.800    | 65.470    |
| Grande-Bretagne . . . . .  | 30.500    | 4.811     |
| France . . . . .           | 28.817    | 20.540    |
| Autriche-Hongrie . . . . . | 24.100    | 5.408     |
| Italie . . . . .           | 21.700    | 24.475    |
| Grèce . . . . .            | 18.400    | 5.106     |
| Canada . . . . .           | 17.100    | 115.207   |

La consommation française était en 1913 de 104.764 tonnes.

**L'évolution de la métallurgie du zinc.** — C'est une bien vieille méthode, ayant fait peu de progrès, qui gouverne la métallurgie du zinc, et cela malgré le four électrique, malgré la nouvelle méthode de voie humide de l'Anaconda, qui s'étend cependant rapidement. Il s'agit toujours de la réduction de l'oxyde par le carbone, et cela malheureusement à une température telle que le zinc est à l'état de vapeur. Là est la plus grosse difficulté. Les minerais, sulfure (blende) et carbonate, sont ramenés préalablement à l'état d'oxyde.

Certes il n'est plus question, comme au début de la métallurgie du zinc, de réduire l'oxyde dans un creuset, en présence du cuivre, pour obtenir du laiton, ni même d'utiliser la méthode dite *per descensum* dans laquelle l'oxyde de zinc réduit en creuset par du carbone *descendait* suivant un tube vertical partant du fond du creuset pour couler à la partie basse. Le procédé *per ascen-*



*sum* utilisant un important creuset de section elliptique venant s'emboîter dans le condenseur, forme, avec quelques variantes, la méthode qui régit cette métallurgie depuis plus de quatre-vingts ans. Sans doute les fours silésiens, les fours belges et les fours rhénans (fig. 23 et 24) diffèrent-ils par le nombre et la disposition des creusets ; sans doute ceux-ci seront-ils améliorés et comme qualité et comme prix de revient, par les moyens mécaniques de fabrication ; sans doute, enfin, a-t-on appliqué à ces fours quelques perfectionne-

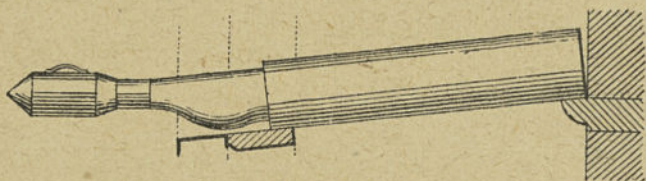


Fig. 24. — Creuset rhénan à zinc.

ments dans le chauffage, en utilisant les semi-récupérateurs ou mieux les récupérateurs Siemens avec inversion. Mais tout cela ne représente aucune nouveauté. La manutention mécanique s'est aussi développée, le chargement des creusets se fait encore trop souvent par la main de l'homme. Cependant il faut insister sur deux points :

Le traitement du minerai à la mine même ; les méthodes de grillage de la blende.

Le traitement du minerai à la mine même a fait, fort heureusement, des progrès considérables ; de plus en plus on est conduit à exploiter des minerais mixtes de zinc et de plomb, et ces deux métaux se nuisent considérablement dans leurs propres métallurgies. Les méthodes

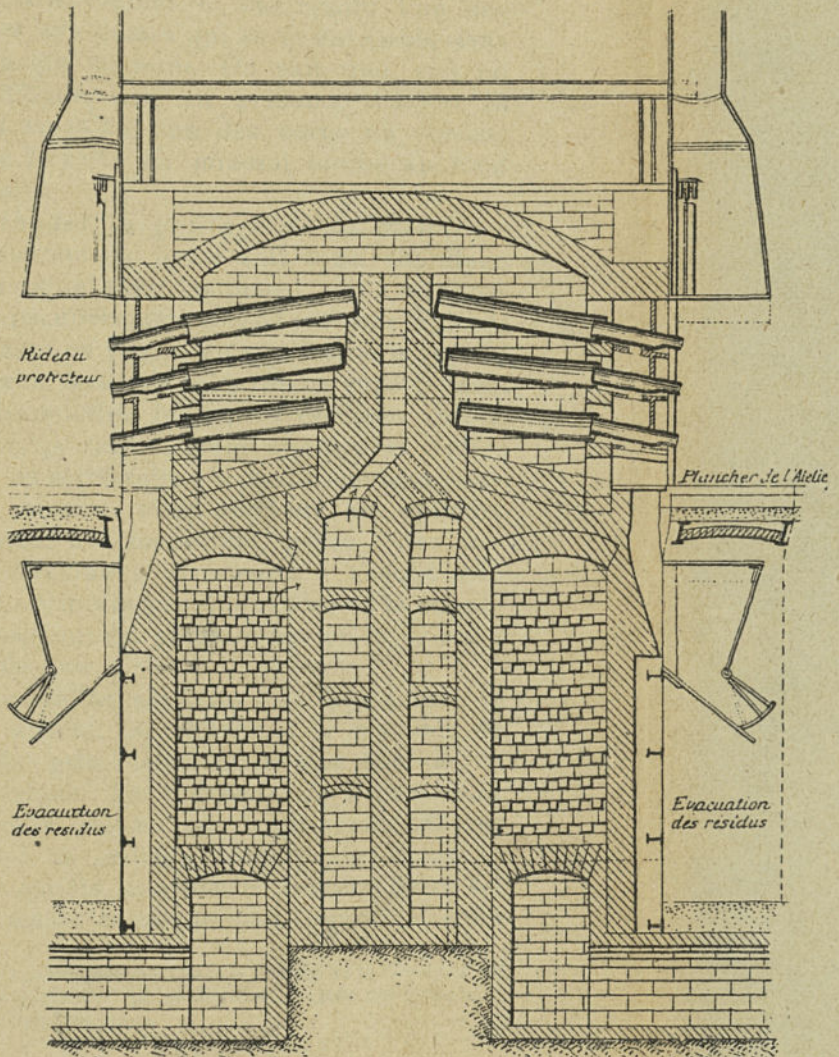


Fig. 23. — Four à zinc.





modernes de lavage, tout spécialement la *flottaison*, permettent d'atteindre réellement des résultats remarquables et ont résolu l'un des plus graves problèmes qui se soient posés dans la métallurgie moderne. On sait que, soit en présence d'huile, soit en présence d'acide, la *flottaison* entraîne l'un des corps en surface tandis que le reste du minerai tombe au fond des appareils.

Les *méthodes de grillage de la blende* se sont perfectionnées, grâce soit à un chauffage plus méthodique<sup>1</sup> (four Delplace), soit à un appareillage particulièrement soigné ; le four Spirlet, très justement en vogue, en représente le type le plus moderne. Avec ses soles rondes superposées, les unes immobiles, les autres tournant autour de leur axe, portant chacune au-dessous d'elles des râbles en réfractaire qui produisent le mouvement du minerai, elles forment un cylindre trapu, solide, ne comportant, grâce à des crémaillères circulaires extérieures à chaque sole tournante, aucune mécanique exposée à la température élevée qui est produite par un foyer situé à la base du four.

Deux nouvelles méthodes font déjà sentir, la première surtout, leur intérêt : la méthode de l'Anaconda, principalement de voie humide ; le four électrique. La *méthode de l'Anaconda* rappelle celle utilisée pour les minerais pauvres en cuivre : un grillage modéré transformant le sulfure en sulfate, une mise en solution de ce sel avec traitement chimique pour l'épurer et enfin

1. Il ne faut pas oublier que, dans le grillage de la blende, il est indispensable de chauffer, afin de détruire le sulfate qui prend naissance au cours des opérations.



électrolyse, avec anodes insolubles, pour déposer le zinc qui est très pur.

Le grillage qui est à la base de la méthode se fait vers 700° dans les fours mécaniques les plus modernes. On lave ensuite le minerai grillé par des liquides acides provenant de l'électrolyse et régénérés, ceci dans des grandes cuves avec agitation par l'air comprimé. Le fer est éliminé de la liqueur par oxydation au moyen du bioxyde de manganèse : le cuivre et le cadmium sont précipités par du zinc et enfin le liquide ainsi purifié est soumis à l'électrolyse, les anodes étant formées de plaques de plomb et les cathodes étant constituées par des plaques d'aluminium où vient se déposer le zinc que l'on détache ensuite. Le métal ainsi obtenu est extrêmement pur ; il renferme 99,9 p. 100 de zinc ; ses propriétés mécaniques, notamment ses allongements, sont fort intéressantes. Cette méthode de l'Anaconda permet de traiter des minerais relativement pauvres ; partie de l'Anaconda, elle est déjà utilisée par la Société de la Vieille-Montagne, à Viviez (Aveyron) ; elle le sera très prochainement par la Société de Penarroja dans le sud-ouest de la France.

L'utilisation de l'électrothermie ne paraît intéressante que dans certains pays, où le courant est particulièrement peu coûteux, notamment en Norvège ; voici pourquoi : la réduction de l'oxyde par le carbone est évidemment chose aisée au four électrique ; on a même pu songer à des réactions que l'usure d'un creuset ordinaire ne saurait permettre, telle que l'action du fer déplaçant le zinc du sulfure ; malheureusement la condensation des vapeurs de zinc est extrêmement délicate,

il se produit, comme chacun sait, du gris de zinc, produit de peu d'intérêt commercial, et le rendement de l'opération est faible.

On voit que, cependant, la vieille métallurgie du zinc, si grosse consommatrice de charbon — souvent 4 à 5 tonnes de charbon pour une tonne de zinc — progresse dans des voies très différentes.

*Situation mondiale de la métallurgie du zinc.* — Le tableau suivant donne, en tonnes, la production des principaux pays en 1913 et 1925.

|                           | 1913      | 1925      |
|---------------------------|-----------|-----------|
| Production mondiale . . . | 1.002.225 | 1.110.027 |
| Etats-Unis . . . . .      | 320.300   | 504.057   |
| Allemagne . . . . .       | 281.100   | 58.623    |
| Belgique . . . . .        | 197.700   | 170.860   |
| France . . . . .          | 67.890    | 64.260    |
| Grande-Bretagne . . . .   | 59.146    | 38.671    |
| Hollande . . . . .        | 24.300    | 21.117    |
| Autriche-Hongrie . . . .  | 21.707    | 5.232     |
| Australie . . . . .       | 3.724     | 46.500    |

La consommation française a été de 78.153 tonnes en 1913.

**L'évolution de la métallurgie du nickel.** — Totale-ment ignorée en 1850, la métallurgie du nickel est réellement née de la découverte des gisements de la Nouvelle-Calédonie, par Garnier en 1865. — Mais, depuis cette époque, elle a singulièrement évolué.

La garniérite étant un silicate complexe de nickel et de magnésie, contenant du fer, on a cherché à le traiter comme un minerai oxydé, c'est-à-dire à le réduire par le carbone en présence de chaux susceptible de déplacer la silice.



Mais le nickel est susceptible, comme le fer, d'absorber le carbone, au moins à l'état liquide, et l'on obtient une fonte. L'opération avait lieu, en four à cuve, sur place en Nouvelle-Calédonie et la fonte nickelifère venait se faire affiner au four Martin, près de Marseille.

Cette méthode a complètement disparu et est remplacée, pour les mêmes minerais, par la fusion sulfurante, laquelle donne une matte  $\text{Ni}^2\text{S}^3$ ,  $n\text{FeS}$ , semblable à celle du cuivre. Pour l'obtenir, la garniérite est traitée au four à cuve par un mélange de sulfate de calcium (gypse) et de coke.

Le soufre du sulfure de calcium prend le nickel et une partie du fer qui se sépare de la scorie sous forme de matte. Cette matte est ensuite concentrée, tout comme celle de cuivre, par grillages et fusions successifs, et lorsqu'on a ainsi atteint une teneur en nickel suffisamment élevée, elle est passée au convertisseur qui opère le *déferage*, toujours avec un rigoureux parallélisme avec la métallurgie moderne du cuivre. Ceci, d'ailleurs, à un point tel que l'on doit spécialement signaler l'emploi du convertisseur basique se substituant au convertisseur acide. Mais voici où les opérations diffèrent entièrement : au lieu de poursuivre la conversion de la matte, comme pour le cuivre, ici on s'arrête au sulfure  $\text{Ni}^2\text{S}^3$ , et cela pour une raison bien simple que l'on n'obtiendrait pas le nickel. Donc le convertisseur donne  $\text{Ni}^2\text{S}^3$ , celui-ci est grillé à mort; on obtient  $\text{NiO}$  et cet oxyde est réduit de façon très spéciale par calcination réductrice : l'oxyde en poudre est mêlé avec un produit tel que la farine, il forme ainsi des agglomérés qui sont placés dans des

creusets réfractaires et entourés de charbon. On chauffe ensuite vers 1.200 à 1.300°, de sorte que l'oxyde est réduit et que le nickel, qui fond à 1.480°, demeure solide. Pourquoi cette précaution? Parce que le nickel fondu absorberait du carbone et même le soufre contenu dans le charbon, et il faudrait ensuite l'affiner. Cette calcination réductrice se passe dans un four complexe, contenant de multiples creusets horizontaux ou verticaux et chauffé par le gaz, avec récupérateurs à inversion.

Le nickel ainsi obtenu a généralement la forme de petits cylindres ou de très petits cubes. Pour être malléabilisé, il doit subir une fusion avec affinage, lequel fera, par une addition de manganèse ou de magnésium, disparaître l'oxyde restant.

Mais les minerais calédoniens ne sont plus les gros pourvoyeurs de nickel du monde. Les minerais canadiens ont une importance capitale et nous devons chercher à montrer brièvement la complexité de leurs traitements. Constitué principalement de sulfures de fer, de cuivre et de nickel, le minerai est avant tout soumis à une fusion pour matte, après grillage partiel, tout comme un minerai de cuivre. Mais le produit de l'opération est la matte :  $Ni^2S^3$ ,  $nCu^2S$ ,  $NFeS$ , cette formule n'étant qu'approximative.

Quoi qu'il en soit cette matte est déferée au convertisseur et finalement on obtient  $Ni^2S^3$ ,  $nCu^2S$ . Il s'agit de séparer le nickel du cuivre et c'est là que le problème se complique. Plusieurs méthodes sont employées : la plus ancienne consiste à fondre en présence de sulfate de sodium et de carbone, c'est-à-dire de sulfure de sodium : le bain



se sépare en deux couches, le sulfure de nickel d'une part, un sulfure double de cuivre et de sodium, d'autre part, lequel surnage. — Par épuisements successifs, on arrive ainsi à  $\text{Ni}^2\text{S}^3$  pur que l'on traite alors comme dans le procédé calédonien.

D'autres méthodes, celle de Hybinette et celle de Stanley, à peu près tenues secrètes, utilisent l'électrolyse. D'autre part, on peut griller à mort la matte  $\text{Ni}^2\text{S}^3, \text{nCu}^2\text{S}$  et réduire le mélange oxyde de cuivre et oxyde de nickel, ce qui donne un alliage de cuivre et de nickel contenant un peu de fer; il est connu sous le nom de *Monel Metal*, il contient  $\text{Ni} = 68$  à  $74$  p. 100;  $\text{Cu} = 25$  à  $30$  p. 100;  $\text{Fe} = 1$  p. 100 environ; il fond à  $1.300^\circ$ ; il a de très nombreuses applications, par ses propriétés mécaniques intéressantes (charge de rupture à la traction : 60 kilogrammes par millimètre carré; limite élastique à la traction : 32 kilogrammes par millimètre carré; allongements de rupture = 20 p. 100), par son inoxydabilité, sa résistance à la corrosion de certains acides et son bel aspect.

Enfin il faut signaler un autre procédé extrêmement curieux et qui donne de suite du nickel très pur, le procédé Mond : la matte grillée, provenant du Canada, est soumise à l'action de l'hydrogène; d'où formation sur place de nickel; ce métal est alors *volatilisé* par un courant d'oxyde de carbone (gaz à l'eau) à l'état de  $\text{Ni}(\text{CO})^4$ , nickel tétracarbonyle. Cette opération a lieu à  $400^\circ$ . Le gaz nickel-carbonyle passe ensuite dans une tour où, porté à la température de  $150^\circ$ , il se décompose en nickel et oxyde de carbone. Celui-ci rentre dans le cycle des opérations, tandis que le nickel se dépose sur des nodules de

ce métal, les « engrais » pour ainsi dire, jusqu'au moment où elles ont acquis le volume désiré dans le commerce. Ces opérations rendues automatiques, dans des appareils simples, mais dont la conduite doit être scientifiquement réglée, est un des beaux exemples de l'évolution scientifique des méthodes métallurgiques.

Nous devons encore signaler deux points intéressants : l'intervention de l'électrothermie qui, reprenant, sur place même, le traitement des minerais calédoniens, la réduction du silicate en présence de chaux, donne des ferro-nickels fort intéressants, notamment dans la fabrication des aciers au nickel. D'autre part, l'électrolyse intervient de la façon la plus heureuse, non seulement dans la séparation cuivre-nickel (procédé Hybnette et procédé Stanley), mais aussi pour celle du fer et du nickel, et donne un métal très pur. On conçoit donc pour l'avenir deux métallurgies bien distinctes :

Celle des minerais calédoniens où le four électrique et l'électrolyse domineront.

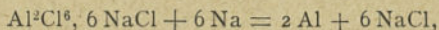
Celle des minerais canadiens, métallurgie de sulfures, dans laquelle l'électrolyse n'interviendra que *in fine* et où la méthode Mond est particulièrement curieuse à noter.

Il est bon de donner quelques chiffres relatifs à la production du nickel métallique (en tonnes).

|                            | 1890  | 1910   | 1925   |
|----------------------------|-------|--------|--------|
| Production mondiale . . .  | 2.484 | 17.300 | ?      |
| Etats-Unis et Canada . . . | 750   | 10.000 | 12.000 |
| France et Belgique. . . .  | 1.200 | 3.500  | 3.500  |
| Allemagne. . . . .         | 434   | 4.500  | ?      |
| Angleterre. . . . .        | —     | 3.500  | 6.000  |



L'évolution de la métallurgie de l'aluminium. — Vaguement connu sous forme d'une poudre grise noirâtre, ne présentant aucun intérêt, l'aluminium, ainsi découvert par Wöhler, devint un produit industriel au lendemain de la découverte de Henri Sainte-Claire Deville, faite au laboratoire de l'École Normale Supérieure, en 1850. Sa méthode consistait, est-il utile de le rappeler, dans la préparation du chlorure double d'aluminium et de sodium et son traitement par le sodium :



ce qui d'ailleurs conduisit à la métallurgie du sodium.

C'est cette méthode qui, envisagée d'abord aux environs de Paris, puis développée à Salindres, gouverna entièrement la métallurgie de l'aluminium jusqu'en 1886, époque à laquelle apparut l'aluminium obtenu par l'électrolyse d'un sel fondu.

On sait les faits curieux qui présidèrent à la naissance du procédé qui est actuellement le seul usité dans le monde : de différents côtés étaient poursuivis d'intéressants essais, souvent semi-industriels, afin d'extraire l'aluminium de ses sels par électrolyse ; les noms de Minet, des frères Bernard resteront attachés à cette période qui a précédé l'établissement de la méthode actuelle. En 1886, le même jour, Héroult, jeune ingénieur français, ancien élève de l'École Supérieure des Mines, et Hall, ingénieur américain, déposèrent des brevets à peu près identiques. C'était la création du procédé qui consiste dans l'électrolyse d'alumine mise en solution dans un bain fondu de cryolithe, fluorure double d'alumi-

nium et de sodium. L'opération a lieu vers 950°, dans un bac qui n'est pas chauffé, l'électricité produisant l'élévation de température.

Mais il faut partir d'alumine pure, et c'est là aussi une caractéristique de cette belle métallurgie.

Pourquoi faut-il partir d'alumine pure ? Pourquoi faut-il, avant tout, transformer la bauxite, minéral très français, qui doit son nom au joli pays des Baux, en Provence, et qui est formé d'alumine impure contenant de l'oxyde de fer, de la silice, etc. ?

Si on ne prenait cette première précaution, laquelle conduit à des opérations complexes, à des usines très importantes, on obtiendrait de l'aluminium impur, lequel ne pourrait être affiné par les méthodes ordinaires, notamment par oxydation, la chaleur de formation de l'alumine étant supérieure à celle de la plupart des autres oxydes. Cependant nous verrons plus loin que l'on fait actuellement de l'aluminium extra-pur par électrolyse d'aluminium impur, mais cela est fort coûteux.

La métallurgie de l'aluminium se fait donc en deux phases : la première produisant l'alumine pure, la seconde opérant l'électrolyse, là où l'énergie électrique est bon marché, soit près des chutes d'eau — ce qui est le cas des usines françaises — soit près des centrales utilisant des combustibles ou des gaz résiduels avantageux.

La préparation de l'aluminie pure ne se fait guère plus par le procédé Deville : une attaque par le carbonate de soude à température élevée suivie d'un lessivage à l'eau, mettait en solution l'aluminate de sodium, tandis que les impuretés



étaient précipitées, l'oxyde de fer et la silice, mais celle-ci sous forme de silicate double d'aluminium et de sodium, ce qui absorbait de l'alumine. Enfin un courant d'acide carbonique, provenant d'un four à chaux, décomposait l'aluminate et donnait l'alumine. Celle-ci était calcinée et gagnait ensuite l'usine d'électrolyse.

La méthode actuelle est celle de Bayer; elle est fort curieuse et présente de réels avantages : plus d'attaque par le carbonate de soude fondu, opération dangereuse; mais formation d'aluminate de soude par action d'une lessive de soude; même précipitation et même filtration que dans le procédé Deville; mais suppression de l'action de l'anhydride carbonique, et décomposition de l'aluminate de soude par simple « ensemencement » d'hydrate d'alumine provenant d'une opération précédente: exemple remarquable de la décomposition d'un sel instable. — Bien entendu, subsiste ici la calcination finale, dans un four constitué par un long tube chauffé et tournant, la température atteinte étant de  $1.100^{\circ}$ .

L'électrolyse de l'alumine n'a fait récemment que des progrès de détails, cependant intéressants; emploi de la cryolithe artificielle, utilisation de fours beaucoup plus importants, qui ont passé de 10.000 ampères à environ le double.

Il faut noter d'une façon toute spéciale l'échec complet de toutes les tentatives, parfois très scientifiques, souvent très poussées, pour extraire l'aluminium de produits naturels abondants, tel que l'argile. Tous ces essais ont donné des rendements bien trop faibles et des prix de revient beaucoup trop élevés.

Remarquons aussi que le courant électrique,

issu des chutes d'eau, n'est plus le seul à fournir de l'aluminium. Les grandes centrales allemandes, traitant les lignites, ont permis d'avoir l'énergie dans des conditions telles que la fabrication de l'aluminium est possible. Mais assurément le point le plus remarquable est le développement de la métallurgie de l'aluminium, sous les besoins de plus en plus développés de l'automobilisme et de l'aviation ainsi que des industries électriques, où l'aluminium prend de plus en plus la place du cuivre. — Un gros effort a été fait notamment en notre pays pour assurer les besoins en ce métal et de nouvelles usines s'élèvent dans les Alpes et les Pyrénées grâce à la clairvoyante énergie de la Compagnie Alais, Froges et Camargue, et de la Société d'Electrochimie et d'Electrométallurgie d'Ugine.

Voici d'ailleurs quelques statistiques très frappantes donnant la production en tonnes :

|                      | 1888 | 1900      | 1913       | 1924    |
|----------------------|------|-----------|------------|---------|
| Etats-Unis . . . . . | 28   | 3.200     | 22.500     | 80.000  |
| Canada . . . . .     | —    | —         | 5.900      | 12.000  |
| Angleterre . . . . . | 70   | 500       | 7.600      | 8.000   |
| Norvège . . . . .    | —    | —         | 1.500      | 20.000  |
| France . . . . .     | 37   | 1.500     | 14.500     | 18.500  |
| Italie . . . . .     | —    | —         | 500        | 2.000   |
| Suisse . . . . .     | 40   | } 2.500 } | } 12.000 } | 15.000  |
| Allemagne . . . . .  | —    |           |            | 13.000  |
| Autriche . . . . .   | —    |           |            | 1.500   |
| Production mondiale. | 175  | 7.700     | 64.800     | 191.500 |

**L'évolution des métallurgies des métaux précieux.** — Quelques mots sur les méthodes utilisées dans les métallurgies de l'or et de l'argent, qui, à elles seules, mériteraient un livre entier. Alors que l'on discute encore les réactions chimiques intervenant



dans les vieux procédés du *patio*, alors que la charrue électrique a remplacé, pour le mélange du minerai, des sels et du mercure nécessaires à cette vieille méthode, la mule conduite par le traditionnel guitariste, l'amalgamation a fait de singuliers progrès aussi bien dans la partie mécanique, broyage, bocardage, etc., que dans l'utilisation du mercure même, allant jusqu'à l'emploi de ces tables à secousses qui assurent un meilleur contact entre le minerai et le mercure déposé sur métal argenté.

Mais la grosse évolution de la métallurgie des métaux précieux se trouve dans la cyanuration qui a rapidement étendu son action de la métallurgie de l'or à celle de l'argent.

On en connaît le principe : une solution aqueuse très étendue de cyanure alcalin est mise en contact avec le minerai très finement pulvérisé ; le métal précieux entre en solution, formant un cyanure double ; de cette solution, l'or ou l'argent est précipité par le courant électrique ou plus souvent par le zinc. Le métal ainsi obtenu pulvérisé est fondu avec des précautions diminuant les pertes.

En métallurgie de l'argent, le procédé s'applique directement aux combinaisons, telles que le sulfure.

Ce que l'on se figure difficilement, avant d'avoir visité les usines de cyanuration, telles que celles qui existent en France, c'est le matériel formidable que nécessite la cyanuration. Que l'on se souvienne seulement que le minerai traité contient parfois 25 grammes d'or à la tonne, souvent 5 seulement.

On peut alors concevoir les masses de matières

MÉTHODES AUTRES QUE CELLES DU FER

qu'il faut mettre en jeu pour atteindre une production industrielle, et l'on doit se dire que les matières de rejet sont en quantités plus importantes que celles extraites de la mine, puisqu'au produit initial viennent s'ajouter les additions liquides et les réactifs utiles.

Appareils de broyage allant depuis les concasseurs jusqu'aux longs tubes mills, en passant par les broyeur à cylindres et ceux à boulets; fours de grillage mécaniques, souvent indispensables pour détruire sulfures et arséniures; cuves de dissolution et de malaxage; filtres mécaniques à grand débit, cuves de précipitation et enfin salle de fusion, tout cela constitue un appareillage formidable que d'aucuns s'étonnent de trouver en France, avec un développement qui fait songer aux champs d'or du Transvaal.

Et cependant notre pays fait bien piètre figure, dans la production aurifère et argentifère mondiale, comme le prouvent les statistiques suivantes :

|                                      | PRODUCTION DE L'OR<br>en tonnes. |      |
|--------------------------------------|----------------------------------|------|
|                                      | 1913                             | 1925 |
| Production mondiale . . . . .        | 683                              | 583  |
| Transvaal . . . . .                  | 274                              | 297  |
| Etats-Unis. . . . .                  | 133                              | 74   |
| Australasie . . . . .                | 79                               | 21   |
| Russie. . . . .                      | 33                               | 23   |
| Mexique. . . . .                     | 31                               | 24   |
| Canada . . . . .                     | 24                               | 54   |
| Rhodésie . . . . .                   | 21                               | 18   |
| Indes anglaises . . . . .            | 18                               | 12   |
| Côte occidentale d'Afrique . . . . . | 12                               | 6    |
| France . . . . .                     | 2,4                              | ?    |



L'ÉVOLUTION DE LA MÉTALLURGIE

PRODUCTION DE L'ARGENT  
en tonnes.

|                               | 1913  | 1925  |
|-------------------------------|-------|-------|
| Production mondiale . . . . . | 7.735 | 7.626 |
| Etats-Unis. . . . .           | 4.059 | 2.057 |
| Mexique . . . . .             | 1.159 | 2.888 |
| Canada . . . . .              | 547   | 629   |
| Allemagne. . . . .            | 538   | } 306 |
| Grande-Bretagne. . . . .      | 395   |       |
| Belgique. . . . .             | 280   |       |
| France. . . . .               | 31    |       |

## CHAPITRE III

### L'UTILISATION DES RÉSIDUS

**Généralités.** — C'est un des problèmes les plus intéressants de la métallurgie, l'un de ceux qui ont fait le plus de progrès dans ces vingt-cinq dernières années, que celui de l'utilisation des sous-produits ou des résidus des opérations métallurgiques.

Examinons, avant tout, ce que l'on peut appeler un sous-produit.

Prenons une opération métallurgique quelconque, que ce soit l'extraction du métal (ou d'un produit intermédiaire) d'un minerai, que ce soit l'affinage d'un métal ou même une fusion d'alliage, il y aura deux catégories de sous-produits :

*Le gaz qui s'échappe de l'appareil ;*

*Le laitier ou la scorie, dont la production a permis la réalisation de réactions indispensables.*

Chacune de ces matières, gaz et laitiers ou scories, contiennent des calories, en quantité d'ailleurs d'une importance très variable d'un genre d'opération à un autre ; mais, dans nombre de cas, on aura la juste préoccupation de ne pas perdre ces calories et de récupérer les chaleurs



qui seraient perdues si les produits étaient directement envoyés ou déposés dans l'atmosphère.

De plus, un gaz sortant d'un appareil métallurgique entraîne généralement, sous forme de poussières, les produits qui se trouvent dans le four.

On devra chercher à les récupérer, pour leur propre valeur d'une part, pour les inconvénients qu'ils pourraient présenter, en obstruant notamment les appareils même, d'autre part, et enfin pour des questions de simple hygiène, un grand nombre de produits entraînés pouvant nuire singulièrement à la vie du personnel et au développement de l'agriculture, spécialement l'anhydride arsénieux.

Enfin le gaz, sous-produit d'une opération métallurgique, peut, de par sa composition même, contenir une énergie interne intéressante, qu'il ne faut pas confondre avec les calories qu'il est susceptible d'abandonner par simple conductibilité ; le gaz peut renfermer de l'oxyde de carbone, de l'hydrogène, des hydrocarbures, en quantité telle qu'il soit combustible.

Quant aux scories et laitiers, en dehors de la chaleur qui y est contenue, ils présentent un très gros intérêt, comme utilisation directe après solidification, ainsi que nous allons l'indiquer.

Mais suivons le métal plus loin que dans son extraction, son affinage ou la production d'alliages. Tous les traitements mécaniques qui ont pour but de lui donner une forme définitive, laminage, martelage, étirage, tréfilage, travail sur machines-outils, toutes ces opérations donneront des déchets. Ceux-ci retourneront à la fusion, cela est tout naturel.

Mais ce serait erreur grave de croire qu'il est ainsi facile d'utiliser ces résidus et que soit aisée la fusion de ces déchets extrêmement fins que produisent le fraisage et le perçage, de ces « chevelures » emmêlées que donnent le tournage des aciers ou de certains laitons ne contenant pas de plomb.

**Utilisation des gaz résiduels.** — Les gaz sont donc intéressants à trois points de vue différents :

- a) Les poussières contenues ;
- b) Les calories contenues ;
- c) L'énergie renfermée, dans les gaz encore combustibles.

Mais on comprend aisément qu'avant tout se pose la question de l'épuration des gaz ; cela, avant toute utilisation. En effet, que le gaz soit employé pour chauffer par conductibilité des appareils, tels des récupérateurs, qu'il soit brûlé en vue d'élever la température de chaudières ou de masses de briques, peu importe, les poussières nuiraient au bon fonctionnement et viendraient encombrer l'appareillage. Il faut donc, avant tout, *épurer* le gaz, c'est-à-dire lui enlever le mieux possible, les matières solides qu'il entraîne.

Enfin notons que, de toute évidence, cette opération — fort délicate et coûteuse — est plus ou moins poussée, suivant le mode d'utilisation du gaz résiduel.

**L'épuration des gaz. Ses récents progrès.** — I. CLASSIFICATION ET PRINCIPES DES MÉTHODES EMPLOYÉES. — Les appareils utilisés dans l'épuration des gaz se classent de la façon suivante :



Appareils à refroidissement ;  
Appareils à perte de charge ;  
Appareils à lavage ;  
Appareils à frottement ;  
Appareils à filtration ;  
Appareils électrostatiques.

Après avoir indiqué en quelques mots le principe de chaque catégorie d'appareils, nous étudierons plus complètement l'appareillage moderne.

Les *appareils à refroidissement*, dont le but est de diminuer le volume des gaz et de condenser une partie des poussières, se trouvent au début de toute installation. Généralement, ils consistent en conduites métalliques, le plus souvent de section elliptique, portant rarement des ailettes ; bien entendu, ces conduites présentent pente et points bas voulus pour que les poussières se rassemblent en un endroit fixé, d'où l'on puisse les extraire facilement. Quelquefois, notamment dans les usines à antimoine, où l'on est très préoccupé de la condensation de l'oxyde d'antimoine  $Sb^2O^3$  provenant du grillage oxydant de la stibine, on va jusqu'au refroidissement par eau — nous parlons ici de refroidissement et non de lavage des gaz par l'eau — mais cette méthode est de plus en plus abandonnée.

Les *appareils à perte de charge* utilisent de brusques changements dans la section des tuyaux et dans la direction des gaz. Chacun connaît la disposition classique qui se trouve près de chaque haut fourneau, et souvent près des water-jackets ou des réverbères : un vaste cylindre à axe vertical, terminé en haut et en bas par deux troncs de cône ; par celui situé à la partie supérieure,

passé le tube d'aménée des gaz qui pénètre assez profondément dans le cylindre, en s'évasant légèrement; au bas du tronc de cône inférieur, une trappe permet d'enlever les poussières, tandis que les gaz sont extraits par un tube situé sur le côté du cylindre.

On a souvent compliqué ces appareils en opérant un certain nombre de changements dans le sens de la circulation des gaz; ces dispositions ont eu quelques succès en métallurgie du plomb, mais elles paraissent complètement abandonnées, excepté dans quelques vieilles usines sans intérêt.

En tous les cas, le point essentiel à bien noter est que ces deux sortes d'appareils — à refroidissement et à perte de charge — ne peuvent avoir la prétention d'opérer une épuration complète. Ils préparent simplement les gaz à une épuration plus aisée.

Il en est tout autrement des *appareils à lavage*; ceux-ci jouent dans un grand nombre de métallurgies, spécialement en sidérurgie, un rôle de tout premier plan, cela aussi bien en épuration partielle qu'en épuration complète. Mais encore faut-il préciser ce que l'on doit entendre par ces deux expressions, qui prennent souvent un sens plus précis, sous la forme d'épuration du premier degré et d'épuration du second degré.

On épure les gaz en vue d'atteindre différents buts que nous avons rappelés : récupération des poussières, hygiène, utilisation des gaz. On conçoit aisément que, suivant le but à atteindre, le degré d'épuration ne soit pas le même. Il est de toute évidence, pour prendre les cas les plus frappants, que, si l'on veut simplement recueillir



des poussières en se plaçant au point de vue prix de revient, on pourra s'arrêter, dans la récupération, à un degré de perfection moindre, caractérisé d'ailleurs par une plus grande quantité de poussières contenues dans les gaz qui s'échappent dans l'atmosphère, que si l'on doit utiliser les gaz dans des appareils extrêmement sensibles aux corps solides, tels que les moteurs à gaz par exemple.

Bien mieux, on admet de suite que, suivant le mode d'utilisation des gaz, leur degré d'épuration exigé peut ne pas être identique : brûler les gaz résiduels sous des chaudières peut ne pas demander une épuration aussi poussée que les utiliser dans des moteurs. D'ailleurs, n'existe-t-il pas l'exemple classique des gaz de haut fourneau que l'on emploie partiellement dans les appareils Cowper, destinés à chauffer l'air d'alimentation du four, et dans les moteurs des soufflantes et des centrales électriques, et ne peut-on pas citer les chiffres, généralement admis pour ces deux degrés d'épuration : le maximum de 1 gramme de poussières laissées par mètre cube dans les gaz des Cowper (épuration du premier degré) et le maximum de 2 centigrammes pour les gaz des moteurs ?

Quoi qu'il en soit, si l'on envisage le problème au point de vue général, et c'est en cela qu'il est particulièrement intéressant, il ne se pose point d'une façon aussi complexe.

Hormis la sidérurgie, en effet, il est rare, extrêmement rare, que les gaz métallurgiques soient combustibles (nous ne parlons pas ici de la fabrication du coke). Quelques très rares usines à cuivre, dont la matière première se trouve être des schistes bitumineux, ont cherché à utiliser

les gaz de leurs fours à cuve, et cela avec l'aide de gazogènes, et encore n'ont-elles point obtenu de résultats continus satisfaisants. En général, le problème touche avant tout l'hygiène ou l'abaissement du prix de revient par une juste récupération des matières entraînées.

L'épuration du premier et du second degré ne touche donc que la métallurgie du fer ; mais l'im-

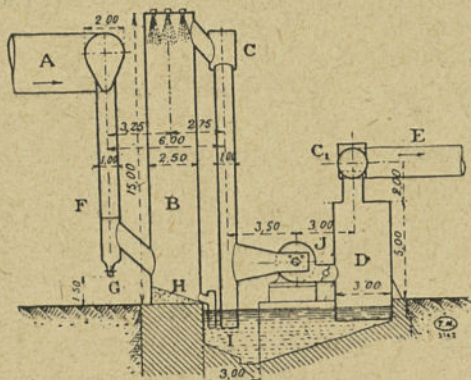


Fig. 25. — Épurateur du 1<sup>er</sup> degré.

portance de celle-ci donne à ce délicat problème une acuité toute particulière.

La figure 25 représente une épuration du premier degré pour gaz de haut fourneau, telle qu'elle est le plus souvent utilisée.

Les appareils à lavage peuvent contribuer à l'une ou à l'autre des deux phases de l'épuration ; sortis de l'industrie chimique, ils peuvent simplement se présenter sous la forme classique de la tour, au sommet de laquelle tombe le liquide de lavage, généralement l'eau, lequel s'étale sur des matériaux réfractaires, tandis que



les gaz s'élèvent dans l'appareil ; mais le ventilateur à injection d'eau est plus fréquemment utilisé, tel l'appareil Bian, suivi d'une caisse qui agit comme séparateur d'eau.

L'appareil de lavage du second degré est l'appareil Theisen ; nous n'y insistons pas actuellement, car il est l'un des types les plus utilisés dans les installations modernes, mais d'ores et déjà, rappelons que ces appareils présentent un grave inconvénient : ils entraînent une consommation d'eau importante.

Les *appareils à frottement* n'ont guère plus qu'un intérêt historique, quoique certaines usines aient conservé quelques anciens modèles. Ce sont, bien entendu, de simples organes dégrossisseurs. Les gaz, passant sur des matières inertes, y déposent une partie de leur poussière. Ces matières peuvent être des tournures, des matériaux réfractaires, des fils suspendus, etc., disposées dans une chambre de maçonnerie.

Faut-il rappeler l'ancienne installation de Great-Falls qui, pour un traitement de 4.000 tonnes de minerais par vingt-quatre heures, utilisait une succession de chambres ayant 3.000 mètres cubes de capacité et renfermant 10.000 fils d'acier de 3<sup>mm</sup>,5 de diamètre et distants de 6 centimètres ?

Les *appareils à filtration* comptent au contraire parmi les plus utilisés ; ils ont pris une très forte extension en sidérurgie, alors qu'ils sont fort employés dans les autres métallurgies, notamment celles du plomb, de l'or, etc., et cela depuis très longtemps. Les gaz passent à travers des matières filtrantes dont le choix est parfois très délicat : laine, coton, amiante ; le plus souvent, ces matières constituent de véritables sacs,

des bonnets de coton, dit-on souvent, à travers lesquels le gaz doit passer. Montés en série, ces sacs constituent les « bag-houses » des États-Unis. Quelquefois, on s'est contenté de fils d'amiante tendus, très serrés, sur un cadre. Une très belle installation de filtration existait avant la guerre à l'usine de Noyelles-Godault, de la Société des Mines de Malfidano. Ailleurs, le gaz passe simplement sur des claies contenant de la sciure de bois, de la laine de laitier, etc.

Ces méthodes ont pénétré avec grand succès en métallurgie du fer, et cela récemment. Nous devons donc en parler plus loin avec détails.

Cependant, insistons d'ores et déjà sur les précautions principales que nécessitent de tels procédés : emploi de matières premières inattaquables par les gaz filtrés, et cela dans les conditions où ils se trouvent, notamment de température, d'humidité, etc. ; nécessité de séparer les poussières déposées sur la matière filtrante, afin que celle-ci puisse continuer à jouer son rôle ; obligation d'éviter à tout prix le « colmatage » de l'étoffe.

Enfin, on remarquera de suite que, en opposition avec la méthode de lavage, la filtration ne consomme que peu d'eau : celle nécessaire à l'abaissement de la température des gaz.

Les *appareils électrostatiques*, les plus récemment entrés dans l'industrie, sont la conséquence d'anciennes recherches de laboratoire qui ont pris une forme industrielle en 1906, à la suite des travaux de Cottrell, professeur à l'Université de Californie. Les gaz à épurer passent dans des chambres contenant des électrodes positives et négatives ; la précipitation des poussières



se fait au pôle négatif ; le courant est à très haute tension, de l'ordre de 60.000 à 100.000 volts.

Quant aux électrodes, elles sont constituées par des tôles placées dans des chambres en maçonnerie ou, plus fréquemment, par des tubes au centre desquels se trouve un fil tendu par un poids, le tube étant relié à la terre, le fil au courant.

La dépense de courant varie de 5 à 15 kilowatts pour 1.000 mètres cubes de gaz à la minute.

Notons que ce procédé, sur lequel nous allons insister ultérieurement, n'est peut-être pas aussi général qu'on le pensait au début, et que le degré d'humidité et l'acidité du milieu semblent jouer fréquemment un rôle de première importance.

II. LES INSTALLATIONS MODERNES. — Le résumé que nous venons de faire de l'ensemble des méthodes d'épuration des gaz nous fait voir que trois méthodes dominent la question :

Le lavage ;

La filtration ;

L'épuration électrostatique.

Il nous faut les examiner sous leurs formes les plus modernes, et cela particulièrement au point de vue comparatif.

1. *Méthode de lavage des gaz.* — Si nous laissons de côté l'épuration du premier degré des gaz de haut fourneau, qui est depuis longtemps au point, nous pouvons dire que le procédé de lavage, le plus répandu en Europe, est représenté essentiellement par l'appareil Theisen.

Ajoutons que cette extension du procédé ne

provient pas seulement de sa valeur, de sa simplicité et de certaines qualités que nous étudierons plus loin, ni de la généralisation si heureuse de l'utilisation des gaz, mais bien aussi d'un principe essentiellement important, qui trouve bien sa place ici.

Pendant fort longtemps — nous l'avons dit —

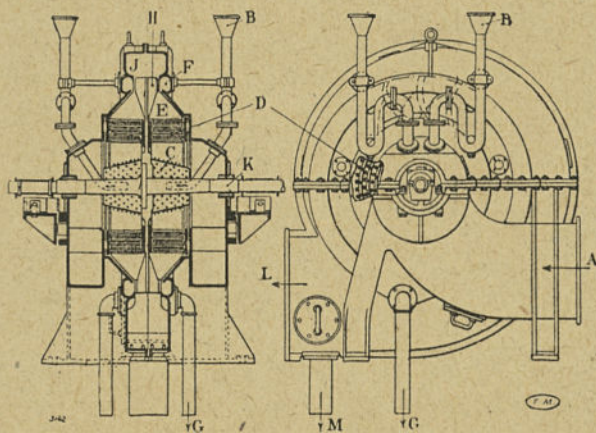


Fig. 26 et 27. — Appareil Theisen.

A, arrivée du gaz. — B, introduction de l'eau. — C, tambour perforé. — D, E, ailettes du tambour. — F, gouttière circulaire. — G, bassin d'évacuation. — J, bêche. — L, sortie du gaz. — M, évacuation de l'eau.

les gaz de haut fourneau étaient en quelque sorte divisés, après l'épuration du premier degré, les uns utilisés aussitôt pour les appareils de chauffage du vent, les chaudières, tandis que les autres, dont l'épuration était beaucoup plus poussée, alimentaient les moteurs à gaz.

Aujourd'hui, la tendance est très nettement accusée : il est avantageux que tous les gaz soient



épurés au second degré ; il s'ensuit, du point de vue rendement et entretien des appareils Cowper, des chaudières, des avantages certains.

Si l'on veut bien se rappeler qu'à une tonne de fonte correspond la production de 4.000 à 5.000 mètres-cubes de gaz, et que la teneur en poussières des gaz atteint le plus souvent 10 grammes par mètre cube, et même les dépasse, on conclut de ces chiffres classiques, qu'un haut fourneau, produisant 400 tonnes de fonte par vingt-quatre heures, réclame l'épuration de 1.600.000 à 2.000.000 de mètres cubes de gaz, et la séparation d'environ 16 à 20 tonnes de poussières par vingt-quatre heures.

Mais revenons aux appareils de lavage à leur forme actuelle : le Theisen (fig. 26 et 27).

On sait que le principe essentiel de cet appareil déjà ancien consiste à *battre* l'eau et le gaz au moyen de petites palettes tournant dans une auge fixe.

Mais bien des perfectionnements ont été apportés aux appareils, et la Société alsacienne de Constructions mécaniques qui, dans ses usines de Mulhouse, les construit en série, a singulièrement contribué à ces très intéressants perfectionnements. Le gaz traverse une couche d'eau, puis pénètre dans la partie en mouvement ; l'eau est alors projetée par une série d'aubages ; le liquide se trouve ainsi en contact avec le gaz ; projeté contre la paroi fixe de l'appareil, il retombe, entraînant une grande partie des poussières.

Les gaz sont alors très humides ; ils passent dans la seconde partie de l'appareil, dans laquelle de nouvelles aubés séparent la presque totalité de l'eau. Enfin, une boîte à chicane, dans

laquelle le courant gazeux change fréquemment de direction, enlève les dernières traces d'humidité, avant que les gaz ne gagnent les moteurs.

On voit qu'actuellement le Theisen est formé d'une série d'appareils ayant des fonctions distinctes et tous situés dans un même bloc.

Mais la partie réellement agissante est celle dans laquelle les gaz sont en quelque sorte mis en contact avec de l'eau très divisée ; c'est, avec la disposition générale de l'appareil, celle qui a subi les plus grands progrès ; actuellement, elle comporte deux cônes perforés à ailettes qui sont chargés de répartir l'eau que les gaz doivent traverser. Le mélange passe ensuite dans des tambours tournant en sens inverse et rappelant certains broyeurs utilisés pour les sables de fonderie ; c'est là réellement que se fait l'opération. Les autres parties de l'appareil ne servent qu'à produire la séparation de l'eau et du gaz.

On obtient ainsi un gaz renfermant moins de 2 centigrammes de poussières au mètre cube. Mais nous n'avons envisagé jusqu'à maintenant que la question du gaz ; il en est une, fort importante d'ailleurs, la séparation des poussières ; elle n'est point simple ; la boue, qui a pris naissance dans le Theisen, doit être décantée, d'où la nécessité de vastes bassins occupant de très importantes surfaces ; ceci correspond évidemment à une installation encombrante et fort coûteuse.

Mais une nouvelle solution a été adoptée, qui permet de décanter plus facilement. Elle a été décrite récemment<sup>1</sup> par M. Robert Jordan. Nous

1. Conférence à la *Société des Ingénieurs civils*, juin 1926.



tenons à reproduire ici cette partie de son fort intéressant mémoire.

« La Société alsacienne emploie maintenant, en combinaison avec ses désintégrateurs Theisen, des *bassins de décantation* particuliers, *système Neustadt*, qui permettent de résoudre le problème d'une manière tout à fait satisfaisante, comme l'on peut s'en rendre compte sur les figures 28 à 31.

« Ces bassins permettent une décantation méthodique et une extraction continue des boues, sans causer de remous ni de pertes d'eau, comme dans certains bassins à fonds coniques, et sans nécessiter l'emploi de vis sans fin, de godets, de pelles mécaniques, etc...

« L'eau traverse le bassin dans le sens de la longueur ; les matières lourdes descendent vers le fond et s'y rassemblent dans des caniveaux étroits, vers lesquels elles sont dirigées par des parois fortement inclinées qui ne peuvent donner lieu à adhérence. Lorsqu'un caniveau est rempli de boue, on l'isole du reste du bassin en abaissant une poutre triangulaire en béton armé qui forme couvercle. L'une des extrémités du caniveau est reliée au moyen d'une vanne à un canal d'évacuation ; lorsqu'on ouvre cette vanne, la pression de l'eau qui agit à l'autre extrémité du caniveau chasse la boue qui s'y est déposée. Un dispositif spécial, constitué par un diaphragme mobile qui suit le mouvement de la boue quand on opère la chasse, empêche les pertes d'eau.

« On voit que ces bassins n'ont pas besoin d'être vidés ; ils restent toujours pleins d'eau et fonctionnent d'une manière continue en conservant toujours le même volume utile. Plusieurs

bassins placés côte à côte peuvent marcher, soit en série, soit en parallèle, suivant que l'on désire ou non recueillir à part les poussières les plus lourdes, c'est-à-dire les plus riches en fer.

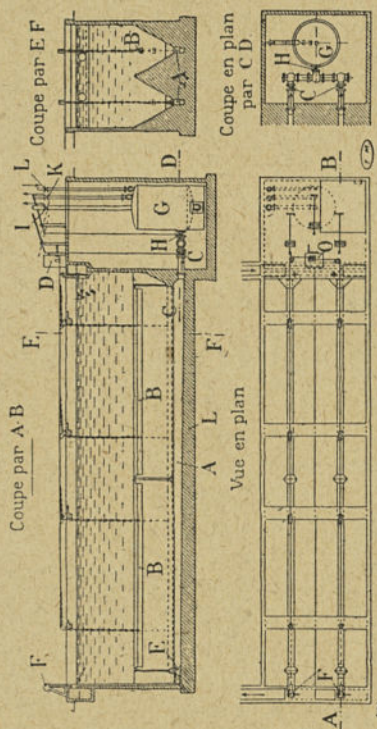


Fig. 28 à 31. — Bassin Neustadt.

A, caniveau à boue. — B, poutre triangulaire de fermeture. — C, vanne de la conduite de fuite. — E, diaphragme de séparation des boues. — F, tambour de commande du diaphragme. — G, réservoir à boues. — H, vanne du réservoir à boues. — I, vanne de la conduite de refoulement des boues. — K, vanne d'évent. — L, vanne d'air comprimé.

« Ces bassins permettent d'envoyer directement les eaux se refroidir dans des réfrigérants pour les réutiliser. Les pertes d'eau sont celles qui sont dues à l'évaporation dans les réfrigérants, soit de 3 à 5 p. 100, et celles qui se produisent au moment de l'évacuation des boues et que les précautions prises réduisent à 2 ou 3 p. 100. »



On voit que les bassins Neustadt sont de nature à permettre l'emploi de l'épuration humide même dans les usines où l'approvisionnement en eau présente des difficultés.

Nous indiquerons ultérieurement, dans l'étude comparative des procédés modernes, les avantages et les inconvénients du procédé de lavage. Cependant, signalons de suite que, seule, la sidérurgie l'emploie couramment, à l'heure actuelle.

2. *Procédé de filtration.* — Le procédé de filtration affecte différentes formes suivant les métallurgies considérées. Relativement simple en métallurgie du plomb, du cuivre et même du zinc, elle prend en sidérurgie une forme très complexe.

Nous allons donner de suite les raisons de ces différences : les facteurs dominant le problème sont avant tout la température, le degré d'humidité, la composition des gaz et aussi la densité et la ténuité des poussières. Le premier de ces facteurs est généralement de valeur nettement moins élevée dans les métallurgies autres que la sidérurgie ; par contre, il arrive bien plus souvent de trouver des gaz acides dans ces métallurgies, notamment de l'anhydride sulfureux, dont on connaît la tendance à se transformer en acide sulfurique et, par conséquent, à attaquer les tissus formant les sacs. L'humidité est élevée lorsque les gaz ont subi une première épuration humide, comme cela arrive souvent en sidérurgie. Enfin, dans certaines métallurgies — notamment celles du plomb — la densité des poussières aide à leur séparation, tandis que, dans d'autres opérations — notamment la con-

densation des poussières d'oxyde de zinc dans le traitement des minerais complexes — la finesse des produits à recueillir oblige à un choix précis des étoffes et conduit à l'utilisation d'appareils en série.

Si on laisse de côté la question, fort grave d'ailleurs, des gaz acides, que les tissus d'amiante peuvent résoudre, on peut dire que la filtration est moins aisée en sidérurgie que dans les autres

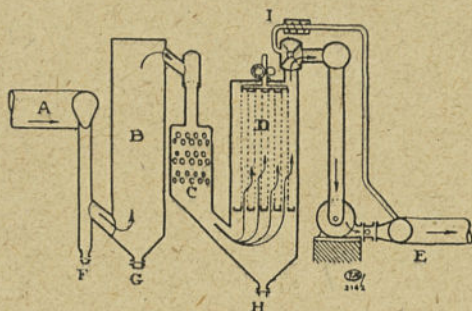


Fig. 32. — Appareil Halberg-Beth.

A, collecteur de gaz bruts. — B, refroidisseur par rayonnement. — C, réchauffeur de gaz. — D, caisses des filtres. — E, collecteur de gaz épuré. — F, poussières sèches. — G, poussières sèches du refroidisseur. — H, poussières des filtres. — I, petit réchauffeur du gaz de nettoyage,

métallurgies. De toute façon, il faut résoudre les différents points suivants : inattaquabilité et durée des sacs (par le choix d'une étoffe appropriée, généralement la laine, parfois l'amiante peu avantageux au point de vue de durée) ; refroidissement des gaz dans la plupart des cas (par injection d'eau, notamment, à la suite des appareils refroidisseurs ordinaires) ; mouvements des sacs de façon à faire tomber les poussières



qui y adhèrent et arrêteraient rapidement le fonctionnement de l'appareil ; ici, les solutions sont au nombre de trois : ou les sacs verticaux sont suspendus à un axe horizontal placé au-dessus d'une batterie et qui est soulevée automatiquement par des cames ; ou bien les sacs sont battus par des raquettes dont le mouvement cadencé est produit plus ou moins fréquemment (cette solution a été adoptée surtout dans les cas de sacs rectangulaires en amiante) ; ou enfin les sacs sont soumis périodiquement à une contrepression produite par le gaz lui-même. C'est le principe adopté dans les appareils Halberg-Beth qu'utilise particulièrement la sidérurgie. On connaît (fig. 32) la disposition générale de ces appareils que nous résumerons très brièvement.

Après avoir subi une première épuration grossière, le gaz arrive dans un refroidisseur qui abaisse leur température ; d'ailleurs on peut, si cela est nécessaire, injecter de l'eau sous forme de brouillard, afin de régler la température. On est aussi maître de celle-ci par une dérivation de gaz qui échappe au refroidisseur ; de plus, cette question de la température étant capitale, un réchauffeur permet de la régler entre 70 et 100° : au-dessous de 70°, il y aurait un colmatage des sacs ; au-dessus de 100°, il y aurait une altération très rapide de l'étoffe. Enfin, les gaz arrivent dans les appareils de filtration eux-mêmes ; ils comportent une caisse à compartiments, généralement au nombre de 11 ; chaque compartiment renferme un certain nombre de sacs cylindriques, ici en feutre de coton ; leur nombre peut varier de 20 à 35 ; leur diamètre est d'environ 20 centi-

mètres ; leur hauteur dans la partie filtrante, de 3 mètres.

Grâce à l'intervention d'un ventilateur, les gaz, dont le mouvement est ascendant, passent à travers les sacs et gagnent la conduite de refoulement.

Il est bien à remarquer que chaque compartiment peut être complètement isolé ; de telle sorte que, toutes les dix minutes, au plus, on injecte, dans le compartiment séparé des autres, un contre-courant gazeux ; en même temps, les sacs sont secoués par l'intervention de comes qui soulèvent les tiges de suspension ; les poussières tombent au bas de la caisse.

Les gaz sortant des appareils Halberg-Beth contiennent au plus 0<sup>st</sup>,02 de poussières au mètre cube ; généralement, ils sont refroidis pour en diminuer et le volume et le degré d'humidité, cela simplement par passage dans un réfrigérant à eau, et cette opération diminue encore la quantité de poussières contenues.

Nous donnerons plus loin des chiffres comparatifs intéressants relatifs à la filtration.

3. *Procédé électrostatique.* — Nous avons déjà rappelé le principe du procédé Cottrel, qui est la seule forme actuelle de l'épuration électrique. Résumons ici quelques détails de construction qui nous ont été donnés par M. Levêque, administrateur de la Société de Purification industrielle des Gaz.

En général, un appareil industriel est constitué par une série de tubes disposés verticalement -- leur nombre peut atteindre plusieurs centaines pour les installations à gros débit de



gaz — dont la hauteur est de 4 à 5 mètres, avec un diamètre de 20 à 40 centimètres.

Les gaz à épurer arrivent à la partie inférieure et sortent, débarrassés de poussières, à la partie supérieure. Selon qu'il convient ou non de les récupérer, l'appareil débouche à ciel ouvert ou dans une chambre étanche possédant une canalisation de départ.

Les cylindres sont généralement métalliques et reliés au sol. Les fils axiaux, fixés sur un cadre rigide, sont tendus par des contrepoids pendant librement dans la chambre inférieure d'arrivée des gaz.

Ces derniers sont reliés entre eux, de façon à éviter des mouvements pendulaires qui provoqueraient un décentrement.

Le cadre supérieur est supporté par des isolateurs convenablement disposés, pour éviter qu'ils ne soient recouverts par des poussières ou des gouttelettes de condensation en suspension dans les gaz, ce qui pourrait provoquer des défauts d'isolement et des mises à la terre.

Un dispositif ingénieux consiste à placer chaque isolateur dans une sorte de chambre entièrement close, reliée à la chambre des gaz par une tubulure concentrique au support du cadre. Cette tubulure constitue un petit cylindre de captation, qui purifie facilement la faible quantité de gaz qui pourrait parvenir à la chambre de l'isolateur. Ce dernier, se trouvant ainsi dans un milieu privé de toute particule, conserve indéfiniment des surfaces propres garantissant un parfait isolement. Les figures 33 à 35 représentent une vue schématique d'une installation industrielle.

Dans certains cas particuliers, où l'on ne peut

utiliser les cylindres, l'appareil de captation est constitué par une chambre rectangulaire portant alternativement des séries de plaques et de fils isolés parallèles. Les gaz traversent l'ensemble perpendiculairement aux fils tendus et parallèlement aux plaques.

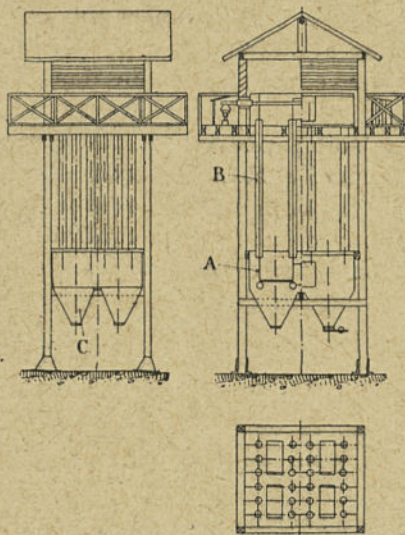


Fig. 33 à 35. — Épurateur électrique.

A, fil tendu par des contrepoids. — B, tube mis à la terre. — C, trémie d'évacuation des poussières.

Dans la généralité des industries, la quantité de poussières est relativement petite par rapport au volume des gaz traités. Ces poussières se déposent donc sous forme d'une couche demi-adhérente au cylindre. Trois ou quatre fois par jour, un dispositif de frappe les fait tomber dans des trémies disposées à la partie inférieure de l'appareil.



Les particules plus ou moins agglomérées peuvent retomber le long des parois sans être reprises par le courant gazeux ascendant, grâce à la vitesse sensiblement nulle de ce dernier au voisinage immédiat de la surface du cylindre.

Lorsque la quantité de poussières est considérable, on assure une récupération continue en perforant les cylindres ; les poussières sortent par ces orifices et sont recueillies dans une double enveloppe.

Quel que soit l'appareil, il doit être alimenté par un courant à haute tension. La nécessité d'un champ toujours du même sens rend indispensable l'emploi du courant continu.

Le pôle positif est connecté à la terre, tandis que le pôle négatif est relié au système de fils isolés.

La différence de potentiel est de 50.000 volts ; elle peut atteindre, dans certaines installations, 100.000 volts ; le débit est relativement faible, environ 0<sup>m</sup>,1 pour une installation de moyenne importance.

Une source fournissant un courant continu serait la solution idéale au point de vue rendement. Malheureusement, on ne peut envisager ni la machine statique, qui n'est pas encore parvenue à une forme et à un rendement industriels, ni la dynamo à courant continu, que l'on n'a pas encore réalisée pour produire directement de telles tensions, ni même une batterie d'accumulateurs, qui serait encombrante et d'isolement difficile.

La seule solution pratique consiste à utiliser un courant alternatif, dont on élève très facilement la tension à l'aide de transformateurs. Le

courant à haute tension ainsi obtenu est redressé, soit à l'aide de commutateurs tournants synchrones, soit à l'aide de soupapes à gaz ou à émission thermo-ionique.

Le courant redressé est constitué par les deux alternances du courant alternatif séparées par intervalle de repos plus ou moins long. Par

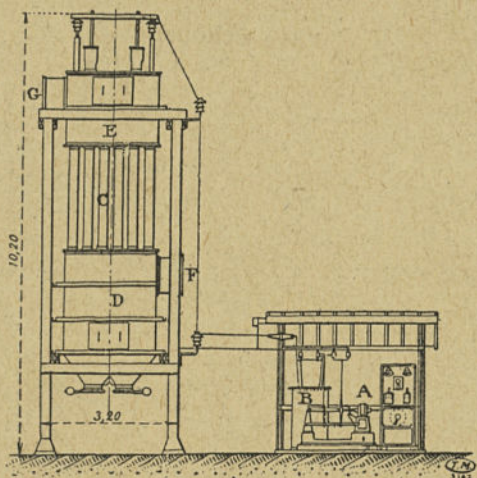


Fig. 36. — Dépoussiérage Cottrell.

A, redresseur tournant. — B, transformateur. — C, faisceau tubulaire. — D, chambre d'admission des gaz bruts. — E, chambre des gaz épurés. — F, entrée des gaz. — G, sortie des gaz.

suite, le potentiel et le champ électrique sont continuellement variables. Dans les cas spéciaux où la baisse de rendement qui en résulte serait préjudiciable, on peut connecter un condensateur aux bornes de l'appareil d'utilisation. Celui-ci constitue un réservoir d'énergie qui se charge pendant les maxima de potentiel, pour restituer



## L'ÉVOLUTION DE LA MÉTALLURGIE

son énergie pendant les temps de repos ou de potentiel faible. On peut obtenir de cette façon, par un choix judicieux de la capacité, une tension relativement constante aux bornes de l'appareil de précipitation.

La méthode a reçu tout d'abord de très nombreuses applications dans les métallurgies du plomb et du cuivre, dans les industries du ciment, des phosphates, et même des acides pour la condensation des vésicules.

Pendant fort longtemps, elle a échoué dans certains cas; mais il y a de grands progrès récents, notamment en ce qui concerne la condensation de l'oxyde de zinc; il apparaît que l'atmosphère gazeuse joue un grand rôle et que, notamment, son degré d'humidité et d'acidité doit retenir spécialement l'attention.

En ce qui concerne l'application du procédé à la sidérurgie, pendant fort longtemps il a été admis que l'on ne pouvait obtenir qu'une épuration du premier degré; on avait des gaz contenant encore  $0^{\text{sr}},1$ , parfois  $0^{\text{sr}},3$  par mètre cube. Il en a été ainsi dans les essais poursuivis aux aciéries de Firminy et publiés sous la signature de M. Barrière <sup>1</sup>: partant d'un gaz à 10 grammes de poussière au mètre cube, on a obtenu un gaz en renfermant de  $0^{\text{sr}},3$  à  $0^{\text{sr}},5$ ; la dépense moyenne d'énergie atteignait  $0^{\text{kw}},8$  par mètre cube-seconde de gaz, la tension étant seulement de 55 000 volts.

Il semble bien que, maintenant, la question se présente tout autrement.

Les usines de Dilling ont monté une sta-

1. *Revue de Métallurgie*, janvier 1925.

tion d'essais importante, puisqu'elle traite 10.000 mètres cubes de gaz à l'heure. Ces gaz, après une première épuration grossière, contien-

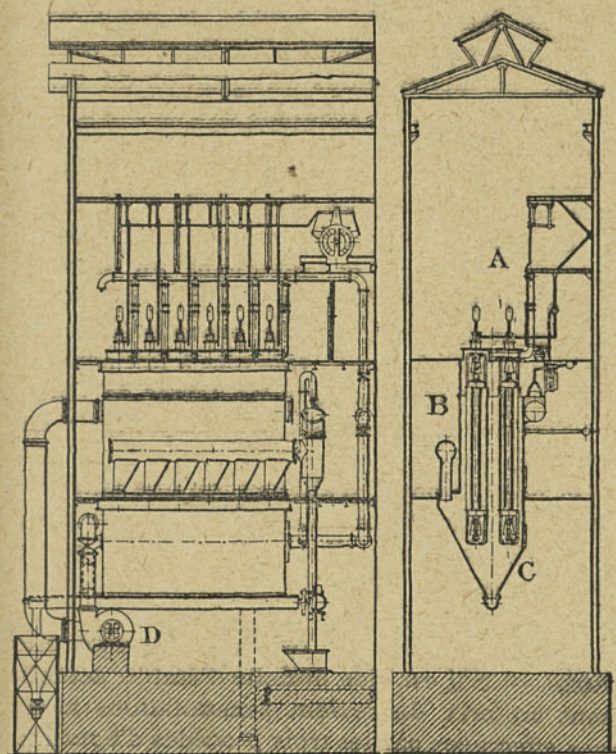


Fig. — 37. — Appareil Elga.

A, évacuation des gaz épurés. — B, tubes d'épuration. — C, trémie à poussières. — D, ventilateur.

nent encore 1<sup>er</sup>,5 à 2<sup>er</sup>,5 de poussière par mètre cube. La disposition, bien qu'analogue à celle généralement admise dans le procédé Cottrell, en



diffère cependant de façon assez nette et se rapproche, d'après les renseignements que l'on possède, des compartiments du procédé Halberg-Beth, les sacs étant remplacés par des tubes avec fils. Mais voici, ce semble, le point essentiel : il y a renversement périodique du courant gazeux, en même temps qu'agitation du fil. On est ainsi arrivé à des résultats extrêmement intéressants, puisqu'on a atteint constamment des chiffres inférieurs à  $0^{\text{sr}},02$  de poussière au mètre cube et même de  $0^{\text{sr}},003$ . Des résultats ont même été obtenus en augmentant la quantité de gaz passant à l'heure et atteignant un débit de 15.000 mètres cubes-heure.

On peut dire ainsi que le procédé électrostatique est entré dans une voie tout à fait nouvelle, tellement intéressante que les usines de Dilling montent actuellement une très importante installation.

On nous indique, d'ailleurs, qu'une autre installation, plus importante encore, est en pleine marche industrielle. Mais nous n'avons pas de détails précis.

III. COMPARAISON DES PRINCIPAUX PROCÉDÉS. — S'il est bien difficile d'établir actuellement un prix de revient d'installations identiques effectuées par les trois procédés d'épuration par voie humide, par filtration et par voie électrique, il est cependant possible de donner quelques chiffres précis et de faire ressortir quelques avantages pour chacun d'entre eux.

L'épuration au Theisen présente assurément une supériorité aux points de vue suivants : simplicité et sécurité dans le fonctionnement ; faci-

lité d'entretien; constance dans le rendement, celui-ci étant indépendant de la température, de la pression, de la composition des gaz, de leur acidité, de leur humidité; de plus, elle admet une grande élasticité dans le volume des gaz passant à l'heure, sans modification du rendement et du résultat. Enfin, elle occupe actuellement le minimum de place.

On lui reproche justement une forte consommation d'eau et d'énergie : on admet en général 500 litres minimum et 5 kilowatts par 1.000 mètres cubes de gaz. On conçoit que certaines usines ne peuvent envisager semblable dépense en eau. Cependant, avec les nouveaux bassins dont M. Jordan a donné la description déjà rappelée, on conçoit actuellement un circuit fermé pour l'eau nécessaire. Enfin, l'épuration humide fournit les poussières résiduelles sous forme de boues difficiles à manipuler, si ce n'est à utiliser.

L'épuration par filtration demande une consommation d'eau très faible; elle demande peu de force motrice, environ 3 kilowatts pris par les ventilateurs; elle donne de la poussière sèche. Mais elle est très délicate, parce que sensible aux variations de composition, de température et de quantité de poussières des gaz. Enfin, elle ne présente pas la même élasticité que le procédé par voie humide et est fort encombrante.

Dans sa très intéressante conférence, M. R. Jordan a cité des chiffres que nous devons donner :

Pour épurer 200.000 mètres cubes de gaz par le procédé Halberg-Beth, on peut employer 5 unités de 40.000 mètres cubes, soit 6 unités de 36.000 mètres cubes, soit 7 unités de 28.000 mè-



tres cubes, soit enfin 9 unités de 24.000 mètres cubes ; suivant les cas, la surface nécessaire est de 900 à 1.070 mètres carrés avec une largeur minimum de 25 mètres. A cette surface, il faut encore ajouter 187 mètres carrés pour les refroidisseurs et 170 mètres carrés pour le réfrigérant.

Une installation, faite dans une usine française par la Société alsacienne de Constructions mécaniques pour épurer par heure 210.000 mètres cubes de gaz au moyen de trois désintégrateurs Theisen de 70.000 mètres cubes de débit chacun, occupe 730 mètres carrés y compris 187 mètres carrés pour les refroidisseurs et 348 mètres carrés pour les appareils Theisen ; la largeur maximum est de 18 mètres. Une autre installation, réalisée par la même société pour épurer 140.000 mètres cubes-heure, avec deux appareils, nécessite 260 mètres carrés avec une largeur maximum de 15<sup>m</sup>,50.

Avec l'épuration sèche, il faut, pour épurer 160.000 mètres cubes-heure, combiner soit 4 unités de 40.000 mètres cubes, soit 5 unités de 32.000 mètres cubes occupant 630 ou 700 mètres carrés avec une largeur maximum de 20<sup>m</sup>,50.

Il est délicat de préciser ce qui concerne le procédé électrostatique, puisque, en fait d'épuration très poussée, on ne peut encore citer que l'installation de Dilling. Disons seulement que la consommation du courant a été, dans ces essais, de 2<sup>kw</sup> par 1.000 mètres cubes de gaz, y compris l'énergie nécessaire aux ventilateurs et aux transporteurs.

Sans doute, ces chiffres s'abaisseront-ils encore dans l'installation définitive plus importante.

Cette étude indique, d'une part, les immenses

progrès effectués durant ces dernières années dans les trois voies où se trouve la solution du problème examiné; elle montre, d'autre part, que le procédé électrostatique vient de faire un grand pas vers une solution définitive fort intéressante.

**L'utilisation des calories contenues dans les gaz résiduels.** — Depuis bien longtemps, cette question a préoccupé les métallurgistes, et la solution qui a paru la plus simple et qui est encore utilisée dans de nombreuses usines consiste à faire passer les gaz chauds sortant du four, dans des appareils dont le fonctionnement nécessite des températures relativement peu élevées, tout spécialement des chaudières. Actuellement le fait est encore courant : c'est ainsi qu'en métallurgie du cuivre, la transformation que subit l'opération de fusion pour matte, laquelle sacrifie le water-jacket au four à réverbère, entraîne l'utilisation des gaz à la sortie de ces appareils. On chauffe ainsi des chaudières susceptibles de produire toute l'énergie nécessaire à la marche de l'usine.

Mais, le plus souvent, les gaz chauds sortant d'un four servent, avant tout, à réchauffer les produits mêmes qui sont envoyés dans ce four en vue d'y produire la température requise. — Introduire, dans un appareil métallurgique, du gaz chaud et de l'air chaud, aux lieu et place de ces mêmes produits froids, c'est, nous l'avons déjà noté, ou bien obtenir dans le four une température plus élevée, ou obtenir plus économiquement la même température.

Nous avons déjà rappelé le principe même de la conception de Siemens et avons souligné



qu'elle a permis la création du four Martin. En outre, elle a entraîné la diminution de la consommation de combustible dans les fours à zinc et dans maints autres appareils métallurgiques, sans parler de ses conséquences dans les autres industries utilisant des températures élevées, telle la verrerie.

Bien entendu, le principe et même la disposition demeurent toujours semblables : quatre chambres de récupération, avec empilages de briques, fonctionnant deux par deux : deux de ces chambres sont traversées par les gaz chauds sortant du four, lesquels y abandonnent leurs calories, cela tandis que les deux autres chambres, chauffées dans le temps précédent, reçoivent l'une l'air froid, l'autre le gaz et les portent ainsi à une température élevée.

**L'utilisation de l'énergie contenue dans les gaz résiduels encore combustibles.** — Deux catégories de gaz résiduels présentent, du point de vue qui nous préoccupe ici, un intérêt de tout premier ordre : les gaz de hauts fourneaux ; les gaz de four à coke.

Tous deux à la sortie de ces appareils sont combustibles de par leurs compositions mêmes, d'ailleurs fort différentes. Tous deux peuvent être utilisés pour produire de la force motrice, problème que nous n'avons pas à étudier ici.

Mais le gaz de four à coke peut être employé pour chauffer des appareils métallurgiques, tels les fours Martin ; le gaz de haut fourneau servira, fait particulièrement intéressant et curieux, à réchauffer l'air qui assurera le fonctionnement même de ce haut fourneau.

L'UTILISATION DES RÉSIDUS

Voyons donc la composition de ce gaz :

|                           | GAZ<br>de haut fourneau. | GAZ<br>de fours à coke. |
|---------------------------|--------------------------|-------------------------|
| CO . . . . .              | 24 à 26                  | 6                       |
| CO <sup>2</sup> . . . . . | 11 à 13                  | 3                       |
| H . . . . .               | } 1 à 4                  | } 78                    |
| CH <sup>4</sup> . . . . . |                          |                         |
| N . . . . .               | 58 à 60                  | 10                      |

Ce tableau comparatif fait très bien ressortir la différence entre ces deux gaz, les seuls importants de la métallurgie, en tant que gaz résiduels combustibles.

Si nous examinons plus spécialement le cas du haut fourneau, nous trouvons son utilisation, du moins partielle, dans le chauffage du vent qui sera soufflé dans le haut fourneau. — Cette question du préchauffage du vent est très importante, puisqu'elle correspond à une économie considérable de coke, dans une opération où ce facteur est capital.

Nous avons déjà étudié cette question à propos de l'évolution de la métallurgie du fer ; nous avons vu comment on était passé des appareils Withwell aux appareils Cowper et comment ceux-ci avaient reçu récemment des perfectionnements importants par le soufflage des gaz.

Il est tout particulièrement intéressant d'insister sur le point suivant : le chauffage du vent nécessaire à la marche du haut fourneau ne nécessite l'emploi que d'une partie des gaz sortant de l'appareil. — L'expérience montre que 45 p. 100 seulement du gaz doit être ainsi utilisé, et cela pour chauffer l'air à des températures de 850 à 900°. Il reste donc disponible 56 p. 100 du gaz produit ; il faut évidemment produire la force



motrice nécessaire à la soufflerie même du four ; si les gaz chauffent des chaudières, lesquelles alimentent la soufflerie, on y dépense 45 p. 100 des gaz produits ; si les gaz sont directement utilisés dans des moteurs, 15 p. 100 seulement sont nécessaires. On voit donc qu'il reste disponible, en dehors du service même du haut fourneau (chauffage du vent et soufflerie) :

10 p. 100, si les gaz sont utilisés à la soufflerie par l'intermédiaire de chaudières ;

40 p. 100, s'ils sont employés directement, après épuration, dans les moteurs.

Si l'on veut bien se rappeler que, pour donner des chiffres moyens, chaque tonne de coke brûlée dans un haut fourneau donne 4.500 mètres cubes de gaz et que chaque tonne de fonte produite nécessite 900 à 1.200 kilogrammes de coke, on voit l'importance de ces gaz dans une usine ayant, par exemple, trois hauts fourneaux en marche produisant chacun 400 tonnes par vingt-quatre heures, et l'on peut se demander s'il s'agit bien d'une boutade, lorsque certains métallurgistes déclarent que le haut fourneau n'est qu'un vaste gazogène dont la fonte est le sous-produit.

On peut, d'ailleurs, se demander si le haut fourneau est le seul four à cuve dont le gaz présente de l'intérêt. Même en laissant de côté la question quantité de gaz produit, water-jackets et cubilots donnent un gaz très riche en anhydride carbonique, très pauvre en oxyde de carbone, qui n'est nullement combustible et ne peut être utilisé de par les calories contenues, lesquelles sont trop faibles. Un cas tout à fait exceptionnel : le gaz de fours à cuve traitant certains schistes bitumineux et cuprifères. Mais le gaz est tellement irrégulier que

l'on doit faire appel à une batterie de gazogène voisine. A signaler cependant que dans certains fours à cuves, on place au gueulard une série de tuyaux qui, entourés des gaz, chauffent l'air qui les traverse avant d'aller aux tuyères. Il ne s'agit ici que d'un chauffage par les chaleurs perdues.

**Utilisation des laitiers et scories.** — Deux problèmes se sont posés, d'importance d'ailleurs extrêmement différente, dans l'utilisation des laitiers et scories : d'une part l'emploi de la chaleur que ces produits entraînent hors du four ; d'autre part l'emploi même des laitiers et scories.

La première question est très secondaire ; cependant il faut signaler qu'en métallurgie du cuivre et du plomb quelques tentatives ont été faites dans la voie suivante : les laitiers et scories reçus, comme toujours, dans un récipient, séjournent dans un espace clos où se trouve un jeu de tuyaux dans lesquels passe l'air de soufflage du four. — On revient donc à la préoccupation déjà signalée : faire chauffer le vent de l'appareil producteur par les calories entraînées hors du four. — Les résultats n'ont pas été tels que le procédé se soit généralisé.

La seconde question est d'une importance considérable : l'utilisation industrielle des laitiers et scories. D'ailleurs, pour montrer tout de suite combien grave est le problème, il faut noter que la production d'une tonne de fonte donne une quantité de laitier qui varie de 0<sup>l</sup>,5 à 1<sup>l</sup>,2. Il y a donc des hauts fourneaux qui fournissent un poids de laitier supérieur à celui de fonte et il n'est pas rare de trouver des usines qui doivent évacuer



chaque année plus de 300.000 tonnes de laitiers.

Il est donc évident que la manutention et mieux l'utilisation de ces matières résiduelles préoccupe très justement les métallurgistes. Notons de suite que tous les laitiers et scories ne peuvent avoir la même utilisation. Les scories des métallurgies du cuivre et du plomb sont riches en fer ; elles possèdent une couleur noire foncée qui peut nuire à leurs emplois, notamment pour la préparation de matériaux de construction.

Dans l'état actuel de la métallurgie, voici ce que l'on peut signaler :

Avant tout, nombreuses sont les opérations métallurgiques qui engendrent des scories trop riches en métaux intéressants pour être rejetées ; elles sont passées à un appareil susceptible d'extraire ceux-ci.

Citons quelques exemples :

Les scories des opérations de conversion de mattes de cuivre ou de nickel sont envoyées au water-jacket ou au réverbère pour y être soumis à la fusion.

En métallurgie du plomb, les oxydes argentifères provenant des fours de coupellation sont traités séparément dans des petits fours à cuves pour être convertis en plomb argentifère.

Enfin, très fréquemment, notamment en métallurgie du plomb, on surveille, par voie d'analyse chimique, la teneur en métal intéressant des scories des fours de fusion, et si cette teneur dépasse une certaine limite, la scorie retourne au four à cuve. Ainsi, en ce qui concerne la métallurgie du plomb, on admet souvent le chiffre de 0,5 p. 100, qui sépare généralement les scories

devant être rejetées, de celles qui doivent être traitées à nouveau.

D'autre part, il est des scories intéressantes de par les produits qu'elles renferment, produits autres que les métaux mêmes. Il en est ainsi pour les scories de déphosphoration : on sait que dans la transformation de la fonte en acier, dans les procédés basiques, le phosphore passe dans la scorie qui renferme une teneur élevée en chaux. Le phosphate de calcium, qui prend naissance, conduit à utiliser ces produits dans l'agriculture comme engrais, après un simple broyage.

Quelquefois on mélange la scorie du Thomas, plus riche, avec la scorie du Martin basique, plus pauvre. Il y a donc là un emploi fort remarquable et intéressant de ce sous-produit de la sidérurgie, que l'on ne retrouve d'ailleurs dans aucune autre métallurgie.

En dehors de ces cas particuliers, le débouché capital des laitiers et scories se trouve dans la fabrication des matériaux de construction. Signalons d'abord la préparation de la laine de scorie, excellent calorifuge, que l'on obtient en envoyant normalement un jet de vapeur dans la coulée de la scorie.

Citons aussi l'emploi, sous forme de pavés, d'empierrement, etc., de certaines scories, notamment de celles des usines à cuivre du Mansfeld. On a soin, au moment de la coulée dans des moules rudimentaires, d'en opérer le refroidissement de façon lente, en jetant du sable à la surface de la matière chaude.

Des quantités importantes de ces résidus servent à la fabrication des briques silico-calcaires dont les tons ne sont pas toujours agréables et



dans lesquelles la présence du fer apporte une augmentation de poids souvent désagréable.

Enfin et surtout le laitier est utilisé, après granulation, dès la coulée, par entraînement rapide dans un courant d'eau et addition d'une assez forte proportion de chaux, dépassant parfois 40 p. 100 du poids du laitier, pour la préparation du ciment de laitier.

Ainsi voit-on sortir d'une même usine sidérurgique des moulages de fonte et des pièces moulées en ciment de laitier, des tubes de fonte et des tubes de ciment.

Et l'on peut bien dire que c'est là l'un des progrès les plus intéressants de la métallurgie que celui de ne rien laisser perdre et qui aboutit, non pas seulement à la production du métal, mais aussi à la meilleure utilisation des gaz résiduels, et enfin à l'immédiat emploi des laitiers et des scories.

## CHAPITRE IV

### LES PROGRÈS DES MÉTHODES D'ESSAIS DES PRODUITS MÉTALLURGIQUES

Les essais auxquels on peut soumettre les produits métallurgiques peuvent se classer en :

- Essais chimiques ;
- Essais mécaniques ;
- Essais physiques ;
- Essais physico-chimiques.

Quelle que soit la catégorie d'essais à laquelle nous nous adressons, nous y trouvons des progrès extrêmement importants, voire des créations de méthodes qui jouent un rôle scientifique et industriel considérable.

Par quelques mots d'histoire, par quelques exemples particulièrement nets, nous nous efforcerons de faire ressortir ces progrès accomplis depuis cinquante ans. La plupart d'ailleurs sont d'origine française.

**Essais chimiques.** — Pendant fort longtemps, ils ont été à peu près les seuls pratiqués de façon courante et, jusqu'au moment de l'introduction des essais mécaniques, ils ont joui d'une suprématie marquée.



Comme méthodes permettant de déterminer la composition chimique des produits métallurgiques, ils ont subi des perfectionnements très remarquables, tant au point vue rapidité des opérations que précision et simplification.

Il faut signaler le développement pris par les méthodes électrolytiques qui, fort précises, immobilisent très peu le personnel, peuvent fonctionner de nuit sans surveillance et peuvent aisément se monter en série.

D'ailleurs, la rapidité de l'opération devient vraiment extraordinaire par l'emploi des électrodes rotatives ou de tout autre principe permettant de maintenir l'homogénéité du liquide, malgré son épuisement, tel que l'utilisation d'agitateurs, l'emploi d'un champ magnétique puissant formant solénoïde au centre duquel se trouve l'électrolyte.

On peut déposer 1 gramme de cuivre en vingt minutes.

D'autre part, l'analyse volumétrique a fait des progrès fort intéressants et on l'applique couramment au dosage du phosphore, du nickel, etc., etc.

Que d'exemples devraient être cités de méthodes apportant de la précision, sans diminuer la rapidité des opérations !

D'ailleurs, M. Charpy n'a-t-il pas montré comment devait être organisé un laboratoire industriel moderne, du point de vue chimique, en lui appliquant les règles générales de rationalisation.

Et cependant il est incontestable qu'il reste beaucoup à faire et l'on note constamment des discordances importantes dans les analyses d'un

même produit très homogène faites dans différents laboratoires. En dehors du coefficient personnel de l'opérateur, des causes d'erreur proviennent de différence dans les méthodes utilisées.

Il n'est plus question d'ailleurs de demander aux essais chimiques de caractériser les qualités d'un produit métallurgique ; c'est une indication, toujours précieuse, souvent indispensable, mais dont les résultats doivent être rapprochés de ceux obtenus par les autres méthodes.

Ils ne donnent d'ailleurs, dans la plupart des cas, aucune indication sur le traitement subi par le métal. Il faudrait les appliquer avec de grandes précautions pour distinguer un acier recuit d'un acier trempé, et surtout d'un acier trempé et revenu, et encore n'aura-t-on pas la prétention de fixer ainsi l'intensité du traitement. Actuellement on ne peut reconnaître par l'analyse chimique un bronze trempé ou recuit, un alliage coulé ou laminé, etc...

Enfin les produits métallurgiques sont bien rarement homogènes ; l'analyse chimique doit donc être interprétée avec grandes précautions et les prises d'échantillons réclament des soins tout particuliers.

D'autre part l'essai chimique peut avoir la prétention d'aller plus loin et de séparer les constituants des alliages. Sans doute, existe-t-il quelques exemples où la méthode a donné d'heureux résultats ; mais à côté de ceux-ci, que d'erreurs commises, que de combinaisons qui n'ont jamais existé. Il est de toute évidence que l'action d'un réactif peut bien isoler les cristaux d'une combinaison, du moins s'il est convenablement choisi ;



mais rien ne dit que ces cristaux soient purs et n'englobent pas de l'eau-mère. L'étude chimique des alliages doit être constamment guidée par le microscope.

Mais il est un autre rôle capital des essais chimiques, c'est la détermination de la plus ou moins grande résistance des alliages aux divers réactifs ; c'est toute l'étude des phénomènes de corrosion que nous analyserons ultérieurement.

**Essais mécaniques.** — Le premier essai mécanique se traduisant par des chiffres précis, qui fut systématiquement appliqué aux produits métallurgiques, est l'essai de traction. Il est bien à noter qu'il est demeuré à la base des cahiers des charges, et cela malgré ses nombreux inconvénients : nécessité d'utiliser des machines coûteuses et encombrantes, emploi d'éprouvettes importantes, exigeant beaucoup de métal, souvent impossible à prélever, etc., etc.. Mais il présente incontestablement l'intérêt d'une longue existence, il traduit des habitudes prises et qui ne sont point blâmables ; il donne des chiffres que l'on manie aisément et qui entrent même dans les formules de la résistance des matériaux. Les progrès que l'essai de traction a reçus depuis cinquante ans ne sont pas de faible importance : les machines elles-mêmes sont mieux construites, elles assurent notamment, par des amarrages aisés des éprouvettes, leur traction régulière suivant l'axe ; les enregistreurs, du moins pour quelques types, sont très heureusement compris ; une bonne précision a été apportée dans l'essai lui-même, les types d'éprouvettes, — bien que tous ne soient pas convaincus de la fameuse loi de simili-

tude —, la vitesse de la machine, etc. On a créé des méthodes particulières pour déterminer les deux valeurs les plus délicates : la limite élastique, pour laquelle l'élégante méthode de Frémont utilisant des éprouvettes tronconiques ne s'est peut-être pas assez généralisée et le module d'élasticité que le nouveau dispositif Guillery permet d'avoir assez aisément.

D'autre part, on a aussi perfectionné les appareils permettant les essais à température élevée et l'on a enregistré de très beaux travaux sur ce sujet.

Mais de nouvelles méthodes d'essais mécaniques ont été créées, soit en vue de faire apparaître de nouvelles propriétés de la matière, soit en vue de simplifier les essais existants.

De ce dernier point de vue, il faut signaler l'essai de dureté à la bille qui s'est vulgarisé d'une façon inimaginable, notamment sous l'influence des fabrications de guerre. On en connaît le principe : sur la surface dressée du métal à essayer est appliquée une bille d'un diamètre déterminé (en général 10 millimètres) sous une charge connue (le plus souvent 3.000 kilogrammes, du moins pour les métaux de dureté élevée ou moyenne). Il s'ensuit une empreinte gravée dans le métal ; on en mesure aisément le diamètre dans le plan d'affleurement, on en déduit la surface de la calotte sphérique imprimée dans la pièce et le chiffre de dureté est donné par la relation :  $\Delta = \frac{P}{a}$ , P étant la charge ; a, la surface de la calotte sphérique. D'ailleurs des tables à double entrée donnent le chiffre  $\Delta$  en fonction de la charge et du diamètre de l'empreinte.



On conçoit bien la simplicité de la méthode ; on se rend compte du contrôle local qu'elle permet. Mais il y a plus : on a, en effet, la relation  $R = C \times \Delta$ , dans laquelle  $R$  est la charge de rupture à la traction ;  $C$ , une constante ;  $\Delta$ , le chiffre de Brinell. Ceci n'est vrai qu'à condition d'opérer sur métal recuit, et  $C$  n'a été très bien déterminé que pour quelques séries de produits métallurgiques : acier, cuivre, laitons, aluminium.

D'autre part, l'essai de dureté, qui peut réellement être mis entre les mains des ateliers, constitue un excellent moyen de contrôle des traitements thermiques, cela en limitant simplement les chiffres à admettre après trempe et revenu, sans se préoccuper des relations complexes avec l'essai de traction ; de même l'essai de dureté donne fort bien une idée du degré d'écrouissage. Bref, la méthode de la bille est assurément l'une des plus répandues, l'une des plus simples, l'une des plus intéressantes parmi les méthodes d'essais mécaniques.

Toutefois, elle échoue là où la dureté est trop élevée ; l'empreinte est trop faible, la bille se déforme. La méthode de Martens — qui mesure la largeur d'un trait de diamant produit dans des conditions déterminées — est délicate et reste du domaine du laboratoire ; celle de Shore, dans laquelle on mesure le rebondissement d'un tout petit marteau, est trop incertaine. Il faut signaler le procédé Rockwell qui utilise une pyramide de diamant dont on mesure l'enfoncement, méthode coûteuse par le prix de l'appareil même, si ce n'est par son entretien et le procédé du pendule qui a été réellement inventé en France par

Le Rolland et est allé recevoir un baptême industriel en Angleterre. Cette dernière méthode, qui mesure l'amplitude d'un pendule frottant à la surface du métal, demande encore une mise au point meilleure.

Si l'essai de dureté a pénétré, en quelques années, toutes les usines productrices ou consommatrices de produits métallurgiques, il y a un autre essai qui, lui aussi, a pris une très grande importance, parce qu'il met en vue un défaut de la matière que n'indiquent pas généralement les autres essais, à savoir la fragilité; il permet, d'ailleurs, de le chiffrer.

Sans doute, depuis Réaumur était-on préoccupé de la résistance au choc et avait-on cherché à remédier à la première méthode utilisée, laquelle consistait à laisser choir les matériaux sur des produits durs, tels des pavés, et de noter comment la matière se comportait. Des moutons, permettant de faire tomber des poids connus d'une hauteur chiffrée, soumettaient ainsi à un choc déterminé des éprouvettes généralement de section rectangulaire et l'on constatait ou la cassure de l'éprouvette, ou la courbure prise par elle, ou bien encore l'on comptait le nombre de chocs pour atteindre la rupture. La méthode nouvelle, qui a paru sous ses premières formes, vers 1892, sur la proposition de M. André Le Chatelier, utilise des barreaux entaillés sur la face opposée à l'impact, cela afin de créer une zone de fragilité qui permettra à l'éprouvette de se briser d'un seul coup de mouton. Mais il fallait mesurer de façon précise l'énergie nécessaire pour produire cette rupture. Après bien des tâtonnements, trois appareils furent créés en France et les pre-



miers utilisés : le mouton Frémont dans lequel on mesure au moyen de ressorts la force résiduelle d'un poids tombant d'une hauteur déterminée et ayant brisé l'éprouvette ; le mouton-pendule Charpy, dans lequel on note la hauteur à laquelle remonte un poids oscillant, après qu'il a cassé l'éprouvette au point le plus bas de sa course, et enfin l'appareil Guillery, constitué par un volant qui, portant un couteau, tourne autour de son axe horizontal et brise l'éprouvette, lorsqu'il a atteint une vitesse déterminée ; on note la diminution de vitesse aussitôt après cette rupture. Inutile d'ajouter que nombreux sont les coefficients qui jouent dans cet essai et qu'il faut bien préciser afin d'avoir des résultats comparables : la vitesse du couteau au moment du choc, la température de l'éprouvette, et surtout la forme de l'éprouvette et spécialement de son entaille ont une importance de premier plan et l'on a pu à peu près unifier ces conditions ; en tous les cas, il faut, en présence d'un chiffre déterminé, bien savoir comment il a été déterminé.

L'essai moderne de choc sur barreaux entaillés se traduit par un chiffre, la *résillance*. C'est le nombre de kilogrammètres nécessaires pour briser une éprouvette de forme et d'entaille déterminées, ce nombre étant rapporté au centimètre carré de la section pleine de cette éprouvette. Disons de suite que, dans la plupart des applications, un acier donnant 15 kilogrammètres (sur éprouvette de  $10 \times 10$  avec entaille de  $2 \times 2$  à fond rond) n'est pas fragile.

Il apparaît aujourd'hui comme incontestable que l'essai de choc sur barreaux entaillés rend les plus grands services, en mettant en vue une

qualité de la matière que ne décèle avec sécurité aucun autre essai.

Les autres essais mécaniques — d'ailleurs de pratique moins fréquente ou tout au moins plus spécialisée — les essais de compression, de cisaillement, de torsion ont reçu des perfectionnements assez notables, soit dans les machines qui permettent de les exécuter, soit dans l'établissement des relations qui les unissent à d'autres essais tels que celui de traction, plus complexe. Enfin l'essai de flexion tout spécialement permet la détermination du module d'élasticité et cela de façon aisée.

Quant aux essais de frottement, ils sont restés encore très incertains, malgré la création d'appareils intéressants, parfois très complexes, comme la machine d'Amsler, celle de la Compagnie des chemins de fer de l'Est. Enfin les essais aux efforts répétés ont pris, plutôt comme moyen d'étude, une réelle envergure. La forme sous laquelle ces essais sont les plus utilisés est certainement celle des essais aux chocs répétés. Ainsi ont-ils permis de noter quelques résultats fort remarquables, notamment la démonstration péremptoire de la relation étroite qui existe entre la résistance aux chocs répétés et la valeur de la limite élastique, donnant nettement l'avantage aux pièces pour lesquelles cette limite élastique est la plus élevée, tandis que la résilience ne joue qu'un rôle effacé, pourvu toutefois qu'elle ne possède pas une valeur trop faible.

Ne faut-il pas aussi faire ressortir toutes les belles recherches qui ont eu comme but — elles l'ont souvent atteint — d'établir des relations étroites entre les propriétés mécaniques, la com-



position chimique et la constitution des produits métallurgiques, faisant ainsi la démonstration que l'utilisation d'une seule méthode ne permet pas de voir clair dans cette question si complexe : la valeur d'un produit métallurgique.

**Essais physiques.** — Pendant fort longtemps, ces méthodes ont été considérées comme ne devant jamais franchir le seuil des laboratoires, exception faite cependant de quelques essais tels que la détermination de la densité et, dans quelques cas particuliers, d'ailleurs importants, la résistivité et le magnétisme.

Actuellement il n'est point de laboratoires industriels qui ne possèdent des appareils d'analyse thermique, des dilatomètres, et l'on voit même, depuis peu, dans certains ateliers, des appareils de contrôle d'aciers basés sur la thermo-électricité. Nous résumerons l'intérêt que présentent ces méthodes : l'analyse thermique permet de déterminer le diagramme d'alliages, ce qui est fait pour la généralité des alliages binaires, à peine ébauché pour les alliages ternaires ; un tel diagramme se compose du *liquidus*, ligne ou surface au-dessus de laquelle l'alliage est entièrement liquide ; du *solidus*, ligne ou surface au-dessous de laquelle l'alliage est entièrement solide et les lignes ou surfaces de transformation indiquant les températures auxquelles ont lieu des transformations dans le solide. En somme, le diagramme donne les domaines possédant des constitutions différentes et en précise les contours.

On ne peut nier son intérêt scientifique ; puisque ainsi se trouvent précisées l'existence de combinaisons, de solutions solides et leur stabilité en

fonction de la température, voire les réactions que peuvent donner certains constituants entre eux. Du point de vue intérêt industriel, la question est bien plus grave, elle est à la base même de tous les progrès que l'on peut faire dans la question des alliages. En effet, le diagramme thermique donne la variation du point de fusion finissante et commençante en fonction de la composition, des indications précieuses sur les liquations qui peuvent se produire dans la solidification, des précisions très grandes sur les traitements thermiques, et fixe tout particulièrement les températures de trempe ; et enfin du diagramme on peut déduire quelques données intéressantes sur les propriétés mécaniques, la dureté, la malléabilité, la fragilité, et même la variation de la conductibilité électrique... Lorsqu'on veut être renseigné sur la valeur de certains alliages, le premier geste doit être de consulter le diagramme, s'il existe et c'est pour cela qu'un tel atlas tenu à jour serait particulièrement précieux ; il serait le guide le plus sûr pour celui qui explore le champ des produits métallurgiques.

La dilatométrie permet de déterminer les points de transformation, souvent avec plus de précision que les appareils ordinaires d'analyse thermique. Ceux-ci, en effet, sont basés sur l'enregistrement des élévations de température qui se produisent pendant le refroidissement aux points critiques et peuvent laisser dans l'ombre des transformations très importantes. D'ailleurs les dilatomètres modernes, notamment ceux de Chévenard, sont des appareils simples et robustes ; certains même peuvent être mis dans les ateliers.

La thermo-électricité, méthode d'étude qui a



déjà donné lieu à des résultats fort remarquables sur les aciers, est devenue méthode de réception, à la suite des travaux de Galibourg. Nous indiquerons l'intérêt et le principe de la méthode. Nous avons dit les services rendus par l'essai à la bille, dans les usines mêmes, afin de classer les aciers. Cependant deux produits métallurgiques d'une même catégorie peuvent posséder même dureté à la bille et avoir deux compositions chimiques très différentes — donc des emplois non identiques — tout en accusant à la bille le même chiffre. C'est ainsi qu'un acier demi-dur à 0,4 p. 100 de carbone et un acier à 3 p. 100 de nickel et 0,2 p. 100 de carbone présenteront sensiblement le même chiffre Brinell, à l'état recuit ; qu'un laiton contenant 57 p. 100 de cuivre et 43 p. 100 de zinc donnera les mêmes résultats dans cet essai à la bille qu'un laiton à l'aluminium renfermant : Cu = 70 p. 100 ; Al = 4,5 p. 100 ; Zn = 25,5 p. 100. La conclusion est donc bien nette : l'essai à la bille est insuffisant pour classer les produits métallurgiques d'une même famille, y compris les produits spéciaux. Galibourg a justement pensé que l'on pourrait utiliser, du moins dans de nombreux cas, la force thermo-électrique du couple formé par le métal à essayer et celui que l'on recherche. Il est évident que, si les deux produits sont identiques, la force thermo-électrique — autrement dit la déviation d'un galvanomètre rejoint aux deux échantillons formant couple — est nulle. Pour réaliser aisément le couple et comparer l'échantillon réceptionné à des échantillons types correspondant aux différents alliages couramment utilisés dans l'atelier, Galibourg a établi une cuve à mercure chauffé légèrement

et comportant un nombre de compartiments égal à celui des échantillons de comparaison. Dans chaque compartiment se trouve un type différent de métal qui plonge dans le mercure, d'une part, et peut, d'autre part, être relié à l'une des bornes du galvanomètre. Le métal à essayer est saisi par une pince qui est reliée à l'autre borne du galvanomètre; on le plonge successivement dans chaque compartiment en ayant soin d'assurer la fermeture du circuit sur l'échantillon fixe qui est dans la même cuve. Si l'on constate une déviation très faible, on peut conclure, à même dureté Brinell, qu'il y a quasi identité chimique.

Une autre méthode physique appelée assurément à jouer, du point de vue scientifique, un rôle très important, est assurément l'examen aux rayons X. Déjà l'industrie l'emploie avec succès pour déceler certains défauts et constater notamment si les soudures sont de bonne qualité. Mais la méthode, orientée différemment, permet de mettre en vue le système cristallographique des substances métalliques, de déterminer par conséquent, les changements, souvent très profonds, qu'y apportent les traitements thermiques, et de constater même la disparition ou la précipitation de certains constituants.

**Essais physico-chimiques.** — Cette désignation peut être donnée aux essais dans lesquels l'observation se trouve d'ordre purement physique, mais après réaction chimique plus ou moins prononcée. Ainsi se trouvent englobées sous cette désignation deux méthodes, qui, toutes les deux, nécessitent — du moins dans la plupart des cas — une attaque du métal et qui, toutes deux, ont,



depuis vingt-cinq ans environ, un rôle capital dans le laboratoire de recherche, comme dans le laboratoire industriel : la métallographie microscopique ou micrographie, et la macrographie.

Disons de suite qu'il ne faut pas voir en elles des méthodes qui dominant toutes les autres et permettent même de supprimer tous autres essais. La question n'est point là : micrographie et macrographie constituent un aide des plus précieux, presque indispensable, à tous ceux qui veulent réellement contrôler les produits métallurgiques ; elles sont de toute première importance pour ceux qui poursuivent des recherches sur les produits métallurgiques. S'il paraît certain que dès le début du siècle dernier on observa parfois au microscope quelques échantillons de produits métallurgiques polis au microscope, si Sorby étudia de cette façon quelques météorites vers 1864, si quelques autres savants observèrent à la même époque quelques échantillons de fonte, on peut affirmer que la micrographie ne devint réellement méthode d'essais que sous l'influence d'Osmond qui, après avoir établi, avec Werth, la théorie cellulaire de l'acier, publia, en 1894, son magnifique mémoire sur la constitution des aciers au carbone. Osmond doit être vraiment considéré comme le créateur de la métallographie microscopique. D'autre part, Henry Le Chatelier, par ses recherches personnelles, par l'établissement d'une technique de polissage et de microscopes extrêmement aisés à manipuler, a singulièrement contribué à la vulgarisation de la micrographie et à son entrée dans les laboratoires industriels.

Il faut bien se rendre compte d'ailleurs que la

technique même de la métallographie demande quelque habitude, mais n'a rien d'aussi exigeant, d'aussi astreignant que le pensaient les premiers adeptes. On sait qu'il s'agit d'examiner au microscope, par réflexion, une surface parfaitement polie — afin de ne pas confondre les raies de polissage et les constituants —, puis attaquée par un réactif approprié, afin de mettre en vue les constituants, éléments chimiques, combinaisons, solutions solides. Préparation de l'échantillon, attaque, examen suivi, fort souvent, de photographie, tout cela est parfaitement codifié et en somme fort simple, grâce à la mise au point faite par Henry Le Chatelier.

S'ils nous faut naturellement renvoyer aux traités spéciaux pour tous les détails de cette technique, s'il ne nous est pas possible d'étudier ici les résultats innombrables déjà acquis, nous voudrions, du moins, montrer tout l'intérêt que présente cette méthode.

Le microscope complète, avant tout, l'étude du diagramme thermique et même pour un domaine à deux constituants (dans le cas d'alliages binaires) permet de déduire — avec quelques précautions — la composition chimique, par évaluation de la proportion des deux constituants. Mais la forme des constituants, leur grosseur, leur rassemblement ou leur division sont autant de renseignements précieux. — On pourra ainsi définir un métal surchauffé, dont les propriétés mécaniques, notamment la résilience, seront diminuées; un métal *coalescé*, dans lequel les constituants seront rassemblés et qui sera peut-être plus aisé à travailler sur machines-outils, mais dont la trempe sera très délicate;



un alliage présentant la structure à maximum de rendement, tel l'*alpac* qui ne possède sa charge de rupture relativement élevée ( $R = 20$  kilogrammes par millimètre carré) que s'il présente bien cette structure à fines lamelles de l'eutectique.

Mieux encore, le microscope renseignera sur les traitements thermiques, sur les accidents d'ordre chimique; il permettra de suivre certaines fabrications, certains procédés, par exemple la cémentation et les nouvelles méthodes de recouvrement, les soudures, etc., etc...

Enfin c'est lui, le microscope — et le microscope seul — qui a permis la création de la théorie du titre fictif qui se trouve former une base solide à l'étude de nombreux alliages ternaires et que nous chercherons à esquisser plus loin.

On a souvent osé dire que le microscope permettait de trouver ce que l'on désirait : rien n'est plus faux, et seuls ceux qui l'ignorent peuvent être aussi affirmatifs; mais, par contre, c'est rendre un bien mauvais service que de proclamer qu'il se suffit à lui-même; ceux qui font semblable déclaration font aussi preuve de connaissances insuffisantes. Disons encore une fois que la micrographie présente un intérêt considérable, qu'elle demande une initiation plus délicate, plus profonde que la plupart des méthodes d'essais, et ajoutons qu'elle réclame indubitablement un grand tact, une sage prudence dans l'interprétation de ses résultats, cela d'autant plus qu'ils se traduisent généralement par une estimation et non un chiffre.

La *macrographie* est une méthode plus simple, en apparence du moins; elle réclame un outillage bien moindre puisqu'ici le métal, poli assez

grossièrement et attaqué, est simplement examiné à l'œil, quelquefois avec application directe de papier photographique. Cependant il faut souvent garder trace de l'image produite; une chambre photographique est nécessaire.

Inutile de noter ici que les résultats donnés par la macrographie sont essentiellement différents de ceux fournis par la micrographie. Dans la méthode dont nous parlons actuellement c'est avant tout l'organisation générale que l'on observera; les cristaux, les grains seront mis en vue; leur orientation générale, leur grosseur; et cela est déjà fort intéressant. Mais la macrographie pourra souvent montrer l'irrégularité de composition, les ségrégations, les impuretés; c'est par exemple une méthode des plus précieuses pour décalquer, en quelque sorte, grâce au papier photographique au bromure d'argent trempé dans une solution étendue d'acide sulfurique, les amas de sulfures qui peuvent exister dans les aciers; elle pourra aussi constater les hétérogénéités des traitements thermiques, cela grâce particulièrement au fameux réactif à base de chlorure de cuivre qui, sur un acier, donnera un dépôt de cuivre plus ou moins régulier. Elle renseignera aussi sur les traitements mécaniques, en mettant en vue les fibres du métal, leur sens, leur écoulement.

Enfin elle sera non moins précieuse pour certains traitements chimiques où elle fera apparaître la partie qui aura subi la réaction, permettra de la mesurer et même parfois d'en connaître la qualité.

Il faut donc regarder la macrographie comme une méthode très intéressante et ajouter qu'elle



a été, qu'elle est encore beaucoup trop négligée, alors que sa simplicité devrait lui attirer beaucoup d'adeptes, du moins chez ceux qui veulent voir et bien voir, jusqu'aux défauts de leurs fabrications.

Ces quelques pages montrent — de façon d'ailleurs bien imparfaité — les immenses progrès faits par les méthodes d'essais.

Presque inexistantes en 1880, elles se sont établies en moins de cinquante ans, avec une force, une assurance, vraiment remarquables; elles rendent chaque jour, au producteur comme au consommateur, des services dont on ne saurait dire tout le prix.

## CHAPITRE V

### LES ALLIAGES ET LEURS RÉCENTS PROGRÈS

**Généralités.** — Aucun problème métallurgique n'a donné lieu à un chapitre plus complexe et en même temps plus scientifique, que celui des alliages. Depuis 1883 et surtout depuis 1892, les recherches se firent systématiques, des Écoles prirent naissance, un mouvement considérable fut créé, et cela tout particulièrement en France, à la suite des beaux travaux d'Osmond et sous la très forte impulsion de Henry Le Chatelier.

Les méthodes d'étude se multiplièrent, comme il a été indiqué, et bientôt s'établirent de véritables lois qui restreignirent le champ d'investigation. Plusieurs volumes devraient être consacrés à ce sujet pour dépeindre et les progrès effectués et l'état actuel de la question.

Ici nous nous essaierons à montrer, par de larges coups de pinceaux, les traits les plus saillants de la question des alliages.

**Les aciers spéciaux.** — L'étude des aciers ordinaires, c'est-à-dire des alliages de fer et de carbone renfermant moins de 2 p. 100 de carbone et contenant quelques impuretés naturelles, telles



que manganèse, silicium, soufre et phosphore en quantités faibles, était loin d'être achevée — l'est-elle d'ailleurs actuellement? — que déjà on recherchait l'influence de certains corps incorporés volontairement. Il ne faut pas oublier, en effet, que la notion de fragilité, plus exactement la méthode moderne la mettant sûrement en vue, à savoir l'essai de choc sur barreaux entaillés, est de naissance récente et d'application tout à fait moderne — comme nous l'avons indiqué. C'est ainsi que l'on a pu mieux connaître la valeur des aciers ordinaires. Et que, même actuellement, on est bien mal renseigné sur certaines de leurs propriétés, telle que la résistance aux chocs répétés. Quoi qu'il en soit de notre savoir relatif aux aciers ordinaires, il faut reconnaître que les aciers spéciaux, c'est-à-dire les alliages de fer et de carbone, dans lesquels on incorpore volontairement un ou plusieurs éléments particuliers, ont apporté de véritables révolutions aussi bien dans la technique du travail des métaux que dans la construction mécanique. L'armement, l'automobilisme, l'aviation leur doivent leurs plus grands progrès.

Examinons donc — à grands coups de crayon — ce qu'ont été les progrès dus à l'emploi des aciers spéciaux.

L'outillage, plus exactement l'outil — qu'il soit de tournage, de perçage, de fraisage — a été le premier en date qui doive beaucoup à ces alliages.

Les additions de chrome ou de tungstène dans l'acier fortement carburé, ont devancé les aciers de construction. Le but poursuivi et atteint était double : augmenter la dureté du métal, après

traitement thermique, c'était notamment l'effet du chrome; pouvoir travailler de façon plus importante, sans redouter que le métal perde aussitôt la trempe, c'était l'effet du tungstène.

Mais ne commettons ici aucune confusion; ces additions, peu élevées d'ailleurs — 2 p. 100 environ — ne donnaient que de faibles avantages.

Il a fallu la magnifique étude, poursuivie par White et Taylor durant de nombreuses années, pour bouleverser réellement les principes du travail des métaux. Nous étudierons dans le chapitre suivant cette découverte capitale.

Toutes les graves préoccupations qu'ont fait naître les questions relatives à l'armement ont singulièrement coopéré à la création des aciers spéciaux. Tout particulièrement la lutte épique de l'obus et de la plaque de blindage a été à la base de la mise au point des aciers nickel-chrome.

On sait que, après les premières ceintures en fer trop faiblement protectrices et le métal compound, formé d'une plaque de fer et d'une plaque d'acier dur trempé, cette dernière étant placée à l'extérieur, on a été tout naturellement conduit, afin d'éviter la séparation des deux parties, à un métal pouvant être cémenté. Ce procédé, inventé par Harvey, conduisit à l'emploi de l'acier au nickel; puis de l'acier nickel-chrome, renfermant  $C = 0,200$ ;  $Ni = 2,5$ ;  $Cr = 0,6$ . — La plaque cémentée, soit au charbon de bois, soit par le gaz d'éclairage, était trempée à  $850^{\circ}$ .

Mais les résultats les meilleurs ont été obtenus par le procédé Krupp qui lui aussi emploie un acier nickel-chrome; il a pour composition :

$$C = 0,3 \text{ à } 0,4; \quad Ni = 3,50 \text{ à } 3,75; \quad Cr = 1,75 \text{ à } 2,00.$$



Le métal est cémenté, il est trempé à 825; puis réchauffé à 625 et encore trempé. — Après « gabariage », la plaque subit une dernière trempe caractéristique du procédé; elle consiste à chauffer inégalement la plaque d'ailleurs placée dans un four, la face dure dégagée, le reste enfouie dans une garniture réfractaire. Seule la face dure est ainsi trempée.

Ce procédé ne s'applique pas à des épaisseurs supérieures à 150 millimètres.

Un autre procédé, fort élégant, dû à Charpy, permet de résoudre ce problème. On part d'un acier nickel-chrome à  $C = 0,100 - 0,150$ ;  $Ni = 6$ ;  $Cr = 0,5 - 0,7$ ; on cimente l'ébauche de laminage et comme la présence de 6 p. 100 de nickel abaisse le point de transformation, le traitement se fait en une trempe unique.

La dernière guerre a soulevé la question des plaques parabolles. Là encore les aciers nickel-chrome, et peut-être mieux encore les aciers nickel-vanadium ( $C = 0,120$ ;  $Ni = 7$ ;  $Va = 0,3$ ), ont permis de résoudre cet important problème.

Quant aux obus, ce sont ou les aciers ordinaires, trempés et revenus, ou la fonte aciérée ou, pour les obus de rupture, les aciers nickel-chrome qui donnent les solutions désirées.

Ces derniers sont maintenant utilisés de façon courante dans les industries de l'automobilisme et de l'aviation, lesquelles ont d'ailleurs conduit à des progrès importants que nous allons signaler.

Quelques mots d'histoire nous paraissent ici nécessaires pour bien situer l'évolution des aciers spéciaux : il est bien entendu que la première utilisation d'aciers spéciaux se trouva dans la

préparation des outils; puis vinrent les aciers chromés — étudiés aux États-Unis, mis au point par Brustlein, aux usines Jacob-Holtzer, et employés dans la fabrication des obus. — Mais un point très curieux est le suivant : le premier acier au nickel découvert fut l'acier à haute teneur, le ferro-nickel, contenant 25 p. 100 de nickel et 1 p. 100 de carbone. — Ce métal extrêmement curieux fut préparé, pour la première fois, en 1883, dans une usine parisienne, par Marbeau; il fut ensuite fabriqué sur une plus large échelle à l'usine de Montataire. Cet alliage avait des propriétés très remarquables et était notamment adouci par trempe. Ce n'est que quelques années plus tard, vers 1888, que l'on songea aux aciers de construction ou plus exactement aux aciers destinés à l'armement et ne renfermant que 2 à 3 p. 100 de nickel. A la même époque, d'ailleurs, Sir Robert Hadfield découvrait l'acier au manganèse, renfermant 13 p. 100 de ce métal, qui lui aussi s'adoucit par trempe.

Ainsi donc les deux premiers aciers spéciaux — découverts après les aciers à outils et les aciers chromés — sont tous deux à doses massives de corps étrangers, s'adoucissent tous deux par trempe, et cela parce que — on l'a su dans la suite — ils possèdent la constitution des aciers ordinaires à température élevée, ils sont *austénitiques*.

Les industries de la construction automobile et de l'aviation ont fait plus encore pour le progrès des aciers spéciaux que l'armement. Elles ont dû résoudre des problèmes particulièrement importants, certains même angoissants.

L'un des premiers a été celui de l'obtention de



pièces possédant une surface très dure et ne présentant, quant à l'âme, aucune fragilité. C'était tout le problème de la cémentation qui se posait avec beaucoup plus de précision, d'acuité même, que pour les plaques de blindage. Et l'on doit reconnaître que c'est l'industrie automobile qui a conduit à l'étude scientifique de tous les facteurs de l'opération, aussi bien au point de vue cémentation même qu'au point de vue traitement thermique de la pièce carburée superficiellement. Ainsi furent établis le principe et la pratique de la double trempe : la pièce de nuance extra-douce, contenant, dans la partie cémentée, aux environs de 0,1 p. 100 de carbone et superficiellement environ 1 p. 100 de ce corps doit, si l'on veut avoir les deux qualités requises : grande résilience de l'âme, dureté très élevée de la périphérie, subir deux trempes successives :

L'une vers 925°, qui a pour effet de régénérer l'âme de la pièce devenue fragile par le chauffage inhérent à la cémentation ;

La seconde vers 850°, qui a pour but de donner le maximum de dureté à la surface.

On s'explique fort bien la nécessité absolue de cette double trempe : la première, pour produire son effet de régénération, doit être faite à température nettement supérieure au point de transformation de l'âme (875°-890°) ; elle donne une dureté périphérique insuffisante, parce qu'elle produit, dans la partie renfermant 1 p. 100 de carbone, une hypertrempe partielle ; d'où la nécessité d'une seconde trempe à température plus basse. Inutile de noter que l'ordre des deux opérations ne peut être inversé.

Mais, devant un tel traitement coûteux, complexe et précis, on a cherché une simplification, en se préoccupant d'améliorer les qualités de l'âme, en augmentant simultanément résistance et résilience. D'où l'emploi de l'acier à 2 p. 100 de nickel, dont les débuts furent difficiles et qui fut singulièrement amélioré, quant à la dureté, à l'homogénéité et aux qualités physiques, par l'addition de chrome. On parvint ainsi au type actuellement utilisé de façon courante :

$$C = 0,1; \quad Ni = 2; \quad Cr = 0,3,$$

cela sans parler des types plus coûteux renfermant 4, 5 et même 6 p. 100 de nickel.

Ajoutons de suite que c'est aussi l'industrie automobile et l'aviation qui profiteront le plus de la découverte toute récente de la nitruration. On en connaît le principe : si l'on soumet de l'acier doux porté à 500° à l'action d'un courant d'ammoniac, il se forme des aiguilles de nitrure de fer dans toute la masse du métal, qui devient fragile; si l'on utilise dans une opération identique des aciers contenant de l'aluminium, ce dernier corps forme barrage à l'azote et il se forme en surface seulement un nitrure complexe d'une dureté extrêmement élevée, la plus forte que l'on connaisse actuellement. Bien entendu, l'effet est obtenu ici sans aucune trempe, par simple cémentation à l'ammoniac et cela vers 500°, donc à température basse, ne produisant pas de déformation, de telle sorte que, dans la plupart des cas, la pièce peut être terminée avant nitruration et n'a besoin d'aucune rectification.

Ajoutons que l'emploi d'aciers plus complexes, aciers chrome-aluminium, aciers nickel-chrome-



aluminium et même aciers nickel-chrome-aluminium-molybdène, permettent de résoudre la plupart des problèmes dans lesquels il est intéressant, voire indispensable, d'atteindre en surface le maximum de dureté.

C'est là assurément l'une des nouveautés les plus sensationnelles, sortie entièrement des recherches théoriques poursuivies par Fry sur le diagramme fer-azote.

Nous ne pouvons évidemment indiquer ici toutes les recherches, toutes les découvertes relatives aux aciers spéciaux; nous devons nous borner aux résultats qui marquent le mieux leur évolution; de ce point de vue, la création des aciers nickel-chrome trempant à l'air doit retenir quelques instants notre attention; ces aciers ont une composition assez variable; cependant les plus courants demeurent dans les limites suivantes :

$$C = 0,25 \text{ à } 0,35; \quad Ni = 3 \text{ à } 5; \quad Cr = 0,5 \text{ à } 1. \quad 100.$$

Ces aciers ont la propriété suivante : chauffés vers  $850^{\circ}$  et refroidis simplement à l'air, ils prennent la trempe et possèdent les qualités requises par un très grand nombre de pièces, notamment les engrenages. Leurs caractéristiques mécaniques peuvent se résumer de la façon suivante :

$$R = 130 \text{ à } 150; \quad E = 110 \text{ à } 130; \quad A p. 100 = 8 \text{ à } 12 \\ \rho = 7 \text{ à } 12.$$

Bien mieux, si l'on craint — et l'on a souvent raison d'éprouver ce sentiment — si l'on craint de ne pas avoir une dureté superficielle assez élevée, notamment pour les engrenages de changement

de vitesse, on peut produire une très légère cémentation superficielle de 2 à 3 dixièmes de millimètre et l'on a ainsi une grande sécurité, jointe à une simplicité remarquable de traitements.

Un autre grave problème a été posé par les moteurs modernes, celui des soupapes; il a été résolu de différentes façons; au début, on s'est adressé aux aciers à haute teneur en nickel; les difficultés d'usinage, quelques autres mécomptes les ont fait délaïsser; l'acier à 5 p. 100 de nickel avec 0,25 p. 100 de carbone, s'est généralisé; mais il a montré son insuffisance dans les moteurs très poussés, et actuellement deux solutions dominant le problème: celle donnée par les aciéries d'Imphy, avec l'acier ATV, comporte de fortes doses de nickel, de l'ordre de 60 p. 100; il conserve ses propriétés à températures assez élevées (500°), et les aciers étudiés par l'Ingénieur général Grard ayant pour composition:

C = 0,4 p. 100; Cr = 12 p. 100; Si = 2,5 à 3 p. 100,

dont les points de transformation sont en dehors de la zone des températures où les soupapes travaillent.

Citons encore la découverte des aciers inoxydables, acier à 13 p. 100 de chrome, aciers chrome-nickel (Cr = 18 p. 100; Ni = 7 p. 100), dont la coutellerie use largement et qui rendent d'importants services dans tous les emplois à température allant jusqu'à 850°.

Certes, les aciers spéciaux n'ont pas encore permis de résoudre tous les problèmes posés; il faut encore, pour servir la mécanique moderne, des produits métallurgiques ayant aux hautes températures, disons 1.000 à 1.200°, une résistance,



une limite élastique bien plus élevées que celles actuellement connues ; des aciers possédant un module d'élasticité ayant une valeur bien plus forte que 22.000, chiffre auquel nous nous butons invariablement aujourd'hui. Sont-ce là des désirs irréalisables ? Ce serait ne pas connaître les progrès déjà effectués que d'affirmer aujourd'hui qu'aucune solution ne peut intervenir.

**Les fontes.** — Bien qu'utilisées sur une très large échelle, grâce à leur prix, à leur facilité de moulage et à la propriété qu'ont certaines d'entre elles de durcir, lorsqu'on les coule en coquille, et cela malgré des propriétés mécaniques qui ne sont pas toujours très heureuses, spécialement leur fragilité, les fontes ne sont pas encore fort bien connues du point de vue scientifique, et nombreuses sont les études qui se poursuivent pour préciser les relations qui existent entre leur constitution, leur valeur industrielle et les conditions qui président à leur élaboration.

Même en ne considérant que les fontes couramment utilisées et qui, d'ailleurs, sont fort complexes, de par leurs impuretés, manganèse, silicium, phosphore, soufre, etc..., on note des problèmes profondément angoissants, tel que celui récemment soulevé de *l'hérédité*. — Il mérite que nous y revenions plus loin (voir p. 172).

Mais aussi se pose, non moins intéressant, le problème des fontes spéciales, de celles dans lesquelles sont incorporés volontairement et en quantités plus ou moins importantes, certains éléments tels que nickel, chrome, aluminium, etc...

Sans doute sait-on déjà que certains de ces

corps aident à précipiter le carbone à l'état de graphite, notamment le silicium, le nickel, l'aluminium ; que d'autres, au contraire, retardent ou empêchent cette précipitation, spécialement le manganèse, le chrome ; qu'enfin d'autres corps vont former des combinaisons soit avec le fer, soit avec le manganèse pour modifier la valeur de l'alliage ; ici, on aura du phosphore de fer qui augmentera la dureté, mais aussi la fragilité ; là on trouvera du sulfure de manganèse nuisible au point de vue de la résistance au choc.

Mais le problème est bien plus complexe : il s'agit d'améliorer réellement et les propriétés mécaniques et même l'usinage. Les progrès réalisés au cours de ces toutes dernières années sont de la plus haute importance, bien qu'elles augmentent le prix de revient ; spécialement les additions de nickel seul ou de nickel et de chrome améliorant considérablement les qualités des fontes mécaniques.

Le nickel agit sur la fonte de trois façons différentes :

1° Il favorise la transformation de la cémentite (carbure de fer) en graphite ;

2° Il tend à diminuer la grosseur des éléments, spécialement du graphite ;

3° Comme dans les aciers, il entre en solution dans la ferrite (fer magnétique) et donne à la perlite la forme osmonditique.

Le nickel facilite donc l'usinage, en supprimant les points durs qui tendent à se former, surtout dans les parties minces des pièces moulées ; il augmente les propriétés mécaniques, notamment la charge de rupture ; le chrome agit par augmentation de la dureté.



Aux États-Unis, où ces fontes sont utilisées sur une très large échelle, notamment pour les cylindres et les pistons de moteurs, on ajoute 0,5 à 2 p. 100 de nickel avec 0,5 p. 100 de chrome.

On ajoute généralement 2 p. 100 de nickel et 0,4 p. 100 de chrome dans les cylindres de moteurs à gaz, de moteurs Diesel, de machines à vapeur à haute pression ; pour les corps de pompe et de compresseurs, et pour les engrenages taillés, les additions sont de 0,75 à 1,25 p. 100 de nickel ; 0,3 à 0,4 p. 100 de chrome. Avec 3 à 5 p. 100 de nickel, on obtient des éléments de résistance électrique très remarquables.

Ajoutons que, d'ailleurs, le traitement thermique des fontes suscite aussi de nouvelles recherches et que tout récemment Le Thomas présentait une note à l'Académie des Sciences montrant tout l'intérêt d'un recuit au point de vue de la destruction des tensions internes : il a pu établir clairement qu'il suffit d'une température de 600° pour ramener la fonte à un état tel qu'on n'ait plus rien à redouter de ces tensions parfois bien dangereuses.

**Les alliages de cuivre.** — Les trois grandes classes d'alliages de cuivre, à savoir les bronzes, les laitons et les bronzes d'aluminium, ont été, eux aussi, l'objet de progrès très remarquables durant ces dernières années.

Tout d'abord, on s'est préoccupé de mieux connaître les propriétés des alliages binaires eux-mêmes : cuivre-étain ; cuivre-zinc et cuivre-aluminium ; on a précisé l'influence des traitements mécaniques, notamment de ceux produisant de l'érouissage et créant, de ce fait, des tensions

internes ; d'autre part, si la trempe des bronzes paraît connue depuis l'antiquité, ce sont des travaux récents qui ont analysé ses effets, qui ont fixé les facteurs qui interviennent et enfin, en ce qui concerne la trempe des laitons et surtout celle si intéressante du bronze d'aluminium — nous en reparlerons —, ce sont des recherches datant de vingt ans à peine qui les ont découvertes et étudiées.

Mais, dans le domaine des alliages de cuivre, comme dans celui des produits sidérurgiques, c'est surtout l'incorporation volontaire de certains éléments qui a été la cause des progrès les plus marquants.

Si les bronzes renfermant du phosphore sont connus depuis longtemps, ce corps agissant comme agent de désoxydation et, s'il est en quantité suffisante, comme agent de durcissement, par suite de la formation de combinaison, les bronzes au plomb ont singulièrement évolué : ayant débuté avec des teneurs modestes — 2 à 8 p. 100 — de cet élément, ils en renferment souvent 30 et même 35 p. 100, le plomb gardant sa personnalité dans l'alliage et jouant le rôle d'un excellent lubrifiant ; mais on conçoit aisément que ces bronzes à haute teneur en plomb réclament, dans leur préparation, des soins tout particuliers, le plomb ayant de par sa densité élevée et son point de fusion faible une tendance à se rassembler, durant la solidification, dans la partie basse des pièces.

Dans le domaine des laitons, on a toujours cherché à améliorer les propriétés mécaniques, surtout au point de vue résistance — il ne saurait être question ici de frottement. Le problème s'est singulièrement simplifié sous l'influence de la



théorie du titre fictif que nous allons nous efforcer de résumer en quelques lignes.

Étudions au microscope les alliages de cuivre et de zinc, c'est-à-dire les laitons; nous trouverons que de 100 p. 100 de cuivre jusqu'à 63 p. 100 de ce métal, ils sont formés d'une seule solution solide, désignée par la lettre  $\alpha$ ; entre 64 et 54 p. 100 de cuivre, ils présentent deux solutions solides  $\alpha$  et  $\beta$  et la teneur en l'une d'elles est rigoureusement proportionnelle à la teneur en cuivre, la quantité de  $\beta$  allant en croissant lorsque la teneur en cuivre diminue.

Compliquons maintenant la question, en substituant au zinc une certaine quantité d'un troisième élément, par exemple l'aluminium. Partons de l'alliage type Cu = 67, Zn = 33 qui est formé d'une solution solide  $\alpha$ ; formons l'alliage Cu = 67; Zn = 26; Al = 4, qui a même teneur en cuivre que le précédent et dans lequel 4 p. 100 Al remplace la même quantité de zinc. Examinons-le au microscope; nous le trouverons formé, non pas d'une solution solide unique  $\alpha$ , mais bien des deux solutions  $\alpha$  et  $\beta$ , et de ces deux constituants seulement; on remarque, de plus, qu'ils sont dans une certaine proportion, la même que si l'alliage contenait simplement :

$$\text{Cu} = 58,5 \quad \text{Zn} = 41,5.$$

Nous dirons que le titre fictif de l'alliage est Cu = 58,5, tandis que son titre réel tel qu'il est défini par l'analyse chimique est Cu = 67. Bien mieux, les propriétés mécaniques de ce laiton à l'aluminium sont très éloignées de celles de l'alliage Cu = 67, Zn = 33, se rapprochent énormément de celles de l'alliage Cu = 58,5; Zn

= 41,5, en leur étant cependant nettement supérieures.

Bien entendu, il a été facile de relier le titre fictif au titre réel ; voici la formule générale :

$$A' = \frac{100 A}{100 + q (t - 1)},$$

dans laquelle :

A' est le titre fictif ;

A, le titre réel ;

q, la quantité de l'élément spécial ajouté ;

t, son coefficient d'équivalence, c'est-à-dire la quantité de zinc à laquelle se substitue 1 p. 100 de l'élément, la composition de l'alliage étant ramenée à 100.

On voit que :

si  $t > 1$ , A' est inférieur à A ;

si  $t < 1$ , A' est supérieur à A.

Les déterminations déjà faites montrent que l'on a pour les différents éléments les valeurs suivantes du coefficient d'équivalence :

$$t \text{ Si} = 10; \quad t \text{ Al} = 6; \quad t \text{ Mn} = 0,5; \quad t \text{ Fe} = 0,9; \\ \text{Ni} = - 1,3.$$

On voit donc que l'aluminium et le silicium donnent un titre fictif très inférieur au titre réel ; que le fer est sensiblement sans action ; que le manganèse produit un titre fictif un peu supérieur au titre réel et que le nickel agit très vivement dans le même sens.

Arrêtons-nous un peu sur les laitons au nickel qui ont été très étudiés et que l'on a beaucoup remarqués à la récente *Semaine du Nickel*, spécialement dans le stand de la Société Métallurgique de La Bonneville.



L'ÉVOLUTION DE LA MÉTALLURGIE

Trois types ont été créés correspondant à des propriétés mécaniques différentes et aussi — il faut y insister — à une résistance croissante à la corrosion et à des colorations qui atteignent le blanc pour le plus riche de ces alliages. Le tableau suivant résume les propriétés mécaniques les plus caractéristiques de ces alliages (il s'agit ici de produits laminés et recuits) :

| TYPE<br>du laiton. | ESSAI DE TRACTION |    |           |          | ESSAI<br>de dureté. | ESSAI<br>de choc. |
|--------------------|-------------------|----|-----------|----------|---------------------|-------------------|
|                    | R                 | E  | A p. 100. | $\Sigma$ | $\Delta$            | $\rho$            |
| A                  | 48                | 19 | 42        | 37       | 111                 | 9                 |
| B                  | 55                | 23 | 36        | 34       | 124                 | 8                 |
| C                  | 60                | 27 | 30        | 28       | 143                 | 6                 |

Il n'est question, dans ce tableau, que des alliages à l'état laminé et recuit. Ils sont susceptibles d'être écrouis et peuvent présenter alors des charges de rupture atteignant 75 kilog. avec des allongements de rupture qui sont encore de l'ordre de 8 ou 10 p. 100.

Il est fort intéressant au point de vue scientifique de noter que ces trois alliages ont sensiblement le même titre fictif correspondant à environ 57 p. 100 de cuivre.

On peut d'ailleurs combiner les additions d'un corps qui abaisse le titre fictif et d'un autre élément qui le relève, et cela en maintenant à l'alliage comme titre fictif le titre réel. On note alors des améliorations parfois très sensibles des propriétés mécaniques.

Mais ce serait une grave erreur de croire que tous les corps agissent purement et simplement par création d'un titre fictif. Il y a trois façons d'agir d'un tiers élément ajouté à un alliage binaire : celle que nous venons d'étudier, dans

laquelle le dit élément entre en solution dans le ou les constituants de l'alliage, peut créer un titre fictif, déplace le liquidus, le solidus, les points de transformation et, par conséquent, peut apporter des changements aux différents domaines du diagramme binaire, sans en changer les constituants; la seconde action possible d'un tiers élément est de garder purement et simplement son entité; ce cas est fréquent; il n'est intéressant qu'à un point de vue restreint; en général, les propriétés mécaniques sont diminuées; quelquefois cependant la résistance à l'usure, plus exactement le frottement, deviennent meilleurs; mais surtout la facilité de travail à l'outil est accrue par suite de copeaux moins longs, se rompant plus aisément et par conséquent se dégageant plus facilement. C'est notamment la raison — du moins en ne parlant pas du prix de revient — de l'introduction du plomb dans les laitons; enfin l'élément ajouté dans l'alliage binaire peut se combiner à l'un des métaux et donner un composé défini ou même une solution solide nouvelle, c'est-à-dire qui n'appartient pas au diagramme binaire initial; l'expérience prouve qu'en général ce nouveau corps est nuisible aux qualités mécaniques de l'alliage, sauf cependant au point de vue frottement; le plus souvent la dureté est augmentée, mais la fragilité est singulièrement accrue; parfois l'alliage présente une merveilleuse résistance à la corrosion (addition d'étain dans les laitons).

En un mot, on voit que l'introduction d'un nouvel élément dans un alliage binaire est surtout intéressant lorsqu'il entre en solution dans le ou les constituants du produit initial. Bien entendu, nous n'envisageons ici que le cas où ce nouvel



élément est introduit dans toute la masse du métal, formant ce que l'on est convenu de regarder comme un produit homogène ; nous ne parlerons qu'ultérieurement des questions des cémentations ou des revêtements produisant une couche superficielle ayant des propriétés déterminées.

Il est de toute évidence que la théorie du titre fictif est applicable à tous les alliages binaires ; mais le microscope ne permet de résoudre la question que si l'on se trouve, pour l'alliage ternaire, dans une zone à deux constituants du diagramme binaire initial.

Déjà de nombreuses études, fort concluantes d'ailleurs, ont été poursuivies sur les bronzes (alliages cuivre-étain), les bronzes d'aluminium (alliages cuivre-aluminium), les cupro-nickels, etc.

On peut même affirmer que les grands progrès faits dans la fabrication des bronzes d'aluminium ont été entièrement basés sur le titre fictif et l'influence de certains éléments tels que le nickel et le fer.

Il est peut-être bon de rappeler ici quelques-uns de ces résultats :

1° Les cupro-aluminiums au manganèse :

Al = 10,02 ; Mn = 0,92 ; recuit à 800°, R = 54,5 ;

A p. 100 = 31,0

Al = 10,02 ; Mn = 0,92 ; trempé à 800°, R = 71,7 ;

A p. 100 = 11 ;

Al = 9,99 ; Mn = 2,01 ; recuit à 850°, R = 55,8 ;

A p. 100 = 26,5

Al = 9,97 ; Mn = 2,01 ; trempé à 850°, R = 81,9 ;

A p. 100 = 3,5.

2° Les cupro-aluminiums au nickel :

Al = 9,70 ; Ni = 7,48 ; recuit à 800°, R = 75,5 ;

A p. 100 = 16,3.

LES ALLIAGES ET LEURS RÉCENTS PROGRÈS

Al = 5,21; Ni = 7,31; recuit à 800°, R = 49,0;  
A p. 100 = 41.

Al = 5,00; Ni = 1,00; coulé en coquille; R = 30,6;  
A p. 100 = 70.

3° Les cupro-aluminiums au fer :

Al = 9,16; Fe = 3,20; coulé en sable; R = 60,5  
A p. 100 = 25.

4° Les cupro-aluminiums au nickel et au fer :

Al = 1,25; Ni = 5,18; Fe = 5,31; recuit à 800°, R = 75,3;  
A p. 100 = 15.

On voit combien des additions relativement faibles de produits étrangers peuvent avoir une heureuse influence sur les propriétés mécaniques des alliages binaires, et cela tout particulièrement lorsque les éléments ajoutés entrent en solution dans les constituants normaux de l'alliage binaire initial.

**Les alliages légers et extra-légers.** — Si l'on examine tous les progrès faits depuis trente ans dans ce problème capital des alliages, capital au point de vue théorique, capital au point de vue industriel, on ne trouve aucun chapitre plus passionnant que celui des alliages légers et extra-légers.

Ce n'est pas le lieu de développer ici toutes les recherches faites, tous les diagrammes tracés; mais il nous faut au moins donner une esquisse des grands résultats obtenus.

En somme, tous les alliages légers sont à base d'aluminium; tous les alliages extra-légers sont à base de magnésium.

L'intérêt primordial de ces alliages réside dans



leur densité ; il croît évidemment avec la valeur des propriétés mécaniques.

Dans le domaine des alliages légers, on a eu, au début, deux préoccupations : la facilité de préparation de pièces moulées et surtout la facilité d'usinage de ces pièces, cela sans augmenter sensiblement la densité, tout au moins en ne dépassant pas 3, tandis que la densité de l'aluminium commercial est de 2,7 à 2,8. — D'ailleurs, à cette époque, aux environs de 1900, la seule prétention du consommateur, spécialement du constructeur d'automobiles, était d'avoir à sa disposition des pièces travaillant peu, notamment des boîtes destinées à envelopper les organes importants, des carters.

Sans doute a-t-on commencé l'étude systématique des alliages binaires, tels que aluminium-cuivre, aluminium-zinc, et l'on s'est buté, soit à une trop grande augmentation de la densité, soit à une altérabilité fort accrue. — Vers 1908, un fait nouveau fit sensation dans le monde métallurgique, on apprenait l'existence d'un alliage à base d'aluminium, ayant une densité inférieure à 3, qui offrait, après certains traitements assez mystérieux, une charge de rupture à la traction de 40 kilogrammes par millimètre carré avec 20 p. 100 environ d'allongements, alors que l'aluminium commercial laminé et recuit donne à peu près une charge de rupture de 10 kilogrammes par millimètre carré et 30 p. 100 d'allongements.

Bientôt la composition de ce duralumin fut connue ; on y trouvait quelques pourcentages de cuivre (4 à 5 p. 100), un peu de manganèse (1 p. 100) et des traces de magnésium (0,5 p. 100).

Inutile d'ajouter le succès qu'eut cet alliage, au moment même où la construction aéronautique prenait son essor.

Et cependant ce ne fut qu'après la guerre — sans doute parce que celle-ci avait interrompu les recherches de laboratoire ou plus exactement les avait dirigées vers des voies plus pressantes — que la théorie du duralumin fut établie, si tant est qu'elle le soit aujourd'hui.

Le fait brutal était le suivant : le duralumin présentait après laminage, ou filage à la presse, des propriétés auxquelles on pouvait s'attendre.

Mais le métal trempé dans l'eau à 475° voyait légèrement augmenter sa charge de rupture qui passait de 20 à 28 kilog. et diminuer fort peu ses allongements. Cela déjà étonnait, du moins à une époque où les idées générales relatives au phénomène de trempe n'étaient pas nées. Le fait, alors tout à fait surprenant, était le suivant : l'alliage ainsi trempé, abandonné à lui-même, à la température ambiante, voyait augmenter considérablement sa charge de rupture et l'on avait au bout de quelques jours :

$R = 40$  kilogrammes par millimètre carré,  $A p. 100 = 20$ ,

propriétés vraiment inespérées pour un alliage contenant près de 95 p. 100 d'aluminium.

C'est donc un traitement thermique qui donne au duralumin toute sa valeur. Nous aurons donc à examiner la question dans le chapitre suivant.

Disons cependant que l'on a cherché systématiquement à augmenter encore la valeur du duralumin par des additions plus complexes ; mais alors apparaissent des difficultés dans les traite-



ments mécaniques qui semblent avoir retardé l'apparition de ces produits dans l'industrie.

Par contre, le phénomène présenté par le duralumin a engendré d'autres recherches et nous verrons que, dans le simple domaine des alliages aluminium-cuivre, il a été obtenu des résultats très remarquables, grâce toujours à des traitements thermiques fort particuliers.

Un second fait, relatif au domaine des alliages légers, a été l'amélioration apportée aux propriétés mécaniques de l'aluminium, par de très faibles additions, plus faibles que celles de duralumin, alors que la résistivité est peu augmentée et, de ce fait, l'emploi si intéressant des câbles d'aluminium peut être singulièrement facilité. Mais là encore c'est au traitement thermique, né du duralumin, que l'on doit ce progrès.

Mais voici une troisième découverte bien intéressante : celle de l'*alpax*. C'est un alliage aluminium-silicium, correspondant à 13 p. 100 de cet élément, alliage léger (sa densité est un peu plus faible que celle de l'aluminium pur) correspondant à l'eutectique d'une solution solide d'aluminium à faible teneur en silicium et de silicium pur. Jusque-là, rien d'étonnant ; les alliages aluminium-silicium ont été très étudiés et l'on ne pouvait guère s'attendre à un fait nouveau. Et voici cependant ce qu'a découvert Pacz qui a donné son nom à ce produit : l'alliage de la composition indiquée acquiert des propriétés nouvelles, fort intéressantes, si, après fusion et avant coulée, dans certaines conditions de température, on ajoute certains sels alcalins ou alcalino-terreux ou même simplement du sodium.

Le microscope indique clairement le fait suivant : si l'on fond, sans précautions spéciales, les deux éléments : aluminium et silicium, l'alliage, après solidification, présente les deux constituants en grains assez grossiers ; si, au contraire, on apporte les soins indiqués par Pacz, on obtient cette structure caractéristique des eutectiques, dans laquelle les deux constituants sont fort divisés, ce qui correspond à un maximum de dureté. Il apparaît bien que ce soit là une bienfaisante action désoxydante et que le fait de détruire par le sodium ou d'entraîner dans une scorie la silice et l'alumine qui peuvent diminuer la facilité de dissolution des deux éléments permet l'homogénéité de l'alliage.

Cependant, il est certain que, si l'on coule l'alliage aluminium-silicium à 13 p. 100 de silicium, sans aucune addition, en ménageant seulement une vitesse de refroidissement assez grande — coulée en coquille sous faible épaisseur — on obtient bien la structure voulue ; il y a là un phénomène analogue à celui observé dans la coulée des fontes en coquille ; il faut atteindre une certaine vitesse de refroidissement. D'ailleurs ces alliages aluminium-silicium sont extrêmement sensibles au phénomène de coalescence qui opère, sous l'influence d'un recuit, le rassemblement des constituants et détruit ici, par conséquent, cette texture d'eutectique très fin que l'on recherche.

Quoi qu'il en soit, l'alpax qui offre une charge de rupture de 19 à 21 kilogrammes par millimètre carré, avec 6 à 8 p. 100 d'allongements, l'alpax est un produit qui, utilisé sous forme de pièces moulées, est remarquablement intéressant. Il est



très fluide, au moment de la coulée, son coefficient de retrait est faible et déjà ses emplois se multiplient, aussi bien dans l'industrie automobile que dans les chemins de fer. N'a-t-on pas vu récemment, réalisé par les fonderies de Crans, sur les données de Sansau de Lavaud et de Fleury, un châssis d'automobile coulé en une seule pièce?

Duralumin, utilisé surtout sous forme de produits laminés, de pièces forgées ou matricées, de tubes, de profilés; alpax, employé surtout pour les produits moulés, tels sont assurément, avec quelques autres alliages, tel que celui à 12 p. 100 de cuivre et 88 p. 100 d'aluminium donnant de si heureux et constants résultats dans les pistons de moteurs à explosion, ou ceux trouvant leur développement dans la construction électrique et la transmission de l'énergie, les deux découvertes les plus remarquables dans les alliages légers, comptant d'ailleurs parmi les plus intéressantes de la métallurgie moderne.

Il y a quelque vingt ans, on vit apparaître, à une exposition d'automobiles, quelques échantillons d'un produit extra-léger vendu sous le nom de métal-liège; ce n'était pas autre chose que du magnésium. Mais quelques années plus tard on put utiliser des alliages dits *électrons*, fabriqués à Griesheim et qui donnaient des résultats intéressants. La guerre obligea la France à préparer du magnésium, ne fût-ce qu'à cause de son rôle d'agent d'affinage, dans certaines opérations métallurgiques, et l'étude des alliages fut poursuivie d'une façon systématique.

En somme on dispose aujourd'hui d'une gamme d'alliages qui, pour ne pas perdre leur qualité

la plus intéressante, leur très faible densité, contiennent au moins 87 à 95 p. 100 de magnésium. Ce métal est allié à de l'aluminium, ou à du zinc, quelquefois à ces deux corps.

On peut obtenir alors les propriétés suivantes, sur barres laminées ou filées.

Avec les alliages renfermant du zinc et de l'aluminium, on obtient :

$$R = 25 \text{ à } 30; \quad E = 12 \text{ à } 15; \quad A \text{ p. } 100 = 10 \text{ à } 15,$$

la densité étant inférieure à 2.

Avec l'alliage à 13 p. 100 de cuivre et 87 p. 100 de magnésium on obtient une haute dureté, un bon frottement, tout en conservant une excellente conductibilité thermique, qualité que l'on sait particulièrement précieuse pour les alliages destinés à la fabrication de pistons de moteurs à explosion.

Mais il est bien à remarquer que ces alliages ne demandent aucun traitement thermique et que les propriétés indiquées sont obtenues de premier jet.

Malgré le prix élevé du magnésium — qui atteint actuellement 40 francs le kilogramme — ces alliages prennent une certaine extension et la récente exposition de matières premières à Berlin mettait spécialement en valeur les nombreuses pièces préparées avec ces alliages.



## CHAPITRE VI

### LES PROGRÈS DES TRAITEMENTS DES PRODUITS MÉTALLURGIQUES

I. Traitements thermiques. — L'histoire des traitements thermiques depuis vingt-cinq ans constitue assurément l'un des points les plus surprenants, les plus curieux du développement métallurgique.

Sans doute — et il le faut bien noter ici — depuis la plus haute antiquité, la question de la trempe a préoccupé ceux qui utilisaient les aciers, du moins ceux destinés à la fabrication des outils ; d'ailleurs la trempe des bronzes était un fait déjà connu. L'on notait, non sans quelque hésitation, que le brusque refroidissement du métal chauffé et plongé dans l'eau donnait des résultats très différents avec l'acier à outil, auquel il conférait une dureté très élevée, et le bronze, qui devenait plus doux et était alors susceptible de déformations, exigées notamment par la fabrication des gongs chinois.

Bien mieux, l'attention était déjà attirée sur l'influence du bain de trempe, et Pline lui-même montrait l'intérêt que présente la substitution de l'huile à l'eau, du moins dans les cas où un trop brusque refroidissement produit des déchirures du métal, des « tapures ».

A travers les siècles, les études se sont multipliées, les théories les plus bizarres ont été émises, notamment sous l'influence des alchimistes. Mais ce n'est que vers la fin du siècle dernier que l'on a commencé à jeter quelque clarté sur cette question capitale des traitements thermiques.

Capitale, puisqu'elle est à la base même de la presque universalité des méthodes de travail des matériaux ;

Capitale, puisque c'est elle qui permet à l'armement, à l'automobile, à l'aviation d'avoir des exigences de plus en plus grandes ;

Capitale enfin, puisque son rayon d'action s'est singulièrement élargi depuis vingt ans et que constamment on découvre de nouveaux alliages susceptibles de prendre la trempe.

C'est Tschernoff qui, en 1868, établit le premier fait scientifique relatif à la trempe. Il démontra que le brusque refroidissement d'un acier chauffé — que l'on plonge notamment dans l'eau — ne modifie les propriétés du métal que si la température du métal au moment de l'immersion possède une certaine valeur.

Vers 1885, deux ingénieurs des Arts et Manufactures, dont les noms sont bien connus du monde métallurgique, Osmond et Werth, étaient tous deux attachés au laboratoire du Creusot. Ils étudièrent les phénomènes de trempe par des méthodes scientifiques de haute précision, et jusqu'alors inconnues. Ils établirent notamment que le fer et les aciers possédaient des points de transformation et que la trempe faite à une température supérieure à ces points de transformation apportait dans la constitution du métal de très profonds changements. Ils mon-



trèrent même comment variait la position de ces points de transformation, avec la composition de l'acier.

D'ailleurs, quelques années plus tard, en 1894, Osmond donnait, dans le *Bulletin de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale*, un magnifique mémoire, devenu classique, dans lequel étaient clairement exposés la constitution des alliages de fer et de carbone à la température ordinaire et les constituants de trempe, cela appuyé par de magnifiques photographies.

A ce moment-là d'ailleurs naissaient ou se développaient, notamment sous la bienfaisante influence de Henry Le Chatelier, les méthodes physiques et physico-chimiques des alliages : dilatation, résistivité, et grâce au même savant la métallographie prenait une forme extrêmement simple qui la mettait à la portée des laboratoires industriels. De tous côtés se confirmaient, se précisaient même les beaux résultats annoncés par Osmond. Un très remarquable mémoire de Charpy, s'attaquant à la variation des propriétés mécaniques des aciers ordinaires de différentes nuances, établit de façon irréfutable la relation qui existait entre les points de transformation et la trempe, et ce que devenait le phénomène lorsqu'on surélevait la température de trempe bien au-dessus de ces points de transformation.

Entre temps — entre 1885 et 1888 — avaient été découverts les deux premiers aciers spéciaux — autres que les aciers à outils et les aciers à obus au chrome — l'acier à haute teneur en nickel ; l'acier à haute teneur en manganèse. On nota, sans trop s'en inquiéter, d'ailleurs, qu'au

point de vue trempe, ces deux alliages se comportaient de façon bien bizarre : le traitement apporte un adoucissement, nous l'avons déjà signalé. Et cependant on savait déjà que l'addition de certains éléments, tels que le tungstène et le chrome dans les outils ou de ce dernier dans les obus augmentait la dureté après brusque refroidissement.

D'autre part la fabrication des plaques de blindage prit bientôt une forme relativement complexe par l'utilisation de la cémentation, et les additions de nickel et de chrome y jouèrent bientôt un rôle capital.

Et cependant lorsque, vers 1902, commença l'étude systématique des aciers spéciaux, on vit des résultats se heurter, paraître se contredire, apporter d'abord des perturbations extraordinaires dans les idées et enfin, après une cacophonie extraordinaire, permettre de voir clair dans cette question complexe de la trempe et entraîner bientôt des recherches nouvelles sur les aciers ordinaires eux-mêmes.

En effet, on notait tout d'abord que des additions croissantes de nickel, après avoir augmenté l'aptitude à la trempe d'un acier ordinaire, donnait à ce métal recuit les caractéristiques d'un acier trempé et, pour des doses encore plus fortes, lui enlevait tout pouvoir trempant et que les doses de nickel nécessaires pour obtenir ces résultats étaient d'autant plus faibles que la teneur en carbone de l'acier initial était plus élevée.

Le manganèse, pour des pourcentages plus faibles encore, produisait ce même résultat. Mais on établissait aussi que certains éléments, no-



tamment le silicium, le vanadium et l'aluminium, après avoir exalté le pouvoir trempant d'un acier pour des doses faibles, empêchait, après des additions plus importantes, toute trempe de se produire.

Le microscope, aidé d'ailleurs de l'analyse thermique et dilatométrique, permit de tirer au clair cette question singulière. Déjà on établit que les aciers, auto-trempés par adjonction suffisante de certains éléments, nickel, chrome, manganèse, possédaient la même structure — celle de la martensite — que les aciers ordinaires bien trempés ; que les aciers ne prenant pas la trempe, ou bien présentaient la structure caractéristique des alliages fer-carbone à température élevée — l'austenite, solution solide de carbone dans le fer  $\gamma$  — ou bien contenaient un constituant qui n'entre pas en solution dans le fer  $\gamma$  (cas du vanadium) — ou enfin avaient leur carbone précipité à l'état de graphite (cas des aciers au silicium ou à l'aluminium).

La théorie de la mise en solution par trempe du carbure de fer, ou de carbures complexes, dans le cas des aciers spéciaux était confirmée. D'ailleurs était nettement établie une relation étroite entre la position des points de transformation dans les aciers spéciaux, la structure et les propriétés.

Plus tard, on put, grâce à des moyens expérimentaux particuliers, étudier l'influence de la trempe sur la position des points de transformation des aciers ordinaires et tracer un diagramme donnant la relation qui existe entre ces points, la dureté, la vitesse de refroidissement et la structure.

Tous les résultats concordaient admirablement.

Entre temps, Henry Le Chatelier et certains de ses élèves étudièrent l'influence du bain de trempe; ils montrèrent, ainsi que Benedicks, les facteurs qui jouent un rôle dans la vitesse de refroidissement.

Mac Cance, en 1915, donna un beau mémoire sur la trempe des aciers. Il précisa notamment que le refroidissement dans l'eau donnait des irrégularités très marquées dès que la température du bain dépassait 30° — fait déjà connu — et que, fait nouveau et très important, les additions de sels, chlorure de sodium et chlorure de calcium, avaient pour effet de faire disparaître ces irrégularités et par conséquent de donner à l'eau un pouvoir trempant régulier jusque vers 70°.

Cependant l'emploi des rayons X, permettant de pénétrer la cristallisation des produits métallurgiques, et de noter les variations apportées par la trempe, allait aussi concourir à apporter de la clarté.

Mais un fait restait assez obscur :

Lorsqu'on prend un acier déterminé et qu'on le soumet à des trempes donnant des vitesses de refroidissement croissantes; on obtient successivement les structures que l'on appelle l'osmondite, la martensite, l'austenite, celle-ci presque impossible à obtenir dans les aciers ordinaires, à moins que l'acier ne contienne quelques pourcentages de manganèse.

De plus, il était établi qu'un acier à structure de troostite possède une dureté un peu plus élevée que l'acier initial perlitique, mais cepen-



dant peu différente ; et que son point de transformation, normalement à  $700^{\circ}$ , est peu abaissé par trempe ;

Que l'acier à structuré de martensite présente le maximum de dureté, et que son point de transformation est abaissé aux environs de  $350^{\circ}$  ;

Que l'acier acesténitique possède une dureté faible et que son point de transformation est au-dessous de la température ordinaire.

D'ailleurs, d'autres considérations permettent d'établir la nature de certains constituants et l'on est conduit à regarder la troostite comme de la perlite très divisée, à l'état colloïdal<sup>1</sup> ; l'austenite n'est autre que la solution fer- $\gamma$ -carbone existant normalement à température élevée et maintenue par trempe à la température ordinaire. Mais on ne pouvait préciser la nature de la martensite et l'on devait s'étonner qu'une vitesse de refroidissement moyenne peut produire le maximum de dureté, alors qu'en augmentant cette vitesse de refroidissement on obtient une dureté bien moindre.

Dire que ce fait est actuellement bien expliqué serait peut-être aller un peu loin. Cependant il est nécessaire de noter que dans le cas de l'acier, — et même de certains alliages de cuivre — la martensite qui est caractérisée par des aiguilles très fines, paraît bien être une solution solide de carbone, non plus dans le fer  $\gamma$ , mais dans le fer  $\alpha$  ; peut-être renferme-t-elle un peu de fer  $\gamma$  ; en tous les cas, elle est le produit d'un retour partiel à la structure normale à froid, la vitesse

1. On sait que la *perlite* est l'eutectoïde ferrite (fer  $\alpha$ ) et cémentite ( $\text{Fe}^3\text{C}$ ).

de refroidissement n'étant pas assez grande pour empêcher ce retour partiel. Quant à sa grande dureté, elle s'explique par l'extrême division de ses éléments.

On voit donc apparaître le résumé de la théorie de la trempe de l'acier : normalement, un acier est formé à la température ordinaire d'un eutectoïde ferrite-cémentite (c'est-à-dire fer  $\alpha$  ou fer magnétique et carbure de fer) avec de la ferrite en excès (aciers hypo-eutectoïdiques) ou du carbure de fer en excès (aciers hypereutectoïdiques, c'est-à-dire renfermant plus de 0,9 p. 100 de carbone).

La trempe faite avec une vitesse de refroidissement faible n'entraîne que des modifications peu importantes : on a de l'osmondite qui est de la perlite colloïdale.

La trempe faite avec une très grande vitesse de refroidissement maintient l'état stable à température élevée ; on a l'austenite, ce qui est, d'ailleurs, très difficile à réaliser avec un acier ordinaire, répétons-le.

Enfin la trempe faite avec une vitesse de refroidissement moyenne — représentant la valeur couramment pratiquée dans l'industrie — donne un retour partiel de l'austenite vers l'état stable à température ordinaire ; c'est la martensite qui représente l'état d'un acier à outil bien trempé.

Cependant il ne faut pas croire que tous les physico-chimistes qui s'occupent de ces questions admettent ces conclusions ; certains font encore intervenir une forme allotropique du fer, le fer  $\beta$ , indiquée par Osmond et dont l'existence apparaît comme douteuse.



La magnifique enquête à laquelle vient de procéder Saureur a apporté de la clarté sur de très nombreux points ; mais elle a fait singulièrement ressortir les divergences d'opinion qui règnent encore sur le compte de la martensite.

Quoi qu'il en soit, reprenons un acier trempé et faisons lui subir un revenu ; portons-le à des températures croissantes depuis 0 jusque vers 700°. Que se passera-t-il ?

Les phénomènes seront en dépendance de l'état du produit trempé. Examinons de suite le cas le plus complexe, celui de l'acier austénitique ou, suivant le terme maintenant usuel, *l'acier hypertrempé*.

Du point de vue micrographique, nous verrons successivement les polyèdres d'austenite se transformer en aiguilles de martensite, puis celle-ci prendre sa forme aciculaire et se transformer en osmondite et enfin, si le revenu est plus poussé encore, nous atteindrons les constituants du métal recuit et nous aurons de la perlite.

Du point de vue propriétés mécaniques, nous observerons des variations très intéressantes — et parfois très importantes — de la dureté. L'acier hypertrempé, c'est-à-dire austénitique, possède une dureté relativement peu élevée ; le revenu commence par augmenter très sensiblement cette dureté et le maximum correspond à la martensite fine ; puis la densité diminue progressivement pour atteindre celle du métal recuit.

Si l'on considère la variation de la résilience en fonction de la température de revenu, on note que la résilience, assez forte de l'acier hypertrempé diminue, devient très faible pour la structure martensitique, croît ensuite pour passer

par un maximum très net qui correspond toujours, quel que soit l'acier considéré, à un revenu fait vers 600°.

Les faits acquis pour les traitements thermiques de l'acier sont assurément les plus importants du point de vue industriel. Ils ont donné lieu à des applications aussi nombreuses que remarquables et il n'est point possible de les résumer toutes ici. Il n'est peut-être pas inutile, toutefois, de rappeler que si l'armement, aussi bien en ce qui concerne les canons et les obus que les plaques de blindage, doit des progrès considérables à ces traitements, l'industrie de l'automobile et la construction aéronautique, avec ses exigences précises, se sont appuyées essentiellement sur la trempe et le revenu — ainsi que sur la cémentation — pour augmenter la sécurité ou diminuer le poids de la pièce. Il est surtout nécessaire de faire ressortir que ces traitements ne sont pas simplement réservés à l'outillage ou aux fabrications qui utilisent les aciers spéciaux ou les aciers fins, mais que l'on a pu ainsi améliorer des produits courants, puisqu'en ce moment même certaines usines de l'est de la France ont monté d'importantes installations leur permettant de tremper les rails.

Il faut nettement déclarer que le traitement thermique d'un bon acier est une garantie de longs services, mais à la condition essentielle qu'il soit bien fait et que mieux vaut un acier ordinaire bien traité qu'un acier spécial employé brut de forgeage.

Mais assurément, dans tout ce chapitre capital des progrès de la métallurgie, le point le plus marquant, le plus passionnant, réside dans la



généralisation de la trempe. Esquissons la question au point de vue historique, nous raisonnons chaque fait du point de vue scientifique.

Donc, en 1900, la trempe des aciers ordinaires et spéciaux avait pris une importance considérable, et cela tout particulièrement sous l'influence de la construction automobile. S'ouvre l'Exposition Universelle et l'on apprend qu'à l'annexe de Vincennes est mise en vue une découverte sensationnelle appelée à révolutionner la construction mécanique. On y voyait, en effet, des outils, spécialement des outils de tours, travaillés avec des passes tellement importantes que les copeaux sortaient au rouge sombre et cependant les outils ne perdaient point leur trempe et pouvaient continuer le travail.

C'était la magnifique découverte des aciers à coupe rapide, faite par White et Taylor, le bel aboutissement de longues années d'études systématiques, de recherches scientifiques, auquel nous avons déjà fait allusion.

Mais, fait non moins anormal, pour obtenir ce résultat il ne suffit pas d'employer des aciers très particuliers, renfermant une certaine teneur en chrome (en général 5 p. 100), une dose beaucoup plus élevée de tungstène (en général 18 p. 100), ces éléments étaient souvent accompagnés de vanadium (et depuis peu de cobalt), mais faut-il encore les traiter de façon toute particulière qui allait d'ailleurs à l'encontre de tous les principes établis : il est nécessaire que la partie travaillante de l'outil soit portée à une température aussi voisine que possible de la fusion, qu'ensuite cet outil soit refroidi dans un simple courant d'air ou par immersion dans un bain d'huile ; enfin le

métal doit être réchauffé jusqu'à 650°. On peut même, après chauffage au point de fusion, le plonger simplement dans un bain de plomb fondu.

Ainsi donc ici tout est anormal, et pareil traitement appliqué à tous les aciers à outils jusqu'alors connus aurait produit les plus détestables effets : de la surchauffe, de la « brûlure » et enfin, par le revenu aussi accentué, un anéantissement de la valeur tranchante.

Voyons la raison de ces bizarreries : le phénomène de trempe de l'acier ordinaire est essentiellement basé sur la dissolution à température élevée du carbure de fer dans le fer non magnétique ou fer  $\gamma$ . Ici dans ces aciers contenant du chrome, du tungstène, parfois du vanadium, du molybdène, le carbure qui doit se dissoudre est beaucoup plus complexe et l'expérience montre que ce carbure complexe se dissout beaucoup plus difficilement dans le fer  $\gamma$ . D'où la nécessité de chauffer à très haute température.

D'ailleurs il apparaît bien que le phénomène est encore plus complexe, cela par suite de l'existence de combinaisons, notamment de celle de fer et de tungstène, qui se dissolvent à une très haute température, plus haute encore que celle nécessaire à la mise en solution des carbures.

Cela amène une véritable hypertrempe. D'où la nécessité pour la faire disparaître d'opérer un revenu très accentué qui rendrait inefficace l'action de tout autre outil.

D'autre part, on voit que, si un outil travaille à une température trop élevée, il permet des propriétés coupantes, l'effet de la trempe étant détruit par un réchauffage trop accentué.

Ici il n'en est pas ainsi : en effet, la mise en



solution des constituants ayant été très difficile, ayant nécessité une température très élevée, la mise hors solution — c'est-à-dire la destruction des effets de la trempe — sera très difficile aussi.

D'où la possibilité de travailler avec les aciers à outils à coupe rapide, avec des passes si importantes que les copeaux sortent au rouge sombre.

L'extension prise par les aciers à coupe rapide est formidable. Il n'est point d'atelier de construction mécanique, si minime soit-il, qui ne les utilise et l'on connaît leur heureuse influence sur la production ; on cite toujours l'exemple d'une usine américaine qui était sur le point de doubler ses ateliers au moment même de la découverte de White et Taylor ; il a suffi de renforcer les machines-outils et d'adopter les nouveaux aciers pour obtenir la production visée.

Peu d'années après cet aboutissement sensationnel de recherches méthodiques, était signalée la trempe du bronze d'aluminium contenant 10 p. 100 d'aluminium et 90 p. 100 de cuivre. Cet alliage, de couleur or superbe, très résistant aux agents d'oxydation et qui possède des propriétés mécaniques fort intéressantes (en barre laminée et recuite :  $R = 49$  ;  $E = 25$  ;  $A$  p. 100 = 14), a été découvert par Sainte-Claire Deville et il est bien certain que, jusqu'à ces dernières années, l'industrie — qu'il s'agisse de la bijouterie, de l'orfèvrerie ou bien de l'armement et de la construction mécanique — ne l'utilisait pas comme il le mérite.

Nous savons bien qu'à l'heure actuelle un mouvement est commencé, il doit prendre une

grande envergure, surtout si les intéressés n'oublent pas que cet alliage prend la trempe — et que encore il peut être singulièrement amélioré, comme nous l'avons dit, sous l'influence de certaines additions, notamment le fer et le nickel, le titre réel en cuivre étant corrigé.

La découverte de la trempe du bronze d'aluminium a été fort importante du point de vue pratique, et surtout du point de vue théorique.

Du point de vue pratique, la trempe faite à 800° modifie de la façon suivante les propriétés mécaniques :

|                         |        |        |               |
|-------------------------|--------|--------|---------------|
| Métal laminé et recuit. | R = 49 | E = 25 | A p. 100 = 14 |
| Métal trempé à 800°.    | R = 72 | E = 39 | A p. 100 = 6. |

Le sens de la variation des propriétés est donc le même que dans les aciers.

Du point de vue théorique, l'intérêt était le suivant : la trempe du bronze d'aluminium, qui, à l'état recuit, est formé de deux constituants, deux solutions solides, produit des aiguilles très fines, rappelant la martensite des aciers. Or, le diagramme thermique des bronzes d'aluminium présente, tout comme celui des aciers, un eutectoïde. Tous ces rapprochements sont évidemment du plus haut intérêt.

C'est alors qu'apparut le duralumin, dont nous avons déjà indiqué sommairement la composition, les propriétés et le traitement.

Là vraiment les faits étaient troublants : l'alliage, après une trempe à 475°, est légèrement durci et il faut attendre un séjour de quarante-huit heures à la température ordinaire pour obtenir une forte charge de rupture (R = 40 kilo-



grammes par millimètre carré), laquelle est ensuite à peu près constante dans le temps.

Le phénomène paraissait inexplicable. Ce n'est qu'après la guerre que des études systématiques permirent de tirer la question à peu près au clair. Voici comment elle se présente aujourd'hui : l'aluminium commercial contient du silicium, en petite quantité ; le magnésium, introduit lui-même en faible proportion, pour former le duralumin, se combine avec ce silicium, pour donner la combinaison  $Mg^2Si$ . Cette combinaison est soluble dans l'aluminium à température élevée et il a été possible de déterminer le diagramme  $Al-Mg^2Si$  et la courbe qui sépare le domaine de la solution solide de celui où existe  $Mg^2Si$  à l'état libre. Il peut donc y avoir trempe. D'autre part, le diagramme aluminium-cuivre fait apparaître la combinaison  $Al^2Cu$  et une solution solide dans le voisinage de l'aluminium pur ; comme la concentration de cette solution varie avec la température, là encore peut se produire un phénomène de trempe.

Quant au manganèse, que renferme encore le duralumin, il entre en solution dans l'aluminium et augmente sa dureté.

On peut affirmer, après les recherches faites, que les agents de trempe sont  $Mg^2Si$  et  $Al^2Cu$ , surtout le premier. Cependant il a été possible de créer des alliages ne renfermant pas de magnésium et qui présentent des phénomènes analogues à ceux du duralumin.

Il est spécialement intéressant de noter que c'est à l'une des impuretés de l'aluminium, le silicium, que l'alliage dont nous nous occupons doit son curieux traitement.

Quoi qu'il en soit, un autre fait capital est le suivant :

Si l'on trempe le duralumin dans l'air liquide, ou si même on l'y place aussitôt après trempe à l'eau, l'augmentation de dureté postérieure à la trempe ne se reproduit pas. Mais si on extrait le métal de l'air liquide, cela même après un long séjour, l'alliage, revenant à la température de 15 ou 20°, suit les lois déjà notées qui président à la variation de ses propriétés en fonction du temps. Enfin, si, au lieu de laisser le produit métallurgique séjourner à la température ordinaire, on le porte à la température de 100°, on n'est plus obligé d'attendre quarante-huit heures pour avoir le maximum de charge de rupture; il suffit de quelques heures. D'ailleurs, si la température de chauffage est trop élevée, l'alliage perd les propriétés acquises par trempe.

Ne pouvons-nous donc pas rapprocher ces faits de ceux bien observés pour l'acier? Assurément; mais cependant — nous allons le voir — quelques précautions sont indispensables.

Nous pouvons admettre que la trempe du duralumin produit automatiquement de l'hypertrempe, c'est dire que l'on maintient intégralement à la température ordinaire l'état stable à température élevée. Et alors il est tout naturel de penser que le séjour à la température ordinaire augmente la dureté, tout comme un revenu vers 150 à 200° agit sur un acier hypere trempé. D'ailleurs, cette hypothèse est très nettement confirmée par le fait que le maintien à une basse température empêche le changement de propriété et qu'une augmentation de température rend ce changement plus rapide.



Mais voici le point où le parallélisme entre les théories de la trempe du duralumin et de celle de l'acier cesse : on doit s'attendre à ce que le microscope indique une mise en solution par trempe des constituants  $Mg^2Si$  et  $Al^3Cu$ , ceci paraît incontestable, et que le revenu, soit à la température ordinaire, soit à  $100^{\circ}$ , apporte une modification structurale, notamment un constituant aciculaire. Il n'en est rien et c'est à peine si l'on peut affirmer que le revenu précipite les constituants dissous par trempe, et cela à un état très divisé, ce qui pourrait expliquer l'augmentation de dureté.

En tous les cas, n'est-il pas curieux cet alliage auquel la trempe donne une vie toute spéciale, lui permettant de subir, à la température même à laquelle nous existons, des transformations extrêmement profondes ?

Bien entendu, ces recherches si intéressantes en ont suggéré de nouvelles. Basés sur l'étude des diagrammes, précisant soit l'existence d'eutectoïde, soit l'existence de solutions solides dont la concentration varie avec la température, ces travaux ont permis de découvrir de nombreux cas de trempe, notamment des alliages d'argent et de zinc, d'argent et de cadmium ; des alliages de plomb et d'étain. Ce dernier exemple est très frappant puisqu'il permet d'expliquer le vieillissement des caractères d'imprimerie.

Entre temps, d'ailleurs, était éclaircie l'habitude industrielle de tremper certains alliages d'or et de cuivre avant de les laminier.

Et vraiment on peut dire que, si quelques points particuliers, dont certains d'ailleurs fort importants, sont encore obscurs, du moins les traite-

ments thermiques, dans leur magnifique généralité, trouvent une théorie très assise, dans la mise en solution à température élevée de certains constituants et dans un retour partiel vers l'état stable à température élevée — soit dans la trempe elle-même — (cas des aciers ordinaires) —, soit dans le revenu qui suit une hypertrempe partielle ou totale.

**II. Traitements chimiques.** — S'il ne nous est pas possible de fixer ici les progrès des traitements mécaniques que subissent les produits métallurgiques pour prendre leur forme commerciale — traitements dont certains, comme le filage à la presse, sont très modernes — nous devons indiquer sommairement les grands progrès des traitements chimiques. N'envisageons pas actuellement l'importante question de la protection contre la corrosion; elle trouvera place plus loin. Mais disons quelques mots des traitements chimiques qui ont essentiellement pour but de transformer en surface les propriétés mécaniques du métal.

Ces traitements ont reçu le nom général de cémentation, parce que, au début tout au moins, l'effet voulu était obtenu par l'action d'une poudre à température élevée.

Le plus connu, le plus utilisé est assurément la cémentation des aciers par le carbone, qui provoque en surface une teneur élevée en cet élément et ceci assure, après trempe, une très forte dureté. L'étude systématique du phénomène est de date récente; l'emploi à cet effet des aciers spéciaux, notamment de ceux contenant du nickel et du chrome, s'est vulgarisé surtout sous l'influence de



l'industrie automobile. Ils ont permis de simplifier le traitement complexe, justement appliqué aux aciers ordinaires et consistant dans deux trempes successives : l'une à 900-925°, rendant à l'âme de la pièce sa haute résilience altérée par un chauffage prolongé ; l'autre à 775-800° donnant à la surface son maximum de dureté. L'addition de nickel à l'acier de cémentation ordinaire permet de n'avoir recours qu'à une seule trempe, le nickel diminuant l'action nocive de la haute température et abaissant le point de transformation du métal. On a cherché à généraliser les actions cémentantes sur les aciers, même sur d'autres corps, et de ces études sont nés des traitements fort intéressants ; depuis bien longtemps, les fils très ténus utilisés en passementerie sont obtenus en chauffant le cuivre rouge, déjà finement tréfilé, dans de la vapeur de zinc ; le traitement connu sous le nom de *shéradisation* est une véritable cémentation de pièces d'acier par la poudre de zinc ; plus récemment a été créée la calorisation, dans laquelle — fait particulièrement curieux — on recouvre l'acier par cémentation d'aluminium ; plus exactement il se forme en surface une combinaison de fer et d'aluminium qui, notamment, résiste fort bien aux actions oxydantes, même à des températures pouvant atteindre 900°. Et il n'est pas banal de constater que c'est cette combinaison de deux métaux, l'un et l'autre altérables, qui va protéger les produits sidérurgiques contre l'oxydation.

Des travaux fort intéressants ont été poursuivis en vue de créer dans les produits sidérurgiques des surfaces riches en chrome, en tungstène, en molybdène, en silicium, etc... La plupart ont

donné des résultats que l'industrie doit utiliser.

Mais, parmi tous ces traitements chimiques modernes, le plus remarquable réside assurément dans la nitruration de certains aciers spéciaux contenant de l'aluminium. Nous en avons déjà indiqué le principe. L'intérêt industriel de ce traitement — conséquence d'une étude théorique de Fry relative au diagramme fer-azote — est déjà démontré dans de très nombreuses applications : arbres, vilebrequin, arbres à cames, engrenages, etc..., partout où il y a intérêt à avoir une surface extrêmement dure et qui, par là même, peut présenter un poli extrêmement poussé et durable.

Ici encore on a une nouvelle démonstration immédiate de ce que peut être l'influence des recherches d'ordre purement théorique sur les procédés industriels.



## CHAPITRE VII

### LES MALADIES DES PRODUITS MÉTALLURGIQUES

L'un des progrès les plus curieux, les plus sensationnels de la métallurgie réside dans la découverte des maladies nombreuses et souvent fort graves des produits métallurgiques.

Ce sont les méthodes modernes d'essais, tout particulièrement la micrographie et la macrographie, qui permettent de diagnostiquer ces maux et de préciser les remèdes, du moins dans quelques cas.

**La poche de retassure et la ségrégation.** — Lorsqu'on coule un métal dans un moule que l'on se contente de remplir, il y a généralement diminution de volume au moment de la solidification ; il se forme une cavité dont l'importance, la forme, la localisation, dépendent du métal, du moule lui-même et de nombreux facteurs qu'il est difficile de rendre constants, du moins dans des opérations industrielles courantes.

D'autre part, un alliage ne se solidifie pas, dans la plupart des cas, à température constante : sa solidification commence à une certaine température et s'achève à une autre, souvent beaucoup

plus basse. L'écart entre ces deux points (qui appartiennent à ces courbes ou surfaces que l'on appelle liquidus et solidus) est parfois de plusieurs centaines de degrés; on constate, d'ailleurs, dans la plupart des cas, une hétérogénéité chimique importante, des ségrégations qui peuvent offrir les plus graves dangers, lorsque s'accumulent en une zone du lingot un ou deux corps dangereux, tels le phosphore ou le soufre dans l'acier.

On peut remédier à ces graves défauts, en amputant le métal dès sa naissance ou dès ses premiers traitements mécaniques; on est alors conduit à des chutes importantes, dont l'inconvénient se trouve, non seulement dans une très sensible augmentation du prix de revient, mais aussi dans une grande incertitude du résultat final. De nombreux remèdes moins radicaux, mais souvent plus imprécis, ont été indiqués : réchauffage des têtes de lingots, masselottes imposantes permettant une importante nourriture pendant le retrait, coulées additionnelles et fréquentes de métal durant la solidification, tous moyens qui font disparaître la poche de retassure ou la localisent, mais n'empêchent pas la ségrégation. La méthode, créée aux aciéries de Saint-Etienne par Harmet, est assurément plus intéressante malgré les frais importants d'installation qu'elle nécessite : elle consiste dans une compression du métal pâteux, dans une lingotière tronconique; il s'ensuit un véritable tréfilage qui donne d'excellents résultats.

**Les gaz dissous.** — La question des gaz dissous, combinés ou occlus est extrêmement grave et on est bien peu fixé sur leur importance et leurs



inconvenients. Certes, il y a certains problèmes qui ont été fort étudiés, la présence de l'oxygène et de l'azote dans l'acier et leur nocivité notamment.

Mais on a signalé des résultats bien curieux et souvent contradictoires pour le cuivre et ses alliages, pour l'aluminium, etc...; tantôt, par exemple, on a trouvé dans les laitons des quantités de gaz inimaginables, atteignant 50 fois le volume du métal, le plus souvent des quantités bien plus modestes, 1 à 2 fois le volume du métal et, dans tous les cas, ces gaz paraissent avoir peu d'influence sur les propriétés mécaniques.

Pour l'aluminium, les résultats sont très variés et comme nature de gaz et comme quantités, on rencontre de l'hydrogène, de l'oxyde de carbone, de l'anhydride carbonique, des hydrocarbures, voire de l'hydrogène sulfuré, et il semble bien que, du moins certains de ces gaz, ont une influence notable sur la tenue du métal.

Mais cette question — d'ailleurs fort délicate, au point de vue expérimentation — est peu élucidée et elle sollicite encore de nombreuses recherches.

**L'Hérédité.** — Ce mot paraît bien gros de conséquences, lorsqu'on parle métallurgie. Et cependant ne connaissons-nous pas des produits métallurgiques, notamment des aciers spéciaux qui, issus des mêmes minerais, engendrés par des matières premières paraissant identiques, et cela par les mêmes méthodes, dans des appareils semblables, sous des conditions de température et d'atmosphère identiques, ne possèdent point cependant les mêmes propriétés?

Ces différences sont parfois très accusées, même dans un simple essai de traction ou de choc sur barreaux entaillés, et sont souvent très marquées dans les résistances aux chocs répétés.

Pourrait-on en trouver l'explication dans des analyses plus approfondies que celles faites ordinairement, notamment dans les gaz présents ?

Cela est possible, mais n'est point démontré.

D'ailleurs, un exemple peut-être plus frappant encore se trouve dans certaines fontes qui à même composition chimique donnent des résultats bien contradictoires. Il semble, avons-nous écrit récemment<sup>1</sup>, qu'il y existe une véritable hérédité structurale, une certaine noblesse de caractère, dépendant des conditions mêmes de la fusion, notamment de la température atteinte, de la durée de l'opération, de la nature même des matières à fondre.

Et voici qu'un jeune ingénieur. Le Thomas, qui s'est déjà fort distingué par des recherches de fonderie, vient de présenter à l'Académie des Sciences quelques premiers résultats qui donnent bien à réfléchir<sup>2</sup>.

L'érouissage, les tensions et les criques saisonnières. — On sait que si l'on produit une déformation permanente dans un produit métallurgique, en le travaillant au-dessous d'une certaine température, laquelle varie avec l'alliage considéré, on modifie singulièrement ses propriétés, notamment ses propriétés mécaniques, et souvent ses propriétés chimiques, telle que son aptitude

1. *Séance des Cinq Académies*, 25 octobre 1927.

2. *Séance du 27 décembre 1927*.



à la corrosion. Il est d'ailleurs à noter que pour certains métaux, le plomb et l'étain, et quelques alliages, la température à laquelle il faut les déformer pour les écrouir est située au-dessous de la température ordinaire.

De façon générale on augmente la charge de rupture à la traction, la limite élastique, la dureté, tandis que les allongements après rupture, la striction et la résilience diminuent et que le module d'élasticité demeure sensiblement constant. — Bien entendu, ces variations des propriétés sont d'autant plus accusées, du moins jusqu'à une certaine limite, que la déformation est plus importante. Ceci engendre des tensions d'une importance considérable, qui atteignent parfois plusieurs milliers d'atmosphères et cela n'est pas sans occasionner des accidents graves, qui se produisent aussi, pour les mêmes raisons, dans certains alliages trempés, notamment des ruptures brusques.

Enfin les tensions semblent être à l'origine d'un phénomène très spécial et encore fort mal connu, auquel les Anglais ont donné la dénomination de *season cracking* et que l'on peut appeler *criques saisonnières*. Lorsque le métal est soumis à des variations de température, telles qu'il s'en produit à certaines époques de l'année, il devient cassant; on note des criques souvent très faibles, parfois très étendues, surtout lorsque, de par la fabrication, il s'est produit des tensions irrégulières.

Souvent d'ailleurs ces fissures échappent à l'observation courante; elles progressent lentement dans le métal et font penser aux vers célèbres :

Toujours intact aux yeux du monde,  
Il sent croître et pleurer tout bas  
La blessure fine et profonde.  
Il est brisé, n'y touchez pas.

On a vu par exemple des barres hexagonales de laiton écroui expédiées, parfaitement saines, en Angleterre et y arriver fendues dans toute leur longueur; des couronnes de fil de même alliage abandonnées dans un magasin, tomber en petits morceaux extrêmement cassants, lorsqu'on a cherché à les utiliser, simplement à les dresser.

Sans doute est-ce l'une des raisons pour lesquelles les mécaniciens avertis redoutent les produits écrouis; mais il ne faut pas exagérer ces craintes, et l'on doit se dire qu'en maintes circonstances le produit écroui est fort intéressant, parce que possédant une limite élastique plus élevée que le produit non écroui. Enfin il faut se rappeler qu'en toutes choses l'exagération doit être évitée et que les produits métallurgiques peuvent être utilisés avec un degré moyen d'écrouissage et cela sans danger.

**Le recuit, la surchauffe et la brûlure.** — Le remède à l'écrouissage se trouve dans le recuit. Il est, en effet, bien établi qu'en réchauffant un métal écroui à des températures croissantes et en l'essayant pour chaque température, on note :

1° Une zone de température pour laquelle on n'observe aucun changement dans les propriétés mécaniques; le métal demeure écroui;

2° Une zone de température assez étroite, pour laquelle on note un effet qui se traduit par une diminution de la charge de rupture à la traction



et une augmentation des allongements, cet effet étant à peu près proportionnel à la température;

3° Une zone de température caractérisée par des propriétés mécaniques à peu près constantes : charge de rupture relativement faible et grands allongements. Le métal est recuit ;

4° Une zone de température dans laquelle on voit baisser simultanément la charge de rupture et les allongements; le métal est surchauffé.

On voit donc que, pour faire disparaître l'érouissage, il faut chauffer le métal à une certaine température, sans atteindre une température trop élevée, sans quoi le métal perd en partie ses propriétés.

Ajoutons que la zone correspondant au recuit — c'est-à-dire la 3° zone — est assez importante et que, bien entendu, la température de début de chaque zone est essentiellement variable d'un métal à l'autre.

Il faut donc noter que, à côté du remède, se trouve un nouveau mal, très redoutable, la surchauffe.

Il y a plus, d'ailleurs : si l'on chauffe l'alliage au delà de la température à laquelle il commence à fondre (point du solidus), une partie peut s'écouler à l'extérieur, le ciment intergranulaire peut disparaître et des oxydes peuvent se produire sous l'influence de l'air qui pénètre : le métal est brûlé.

Une importante distinction doit être établie entre le métal surchauffé et le métal brûlé. Ce dernier ne peut avoir aucune application; c'est un produit essentiellement dangereux; il ne constitue plus que la matière première d'une nouvelle fusion. — Le métal surchauffé doit être prohibé;

sa grande fragilité justifie toutes les craintes; mais le plus souvent il peut reconquérir ses propriétés initiales, caractéristiques d'un bon recuit. — Si le produit possède des points de transformation — comme les aciers — on peut souvent obtenir le résultat cherché par un simple recuit modéré; s'il ne possède pas de points de transformation, on sera conduit — du moins le croit-on — à passer par un traitement mécanique, par exemple un forgeage.

Ce dernier point est peut-être encore nébuleux et doit être contrôlé par des expériences précises.

Il faut aussi attirer l'attention sur un fait très curieux, fort bien établi, mais qui se produit dans des conditions encore un peu imprécises. — Si l'on considère certains produits métallurgiques que l'on a fortement écrouis en une région, par exemple en les déformant par un essai de bille et si on les recuit à certaines températures, on voit naître, non pas dans la zone écrouie elle-même, mais en bordure de celle-ci, à la jonction de la partie non déformée, des cristaux importants, lesquels dénotent une augmentation de fragilité.

Ce phénomène ne semble se produire que pour un champ assez net de température, d'ailleurs variable avec le métal considéré. — Il est donc indispensable, dans les opérations de recuit d'objets emboutis, opérations si fréquentes dans l'industrie, de sortir de cette zone dangereuse.

**La maladie de Krupp.** — Nous connaissons déjà tout l'intérêt du revenu, qui s'impose, dans la plupart des cas — pour ne pas dire toujours —



après trempe. Le revenu a non seulement pour effet, de diminuer certains effets trop prononcés de la trempe, par exemple la fragilité, mais aussi de faire disparaître les tensions, aussi dangereuses ici que dans les produits écrouis.

Mais le revenu, lui-même, n'est pas sans entraîner de graves désordres, du moins lorsqu'il est pratiqué sur certains aciers spéciaux, spécialement les aciers nickel-chrome.

Voici en quoi consiste le phénomène dont nous nous préoccupons :

Si nous prenons un acier nickel-chrome trempé, que nous le fassions revenir en le portant vers 500°-600° et que son refroidissement soit lent, on observe une diminution très accusée de la résilience. C'est la fragilité de revenu ou maladie de Krupp.

Ceci est contraire aux résultats affirmés par la pratique : le revenu augmente la résilience et même on note, de façon générale, un maximum de résilience obtenu dans la quasi-totalité des produits sidérurgiques par un revenu vers 600°. Ceci est vrai pour des revenus de courte durée suivis d'un refroidissement rapide et aussi pour des aciers qui ne sont pas sensibles à la fragilité de revenu. Mais pour la plupart des aciers, un revenu prolongé vers 500°-600° diminue la résilience.

Le phénomène est surtout accusé avec les aciers nickel-chrome, tels qu'ils sont utilisés couramment dans l'industrie automobile et aéronautique.

On a cherché à remédier à ce très grave inconvénient, en agissant sur la composition chimique. L'antidote est le molybdène, même en faible proportion ; mais, d'une part, le molybdène est un

élément coûteux et, d'autre part, sa présence diminue la valeur maximum de la résilience que l'on pourrait obtenir sans molybdène.

Il apparaît comme beaucoup plus simple, beaucoup plus logique, d'utiliser un traitement qui ne produise pas la maladie de Krupp. Pour cela il suffira de faire revenir un peu au-dessus de  $600^{\circ}$  et de refroidir rapidement. Si la recherche de certaines propriétés mécaniques oblige à opérer le revenu entre  $500$  et  $600^{\circ}$ , il faudra le faire aussi court que possible et à l'arrêter très rapidement. Tout revenu fait au-dessous de  $450^{\circ}$ , même avec le chauffage prolongé, ne présente aucun danger. Enfin si l'on se trouve en présence d'un métal atteint de la maladie de Krupp, il est très aisé de le régénérer ; il suffit de le chauffer au-dessus de  $600^{\circ}$  et de le refroidir assez brusquement.

La maladie est donc précisée ; les remèdes sont donc indiqués. Mais la cause du mal, la connaît-on ? Pourquoi s'attaque-t-il de préférence à certains produits sidérurgiques ? Pourquoi est-il apporté par un traitement relativement précis ?

Rien n'est moins clair. Est-ce une certaine transformation très peu connue, comme celle à laquelle serait liée la fragilité au bleu ? Est-ce la transformation réversible d'un carbure complexe ? la variation des concentrations de certaines phases ? la mise en solution de nitrures ? Tout cela n'est encore que pures hypothèses.

La maladie de l'étain. — Voici l'un des cas les plus curieux des maladies dont peuvent être atteints les produits métallurgiques, exemple



frappant de maladie contagieuse : l'étain blanc, tel que nous le connaissons, notamment sous la forme de papier métallique, utilisé, — avant la juste concurrence de l'aluminium, — pour envelopper les produits alimentaires, l'étain blanc se transforme en étain gris pulvérulent, à basse température; à  $-20^{\circ}$ , la vitesse de transformation est rapide.

Si l'on prend cet étain gris et si on en pique une surface d'étain blanc parfaitement saine, cela à la température ordinaire, l'étain blanc se couvre de taches autour des points d'ensemencement; l'étain sain est altéré; il devient poussière.

Ce phénomène de transformation allotropique a été découvert de curieuse façon : un lot d'objets militaires en étain fut transporté de Hollande en Russie; ayant subi, au cours du voyage, de basses températures, il se présenta à l'arrivée sous une forme poussiéreuse qui fit croire évidemment à la plus honteuse duperie. D'autre part, on nota ce fait non moins surprenant : les toits de l'Hôtel de Ville de Copenhague, recouverts d'étain, étaient complètement altérés dans la direction ordinaire des vents; l'étain gris, produit toujours sous l'influence du froid, était ainsi transporté et allait, véritable pollen métallique, contaminer le métal sain.

**Autres exemples de contagion.** — D'autres cas de contagion sont à signaler, par exemple celui d'un métal recuit sur le même métal écroui; si l'on assure le contact entre deux feuilles d'un même alliage, du laiton par exemple, l'une des feuilles étant recuite, l'autre écrouie, la première réagit

sur la seconde pour aider son retour à l'état stable, c'est-à-dire à l'état recuit. Ceci se produirait, dit-on, dans un objet dont certaines parties sont écrouies, d'autres recuites, et serait peut-être la cause de fentes souvent observées.

D'ailleurs, dans certains cas, la contagion peut aller jusqu'à l'interpénétration et cela dès la température ordinaire sans parler, naturellement, des cémentations si variées et souvent si utiles auxquelles nous avons fait allusion précédemment. Il est bon de rappeler l'expérience célèbre de pénétration réciproque de plomb et d'or dès la température ordinaire, ces deux métaux étant mis en bon contact.

**La corrosion, ses remèdes.** — Tous les maux que nous venons d'indiquer sont des cas tout à fait particuliers à côté de ces altérations rapides, d'origine chimique, que l'on appelle les corrosions.

« Ces horribles maladies qui, parties de la surface, de la peau du métal, gagnent de la façon la plus sournoise le cœur même de la pièce, poursuivent une œuvre dévastatrice contre laquelle ne peut agir qu'une solide protection superficielle<sup>1</sup>. »

Mais notons d'ores et déjà que, quelles que soient l'importance et la fréquence de ces phénomènes, quelles qu'en soient les conséquences considérables, on est obligé de reconnaître que les recherches abondantes, les études approfondies qui ont été faites, sont loin de permettre en toutes circonstances de trouver la cause du mal et d'indiquer les remèdes.

1. Lecture faite à la *Séance des Cinq Académies*, le 25 octobre 1927.



Sans doute sait-on bien ce qui se passe dans la production de la rouille, les raisons de l'attaquabilité de l'aluminium dans l'eau de mer, etc. Mais encore connaît-on mal l'influence des différentes impuretés sur la corrosion plus ou moins rapide des métaux et ignore-t-on à peu près les causes réelles des phénomènes observés fréquemment dans les tubes de condenseurs que l'on trouve percés de petits trous réguliers et multiples.

De nombreuses et importantes commissions ont été créées près de grandes sociétés savantes pour élucider ces graves questions ; certaines, notamment celle qui fonctionne depuis quelques mois en France et étudie surtout la protection des métaux et alliages légers, ont eu une très heureuse activité ; mais il reste encore beaucoup à faire.

Deux voies différentes ont été suivies pour établir un remède aux corrosions : l'une cherche la protection du métal par des dépôts extérieurs, que ce soient des peintures ou des laques, des alliages ou des métaux ; l'autre fait un choix méthodique du produit métallurgique et conduit même à l'adoption de corps qui donnent des alliages inaltérables.

On conçoit d'ailleurs que les solutions qui s'imposent soient extrêmement variées.

Variées, parce que la protection cherchée ne dépend pas seulement du métal qui doit rester inaltéré, mais des conditions dans lesquelles ce métal se trouve placé, milieu humide, milieu salin, milieu acide, etc., cela à la température ordinaire, souvent à températures élevées.

Variées, parce que le choix de l'agent protecteur, qui occasionnera de toutes façons une

dépense supplémentaire, dépendra de la valeur du métal et de son utilisation : on ne saurait songer à protéger la fonte ou l'acier de nos balcons et de nos grilles de la même façon que l'on rendra inaltérables nos couteaux de table ; on ne donnera pas une vie plus longue aux enveloppes de couples thermoélectriques portés à 800° par la même méthode que celle employée pour rendre plus durables les pots à lait ou nos couverts.

Mais, avant tout, regardons d'un peu de haut le passionnant problème de la corrosion et pour cela adressons-nous à une conférence toute récente, la première, sans nul doute, qui ait jeté un peu de clarté sur l'ensemble de la question<sup>1</sup>.

Tout d'abord il faut bien reconnaître que peu de recherches sont plus complexes, étant donné le nombre des facteurs qui interviennent : il y a tout d'abord la température, la pression, la composition et la constitution de l'alliage ; il y a aussi son état, qui résulte des traitements subis, notamment le degré d'érouissage, son homogénéité chimique et physique, les impuretés qui, même à faible teneur, jouent un rôle considérable ; enfin il y a bien d'autres facteurs, tels que : la concentration du réactif, sa variation possible de composition avec le temps, les actions alternées de plusieurs réactifs, par exemple l'action d'un réactif suivie d'une exposition à l'air, ou même l'action simultanée (action de l'air sur une plaque qui trempe en partie dans un réactif, action qui se fait souvent sentir à la ligne de démarcation) ; l'état des surfaces, leur forme,

1. Semaine du Nickel. Conférence de M. A. Portevin. *Revue de Métallurgie*. Mémoires, décembre 1927.



le rapport entre cette surface et le volume du réactif, et bien d'autres facteurs qui varient d'un cas à l'autre.

Il y a d'ailleurs une autre difficulté, non moins grande : celle de la mesure du phénomène. Les méthodes utilisant les pertes de poids ou de volume sont entachées d'erreurs du fait des dépôts qui s'accrochent à la surface ; celles mesurant le dégagement gazeux ne s'appliquent pas aux corrosions lentes, les plus importantes à étudier ; la mesure de la quantité du métal dissous apparaît comme le plus intéressant, encore faut-il faire attention aux produits d'attaque qui peuvent rester sur l'éprouvette.

La méthode calorimétrique et la détermination de la force électromotrice de dissolution sont très délicates et la dernière donne souvent des résultats incertains et non comparables entre eux.

Mais voici un fait remarquable : il existe une relation entre la constitution d'un alliage et sa corrosion.

Les produits métallurgiques formés de combinaisons ou de solutions solides, c'est-à-dire de constituants qui prennent naissance avec dégagement de chaleur, s'attaquent moins que s'ils étaient formés des mêmes métaux superposés.

Les alliages comportant deux constituants sont généralement moins résistants à la corrosion que ceux formés d'un seul constituant, ceci par suite de phénomènes électrolytiques.

C'est donc dans les alliages qui sont formés d'un seul constituant que l'on doit chercher les produits susceptibles de résister aux actions chimiques. Or, comme les combinaisons sont toutes dures et fragiles, c'est vers les solutions solides qu'il faut se retourner.

Cependant les alliages formés de combinaisons pourront à la rigueur être utilisés comme pièces de fonderie. Nous citerons les ferro-siliciums renfermant 15 à 18 p. 100 de silicium qui résistent à l'acide chlorhydrique.

Ce sont donc les solutions solides qui donnent les alliages les plus intéressants du point de vue qui nous préoccupe. Or si l'on recherche, dans les diagrammes connus, les domaines étendus de solutions solides, on les trouve dans les métaux ayant un point de fusion élevé. Il faut aller vers le fer, le nickel, le cobalt, le chrome, le cuivre. Et comme le fer est en lui-même assez altérable, que le chrome n'est pas encore fabriqué de façon courante, que le cobalt est plus coûteux que le nickel et que le cuivre donne des ennuis en présence de l'oxygène de l'air, on en arrive à cette conclusion que le nickel doit jouer un rôle important dans les alliages résistants à la corrosion.

Voyons sommairement ce qu'il en est du point de vue pratique :

Les alliages nickel-fer donnent une bonne résistance à l'acide acétique, aux alcalis, et aux atmosphères humides ; mais ils sont facilement attaqués par la vapeur d'eau surchauffée, les acides chlorhydrique et sulfurique.

Les alliages nickel-chrome sont indiqués pour les acides étendus, spécialement l'acide sulfurique ; ils sont résistants à l'oxydation. C'est pour cela que ces nichromes sont employés pour les boîtes de cémentation, pour les soupapes, pour certaines fabrications chimiques.

Les alliages nickel-cuivre sont fort intéressants ; tout spécialement le monel-métal (67 p. 100 Ni,



28 p. 100 Cu, 3 p. 100 Fe) obtenu en partant du minerai canadien, qui se comporte fort bien dans l'eau de mer, les acides et alcalis dilués.

Enfin il faut insister sur le point capital suivant : l'influence du chrome sur la résistance à la corrosion des aciers. Actuellement on trouve dans le commerce et de façon courante, sous des formes variées, couteaux, couverts, etc., des aciers contenant 13 p. 100 de chrome avec une teneur en carbone de 0,3 p. 100, parfois de 0,1 p. 100; ces aciers sont en tous points forts intéressants ; non seulement parce qu'ils résistent aux acides couramment utilisés en alimentation, notamment aux sucs des végétaux, mais ils conservent une inoxydabilité très marquée jusqu'à des températures élevées, cela avec des propriétés mécaniques intéressantes ; aussi les emploie-t-on avec succès dans la préparation de pièces exposées dans ces conditions, cannes de couples thermo-électriques, soles et pièces de four, etc.

Mais la résistance à la corrosion n'est réellement élevée qu'après trempe et polissage ; d'où une altérabilité plus grande lorsqu'on chauffe à une température qui diminue l'action de la trempe. A moins de constituer un métal qui n'ait plus besoin d'être trempé pour être inattaquable ; pour cela il faut enlever le carbure que la trempe fait entrer en solution (d'où la nuance à 0,1 p. 100 de carbone et même moins) ; ou bien ajouter du nickel en quantité telle que l'on se trouve en présence d'austenite, c'est-à-dire d'une solution solide.

D'où les aciers inattaquables contenant simultanément du nickel et du chrome ; ce sont là des

alliages remarquables au point de vue résistance aux acides ; on peut citer spécialement l'acier à 14 p. 100 Cr et 20 p. 100 Ni ; 23 p. 100 Cr et 9 p. 100 Ni.

Tel est, dans ses grandes lignes, l'état actuel de la fabrication des alliages que l'on peut préconiser pour résister à la corrosion ; faut-il encore ajouter que, dans certains cas, alors que l'on est limité par le prix, on peut chercher des produits qui, sans répondre au désir d'une non-corrosion absolue, offrent cependant une aptitude plus grande à résister à certains réactifs. On doit signaler le fait que le fer très pur — tel qu'on le prépare maintenant — se rouille moins assurément que ne le fait l'acier ordinaire et que même de faibles additions de cuivre dans un acier courant diminue l'attaquabilité.

Mais il y a un autre aspect du problème non moins intéressant ; depuis fort longtemps, on a cherché le remède à cette maladie de la corrosion en créant, à la surface du métal utilisé, une couche protectrice, couche de peinture, de laque, de vernis, de métal ou d'alliages.

Il nous faut aussi indiquer les récents progrès — et il sont très remarquables — de ces procédés qui consistent à produire cette surface non corrodable par action d'un produit métallurgique.

La question, disions-nous, est fort ancienne :

L'étamage du cuivre et du fer, la galvanisation qui revêt de zinc les produits sidérurgiques, le plombage sont d'usage courant, non seulement dans l'industrie, mais aussi dans les ménages ; cependant, ces traitements mêmes ont pris plus récemment des formes nouvelles qui permettent soit d'atteindre une plus sûre protection,



soit d'abaisser le prix de revient ; l'électrolyse, déjà largement utilisée pour obtenir les dépôts d'argent, d'or et plus couramment de nickel, est venue faciliter l'étamage et la galvanisation.

D'autre part les cémentations à température élevée, par exemple la *shérardisation* — ce nom est dû à son inventeur Shérard Cowper Cowles — a conduit à un zingage peu coûteux et, à certains points de vue, de meilleure qualité. Nous avons déjà indiqué le principe de la calorisation et nous avons vu — fait particulièrement stupéfiant, — l'aluminium venir au secours du fer pour le protéger. Enfin l'intéressante méthode de Shoop qui consiste dans un véritable bombardement au pistolet de la pièce à recouvrir par le métal de revêtement a permis de généraliser les dépôts jusqu'à les faire sur carton.

Mais voici de nouvelles méthodes qui surgissent non moins intéressantes. Les unes, électrolytiques, telles le chromage, le cobaltage, le cadmiumage — nous nous excusons de ces néologismes.

Les autres, basées sur l'oxydation même du métal à protéger, comme ce mode opératoire dans lequel on garantit l'aluminium par une mince couche d'alumine, véritable isolant utilisé dans l'industrie électrique. Et enfin voici une méthode, non point seulement curieuse en elle-même, mais d'une telle simplicité qu'elle se vulgarise avec une rapidité extraordinaire, la *parke-  
risation*.

Il est nécessaire d'entrer dans quelques détails, bien que nous voulions bannir de ce tableau d'ensemble toute la technique spécialisée qui ne peut trouver place dans ce volume.

Le cobaltage — analogue au nickelage —

paraît bien donner quelques avantages d'ordre mécanique ; mais le dépôt, dont on peut d'ailleurs discuter l'esthétique, est plus coûteux.

Le chromage présente un prix de revient encore bien plus élevé ; il opère d'ailleurs non pas par transport du métal de l'anode à la cathode, mais bien par décomposition électrolytique du bain avec anodes insolubles ; le dépôt, très beau, très dur, paraît avoir, du fait de son prix, un champ d'action limité ; mais il est des problèmes très graves où il semble s'imposer, notamment celui des calibres qui, quoi que l'on fasse, s'use et que l'on peut ramener aisément aux dimensions voulues par un dépôt électrolytique de chrome, fort dur en lui-même.

Le cadmiage serait fort remarquable s'il ne présentait un inconvénient auquel d'ailleurs on peut parer aisément ; en effet le cadmium déposé par électrolyse donne une couche très dense, excellente protection ; mais il prend bientôt une teinte grisâtre désagréable, peu séduisante.

Mais si le cadmiage est utilisé comme premier dépôt et si sur le cadmium on vient opérer un léger nickelage, on a toute la beauté reconnue à ce revêtement et, de plus, une protection remarquablement efficace.

On voit que, même dans les dépôts électrolytiques, les métaux peuvent se prêter ce mutuel appui, qui est à la base de la fabrication des alliages.

La *parkerisation* — son inventeur est Parker — ne s'adresse qu'aux produits sidérurgiques, aciers ordinaires ou spéciaux, fontes. Il est stupéfiant de simplicité et s'applique aussi bien aux ressorts de montres qu'aux mitrailleuses,



aux pièces d'armement où même aux pièces de pont.

Il consiste simplement dans une immersion dans un bain approprié. Ce bain contient des phosphates de fer et de manganèse.

Après dégraissage, lavage et décapage, les objets sont plongés dans le bain maintenu à une température voisine de son point d'ébullition. Ils y sont laissés durant une heure à une heure et demie ; puis ils sont séchés. Il se forme alors une couche rugueuse et très adhérente de phosphates basiques, de couleur grise. La pièce peut rester dans cet état ; mais si on veut lui donner un aspect plus séduisant elle est apte à recevoir des laques, des peintures, des émaux, voire une simple coloration noire par immersion dans une solution de bois de campêche.

Les essais systématiques auxquels a procédé Jean Cournot ont démontré l'efficacité extraordinaire du procédé.

Ce trop bref résumé témoigne des progrès incessants et vraiment très remarquables qu'a fait la protection contre la corrosion. N'empêche que toutes les solutions ne sont pas encore trouvées et que, notamment, la protection des objets soumis à l'effet corrosif d'un corps en mouvement rapide doit donner lieu à de nouvelles études, du moins pour de nombreux cas et que souvent on ne peut avoir recours à des revêtements qui, dans ces conditions d'utilisation, ne seraient d'aucun secours.

Un problème particulièrement angoissant est celui de la protection des métaux légers et extralégers. On sait tous les reproches que l'on a adressés à l'aluminium et à ses alliages de ce chef

et il est au moins singulier de penser que l'on a songé à rejeter ces produits parce qu'ils peuvent s'attaquer au lieu de chercher à les protéger.

Le nickelage de l'aluminium est actuellement pratiqué de façon courante, quelles qu'aient été les difficultés de détruire la pellicule d'alumine qui enlève l'adhérence au dépôt.

Sans parler de tous les goudrons, peintures, laques, que l'on préconise et qui ne sont point sans intérêt, il faut noter que, là où l'on peut pratiquer un dépôt électrolytique, le cadmiumage donne des résultats vraiment très remarquables.

Grâce à l'active commission présidée par l'Inspecteur général Grard, le problème de la protection des métaux et alliages légers est sur le point de recevoir des solutions définitives. Là encore, on pourra noter un progrès remarquable dû aux recherches françaises.





## CONCLUSIONS

Avons-nous pu donner dans ces pages une idée même incomplète de l'évolution considérable des méthodes et des produits métallurgiques depuis 1850?

Certes nous savons bien avoir été fort imprécis, nous nous rendons bien compte que maints sujets sont restés dans l'ombre, que de nombreuses questions ont été à peine esquissées.

Avons-nous atteint les deux buts que nous nous sommes proposés : intéresser ceux qui ne sont pas des spécialistes des questions métallurgiques, en leur montrant comment les recherches scientifiques ont conduit ces grandes transformations de la fabrication des métaux et de leurs alliages ;

Exciter la curiosité des industriels, en leur indiquant — parfois trop sommairement — la genèse des méthodes, leur rapprochement et surtout la généralisation de certains phénomènes du plus haut intérêt scientifique et industriel, tels la trempe, la cémentation, la protection contre la corrosion ?

Avons-nous, enfin, et une fois encore, pu établir que toutes les questions métallurgiques ne ressortent plus des vieilles recettes culinaires et que, conduites par des méthodes nées dans le labo-



*L'ÉVOLUTION DE LA MÉTALLURGIE*

ratoire et la plupart, d'ailleurs, d'origine française, elles ont aujourd'hui une envergure surprenante ?

Quel que soit le domaine envisagé dans chacun des chapitres de ce livre, deux conclusions s'imposent :

Notre pays peut et doit être fier du rôle qu'il a joué dans l'évolution des différentes métallurgies ;

La Science, et spécialement la Science française, celle à laquelle appartiennent les Osmond, les Le Chatelier et les Charpy, a bien servi l'industrie métallurgique au cours de ces cinquante dernières années.

## TABLE DES MATIÈRES

---

|   |           |
|---|-----------|
| AVANT-PROPOS . . . . .  | I         |
| <b>CHAPITRE I. — L'évolution des méthodes sidérur-</b><br><b>giques . . . . .</b>                                 | <b>I</b>  |
| La situation en 1850. . . . .   | I         |
| Le problème du chauffage des fours ; la récupé-<br>ration . . . . .   | 8         |
| Les progrès du haut fourneau . . . . .  | 11        |
| La découverte du procédé Bessemer. . . . .  | 17        |
| La découverte du procédé de fusion sur sole. . . . .  | 22        |
| La découverte du procédé Thomas-Gilchrist. . . . .  | 25        |
| Les autres procédés. . . . .  | 28        |
| Les procédés du four électrique . . . . .   | 29        |
| Situation actuelle des différents procédés. . . . .   | 34        |
| <b>CHAPITRE II. — L'évolution des méthodes dans les</b><br><b>métallurgies autres que celles du fer . . . . .</b> | <b>35</b> |
| L'évolution de la métallurgie de cuivre. . . . .  | 35        |
| Les méthodes modernes. . . . .  | 38        |
| L'évolution de la métallurgie du plomb. . . . .   | 48        |
| La méthode moderne . . . . .  | 49        |
| L'évolution de la métallurgie du zinc. . . . .  | 55        |
| L'évolution de la métallurgie du nickel . . . . .   | 59        |
| L'évolution de la métallurgie de l'aluminium. . . . .   | 64        |
| L'évolution des métallurgies des métaux précieux. . . . .   | 67        |
| <b>CHAPITRE III. — L'utilisation des résidus. . . . .</b>   | <b>71</b> |
| Généralités. . . . .  | 71        |
| Utilisation des gaz résiduels . . . . .   | 73        |
| L'épuration des gaz. Ses récents progrès. . . . .   | 73        |
| Classification et principes des méthodes em-<br>ployées. . . . .  | 73        |



TABLE DES MATIÈRES

|   |     |
|---|-----|
| II. — LES INSTALLATIONS MODERNES. . . . .   | 80  |
| III. — COMPARAISON DES PRINCIPAUX PROCÉDÉS. . . . .   | 96  |
| L'utilisation des calories contenues dans les gaz<br>résiduels . . . . .                    | 99  |
| L'utilisation de l'énergie contenue dans les gaz<br>résiduels encore combustibles . . . . . | 100 |
| Utilisation des laitiers et scories. . . . .  | 103 |
| CHAPITRE IV. — Les progrès des méthodes d'essais<br>des produits métallurgiques. . . . .    | 107 |
| Essais chimiques . . . . .  | 107 |
| Essais mécaniques . . . . .   | 110 |
| Essais physiques . . . . .  | 116 |
| Essais physico-chimiques . . . . .  | 119 |
| CHAPITRE V. — Les alliages et leurs récents<br>progrès . . . . .                            | 125 |
| Généralités . . . . .   | 125 |
| X Les aciers spéciaux . . . . .   | 125 |
| Les fontes . . . . .  | 134 |
| Les alliages de cuivre. . . . .   | 136 |
| Les alliages légers et extra-légers . . . . .   | 143 |
| CHAPITRE VI. — Les progrès des traitements des<br>produits métallurgiques. . . . .          | 150 |
| Traitements thermiques . . . . .  | 150 |
| Traitements chimiques. . . . .  | 167 |
| CHAPITRE VII. — Les maladies des produits métal-<br>lurgiques . . . . .                     | 170 |
| La poche de retassure et la ségrégation . . . . .   | 170 |
| Les gaz dissous. . . . .  | 171 |
| L'hérédité . . . . .  | 172 |
| L'écroûissage, les tensions et les criques saison-<br>nières . . . . .                      | 173 |
| Le recuit, la surchauffe et la brûlure . . . . .  | 175 |
| La maladie de Krupp. . . . .  | 177 |
| La maladie de l'étain . . . . .   | 179 |
| Autres exemples de contagion . . . . .  | 180 |
| La corrosion, ses remèdes. . . . .  | 181 |
| CONCLUSIONS . . . . .   | 193 |

- Mécanismes communs aux Phénomènes disparates, par Michel PÉTROVITCH.
- La Radiologie et la Guerre, par M<sup>me</sup> PIERRE CURIE, professeur à la Sorbonne. Avec 16 planches.
- L'Espace et le Temps, par EMILE BOREL de l'Institut, professeur à la Sorbonne. 7<sup>e</sup> mille.
- Éducation et Enseignement, par PAUL APPELL, de l'Institut, ancien Recteur de l'Université de Paris.
- L'Anaphylaxie, par CH. RICHET, de l'Institut. 5<sup>e</sup> mille.
- Défense organique et centre nerveux, par le D<sup>r</sup> PIERRE BONNIER. Nouvelle édition.
- Les Principes de la Physique, par NORMAN ROBERT CAMPBELL. Préface d'Emile BOREL.
- Le Cerveau et la Pensée, par H. PIÉRON, professeur au Collège de France.
- L'Aviation, par P. PAINLEVÉ, de l'Institut, E. BOREL, de l'Institut, et CH. MAURAIN, doyen de la Faculté des Sciences de Paris. 7<sup>e</sup> mille.
- Les Protéines, par JACQUES LOEB, Traduit de l'anglais par H. Mouton. 6<sup>e</sup> mille.
- La Révolution philosophique et la Science, *Bergson, Einstein, Le Dantec, Rosny aîné*, par J. SAGERET.
- La Géochimie, par V. VERNADSKY, membre de l'Académie des sciences de Russie, professeur agrégé de l'Université de Paris.
- L'Ultraviolet, par TH. LYMAN, professeur assistant de physique à l'Université Harvard. Trad. *M. J. Rivière*. Préface de CH. FABRY.
- Les Méthodes de prévision du temps, par J. ROUCH, ancien chef du service météorologique des armées et de la marine.
- La Théorie des phénomènes colloïdaux, par J. LOEB. Trad. *Mouton*.
- L'Évolution de l'Ornithologie, par M. BOUBIER, docteur ès Sciences, président de la Société Zoologique de Genève.
- Le Cerveau et le Cœur, par G. FANO, professeur à l'Université de Rome. Trad. *Caputo*.
- Le Tremblement de terre, par Ed. ROTHÉ, directeur de l'Institut de physique du Globe de Strasbourg. Avec figures.
- La Vie des animaux à la surface des Continents, par L. GERMAIN. Préface de M. H. Joubin, de l'Institut.
- L'Électron, par R. A. MILLIKAN, professeur de physique moderne à l'Université de Chicago. Traduit par *Ad. Lepape*.
- Vie et Mort, *Hérédité et évolution chez les organismes unicellulaires* par H. S. JENNINGS, professeur à l'Université John Hopkins de Baltimore. Traduit par *M. François Perey*.
- Les Régions polaires, par J. ROUCH, capitaine de frégate, ancien chef du Service météorologique des Armées et de la Marine.
- La Vie créatrice des Formes, par A. BRACHET, professeur à l'Université de Bruxelles, correspondant de l'Institut. Avec 29 figures.
- L'Aviation actuelle, étude aérodynamique et essais des avions. *L'Aviation actuelle et la sécurité*, par A. TOUSSAINT, directeur de l'Institut aérotechnique de Saint-Cyr-l'École. Avec 99 figures.
- Une nouvelle Philosophie des Sciences, *Le Causalisme de M. Emile Meyerson*, par A. METZ, ancien élève de l'École polytechnique. 1 vol. in 16.
- L'Évolution de la métallurgie, par L. GUILLET, de l'Institut. 1 vol. IRIS-LILLIAD - Université Lille 1



LIBRAIRIE FÉLIX ALCAN

NOUVELLE COLLECTION SCIENTIFIQUE

Volumes in-16.

PAUL PAINLEVÉ

Membre de l'Institut  
Prof. à la Faculté des Sciences de Paris  
et à l'École Polytechnique.

ÉMILE BOREL

Membre de l'Institut  
Professeur  
à la Faculté des Sciences de Paris.

CH. MAURIN

Doyen de la Faculté des Sciences de Paris.

## L'AVIATION

Nouvelle édition

Un volume, avec 48 gravures (7<sup>e</sup> mille). . . . . 10 fr. »

A. TOUSSAINT

## L'AVIATION ACTUELLE

Étude aérodynamique et Essais des Avions  
L'Aviation actuelle et la Sécurité

Un volume, avec 99 figures. . . . . 15 fr. »

R. LESPIEAU

Professeur à la Faculté des Sciences de l'Université de Paris.

## LA MOLÉCULE CHIMIQUE

Ouvrage couronné par l'Académie des Sciences

Un volume. . . . . 15 fr. »

NORMAN ROBERT CAMPBELL

Sc. D., F. Inst. P.  
Membre de la Direction des Laboratoires de recherches  
de la General Electric Ld. Londres.

## Les PRINCIPES de la PHYSIQUE

Traduit et adapté en français par M<sup>me</sup> A.-M. PEBELLIER  
PRÉFACE DE M. E. BOREL

Un volume. . . . . 10 fr. »

JEAN PERRIN, de l'Institut

Professeur de chimie physique à la Faculté

## LES ATOMES

Prix Nobel de Physique

Nouvelle édition

Un volume, avec figures (18<sup>e</sup> mille). . . . .

CH. MAURIN

Doyen de la Faculté des Sciences

## LES ÉTATS PHYSIQUES DE LA MATIÈRE

Un volume (5<sup>e</sup> mille). . . . . 10 fr. »