

Titre général : Comment on construit une automobile

Auteur : Zerolo, Miguel

Titre du volume :

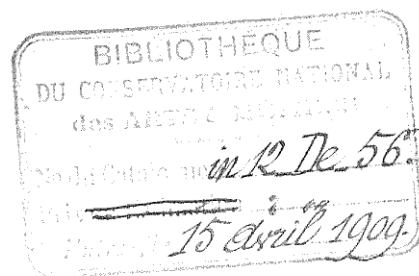
Mots-clés : Automobiles*Conception et construction*France*1870-1914 ; Automobiles*Châssis ;
Métallographie

Description : 1 vol. (404 p.) ; 19 cm

Adresse : Paris : Garnier frères, 1907

Cote de l'exemplaire : 12 De 56.2

URL permanente : <http://cnum.cnam.fr/redir?12DE56.2>



Comment on construit une Automobile

TOME II

DU MÊME AUTEUR :

MANUEL PRATIQUE D'AUTOMOBILISME. Voitures à essence, Motocyclettes, Voitures à vapeur, Canots automobiles, Pannes et leurs remèdes. — 2^e édition considérablement augmentée, 1 volume de 536 pages, orné de 169 figures, relié toile souple. . . . 5 fr.

(Ouvrage honoré d'une souscription de M. le Ministre du Commerce)

COMMENT ON CONSTRUIT UNE AUTOMOBILE. Guide du constructeur d'automobiles. Tome I. « L'outillage, Machines-outils et outils divers. » 1 volume de 408 pages, illustré de 252 fig.; relié toile souple. 5 fr.

COMMENT ON CONSTRUIT UNE AUTOMOBILE. Guide du constructeur d'automobiles. Tome III: « Procédés de fabrication et Formules pratiques. » — (Sous presse.)



M. ZEROLO

12^e De 86

INGÉNIEUR CIVIL DES MINES



Comment on construit une Automobile



TOME SECOND

LES MATIÈRES PREMIÈRES

Métaux employés dans la construction des
Automobiles. — Notions de Métallurgie.
Propriétés. — Usages. — Essais mécaniques et
chimiques. — Métallographie microscopique



PARIS

GARNIER FRÈRES, LIBRAIRES-ÉDITEURS

1907

Introduction

Par le premier volume de cet ouvrage, nos lecteurs auront fait connaissance avec le matériel de travail d'une usine de construction d'automobiles : machines-outils diverses, petit outillage ; ils auront vu aussi comment est produite et transmise la force motrice servant à animer toute l'usine. Il nous reste maintenant à étudier les matières premières employées pour la construction des diverses parties d'une voiture, ainsi que les procédés de travail permettant la fabrication des divers organes, en travaillant les matières premières au moyen de l'outillage que nous avons décrit.

Ce sont ces matériaux (ainsi que les méthodes permettant d'en contrôler les qualités) que nous allons passer en revue dans ce deuxième volume. Mais, avant d'en entreprendre l'étude, nous avons cru bon de donner aussi quelques renseignements relatifs aux matières premières employées à la confection de l'outillage : les aciers à outils et les émeris constituant les meules. En effet, la fabrication des outils a fait de très grands progrès, dont la construction automobile a largement bénéficié. C'est pourquoi il nous a paru intéressant de résumer en quelques pages préliminaires les

Guide du constructeur d'automobiles

propriétés des aciers employés aujourd'hui à la confection des outils.

Nous aborderons ensuite l'étude des métaux trouvant leur emploi dans la construction des automobiles et celle des méthodes d'essai de ces métaux.

Ce volume se trouve ainsi divisé en trois parties :

Première partie. — Les aciers à outils et les meules : Composition et propriétés des aciers à outils ; trempe des outils en acier. Produits employés dans la confection des meules ; agglomérants.

Deuxième partie. — Matières premières employées dans la construction des divers organes composant une voiture automobile.

Troisième partie. — Méthodes d'essai des métaux. Analyse chimique. Métallographie microscopique. Essais mécaniques.

La deuxième et la troisième parties comportent des développements beaucoup plus importants que la première ; elles constituent, d'ailleurs, le sujet même de ce volume auquel la première partie forme, en quelque sorte, une simple introduction.

Au cours de la deuxième partie, nous allons étudier successivement les divers métaux : fontes, aciers, cuivre, bronzes, laitons, alliages divers, etc., entrant dans la construction d'une automobile. Le sujet serait très vaste et son complet développement nous entraînerait très loin s'il nous fallait décrire avec tous détails les procédés métallurgiques servant à préparer chacun des métaux considérés, étudier les propriétés de ces divers métaux, ainsi que toutes les méthodes employées pour en contrôler la bonne qualité. L'étude com-

Introduction

plète de toutes ces questions nous aurait conduit à écrire un très gros volume. Aussi notre œuvre est-elle plus modeste. Nous nous bornerons, au cours des pages qui vont suivre, à exposer aussi simplement, mais aussi complètement que possible, d'abord l'état actuel des procédés métallurgiques, en ce qu'ils ont d'intéressant pour la construction automobile. Il nous a semblé, en effet, qu'il n'était pas sans intérêt de faire connaître les moyens de production des divers métaux employés dans la construction d'une automobile.

Puis nous étudierons les principales propriétés de tous ces métaux, les qualités qu'ils doivent posséder, les usages auxquels ils sont propres.

Les alliages utilisés dans les automobiles feront l'objet d'une étude analogue.

Mais une question du plus haut intérêt se pose dans la pratique industrielle : tel métal devant, pour l'usage auquel il est destiné, présenter telle ou telle qualité (allongement, résistance à la traction, résistance au choc, composition chimique déterminée, etc., etc.), comment le constructeur pourra-t-il reconnaître que le métal qui lui est fourni remplit ces diverses conditions ?

L'industrie dispose aujourd'hui, à cet effet, de méthodes précises et d'application aisée : essais mécaniques, analyse chimique et métallographie microscopique. Ces méthodes, arrivées à une très grande perfection, sont particulièrement intéressantes à étudier. Elles ont déjà fait l'objet de travaux considérables, dus aux plus grands spécialistes en la matière ; nous nous sommes donc

proposé, en rédigeant les chapitres consacrés aux diverses méthodes d'essai (III^e partie, chapitres I, II et III), de résumer ces travaux, d'en exposer les principes essentiels et les résultats les plus intéressants.

Les essais mécaniques sont aujourd'hui classiques ; les machines d'essai sont décrites dans le chapitre I^{er}, après quelques définitions utiles à connaître pour la compréhension des procédés d'essai (limite élastique, allongement, etc.).

Les méthodes d'analyse chimique des fontes, des aciers et des divers alliages employés dans la construction automobile sont étudiées au chapitre II. Nous avons fait, pour cette partie de notre travail, de fréquents emprunts aux magistrales publications et à l'enseignement de notre maître, M. le professeur Carnot.

La métallographie microscopique fait l'objet du chapitre suivant (chapitre III). Nous l'avons laissée pour la fin, non qu'elle le cède en intérêt aux autres méthodes d'essai, mais parce que c'est la dernière née. Malgré sa jeunesse (1), cette remarquable méthode a déjà donné des résultats pratiques extrêmement intéressants ; elle a permis de déterminer la constitution intime des principaux métaux et de leurs alliages, de reconnaître les divers éléments qui les composent et d'en déduire des conséquences fort utiles pour l'appréciation des qualités des métaux.

(1) Les premiers travaux de métallographie microscopique de MM. Osmond et Werth ont paru en 1883, et c'est en 1894 que M. Osmond publia son remarquable Mémoire sur *la Constitution des aciers au carbone*.

Introduction

L'emploi de la métallographie microscopique permet de déterminer d'une façon très nette la constitution d'une fonte, d'un acier ou d'un alliage. Grâce aux divers perfectionnements apportés récemment à la technique de la métallographie microscopique, l'examen d'un échantillon se fait avec la plus grande facilité et donne très rapidement des résultats. Cette précieuse et ingénieuse méthode d'essai tend à se répandre de plus en plus dans les grandes usines métallurgiques pour lesquelles elle constitue un procédé d'analyse fort commode, dont les indications complètent de la façon la plus heureuse celles que donnent les essais mécaniques et l'analyse chimique.

En ce qui concerne l'automobilisme, il serait à souhaiter que l'existence dans chaque usine d'un laboratoire complet pour les essais et analyses des métaux employés devînt tout à fait générale, que ce fût non l'exception, — comme c'est malheureusement un peu le cas aujourd'hui, — mais la règle. La construction automobile, en effet, ne saurait être trop soignée, trop méticuleuse même : il ne faut pas perdre de vue que les voitures sortent de l'usine, non pour figurer dans la vitrine du magasin de vente, mais pour rouler sur les routes, pour être soumises, par suite, à de rudes épreuves ; donc il faut que la voiture sorte victorieuse, car des existences humaines dépendent de cette sorte de lutte continuelle entre les « embûches de la route » et la résistance de la voiture.

Or, la résistance de la voiture est formée pour la plus grande partie de la résistance des maté-

riaux dont elle est construite. Il y aurait donc le plus grand intérêt à ce que tous les métaux employés dans la construction fussent soigneusement essayés et rigoureusement refusés par le constructeur, dès que les conditions exigées (résistance au choc, à la flexion, à la traction, limite élastique, composition chimique, etc.) ne seraient pas remplies.

Voici ce qu'écrit à ce sujet M. Léon Guillet, auteur de tant de travaux remarquables sur les métaux :

« De toutes les industries existantes, il n'en est guère qui puisse et doive se montrer plus exigeante que l'industrie de l'automobile pour ses matières premières.

« Il n'en est pas qui puisse se montrer plus exigeante, car il n'en existe point qui puisse mieux se rir du prix de ces matières premières. Il n'en est pas qui doive se montrer plus exigeante, car il n'en existe point qui encoure des responsabilités plus graves, et il serait vraiment bien inconscient, l'industriel qui lancerait des voitures sur les grandes routes sans s'être occupé des matériaux qu'il a utilisés, sans être sûr, d'une façon absolue, de leurs qualités.

« C'est en comprenant ainsi son rôle que l'industrie de la construction des automobiles doit amener des progrès énormes dans la métallurgie ; j'irai jusqu'à déclarer qu'elle doit y occasionner un bouleversement réel, je ne dis point comme quantités produites, mais comme qualités requises. Plus que les administrations de la Marine et de la Guerre, plus que les Compagnies des

Introduction

chemins de fer, elle doit coopérer à la création de produits métallurgiques nouveaux et aux perfectionnements apportés aux métaux déjà existants...

« L'automobile est née dans une période où l'on commençait à voir un peu plus clairement dans tous les alliages ; l'élan nouveau donné aux recherches de laboratoire par M. le professeur Le Chatelier, la mesure précise des températures élevées faite au moyen du pyromètre de ce même savant, la création d'une commission spécialement chargée par le ministre des Travaux publics de centraliser les connaissances que l'on avait sur les matériaux de construction, tout cela concourait à rendre la tâche plus aisée et à permettre de se mieux débrouiller dans ce dédale si complexe des produits offerts par les usines métallurgiques.

« Malgré cela, l'automobilisme, il faut bien le dire, n'a pas été en avant : il a cherché à utiliser les produits existants, employant souvent des méthodes anciennes pour transformer les produits livrés par les forges et aciéries, appliquant notamment les méthodes de cémentation et de trempe, sans prendre les précautions indiquées par la technique moderne. Je sais fort bien qu'il y a des maisons faisant exception à la règle et qui se sont imposé d'importants sacrifices pour obtenir une sécurité aussi grande que possible dans leur fabrication... »

On ne peut que souhaiter vivement que l'exemple donné par ces quelques maisons, — malheureusement trop rares encore, — soit suivi par toutes les autres, du moins par celles qui sont

Guide du constructeur d'automobiles

soucieuses de ne livrer à leur clientèle que des produits parfaits, irréprochables et justifiant en tous points leur renommée.

Il est, d'ailleurs, certain que, tôt ou tard, toutes les grandes maisons de construction automobile posséderont un laboratoire d'essais leur permettant de faire subir à toutes leurs matières premières de rigoureuses épreuves de réception, au moyen des diverses méthodes dont la science a doté la métallurgie.

Parmi ces méthodes, la métallographie microscopique a pris déjà une place très importante, que ses brillants états de services, ainsi que les progrès incessants qu'elle fait faire à nos connaissances sur la constitution des métaux et de leurs alliages, rendront chaque jour plus considérable.

Aussi avons-nous pensé que nos lecteurs trouveraient avec intérêt dans ce livre un résumé des principaux résultats acquis et des moyens qui ont permis de les obtenir (III^e partie, chapitre III). Nous avons exposé, aussi complètement que la place forcément limitée dont nous disposions le permettait, la technique de la métallographie microscopique, telle qu'elle est appliquée aujourd'hui dans les laboratoires où sont effectuées ces recherches. Cette technique est destinée certainement à subir encore des perfectionnements nombreux, mais, telle qu'elle est aujourd'hui, elle suffit déjà amplement à rendre de grands services et à fournir des résultats rigoureux.

Nous sommes heureux de remercier ici M. le professeur Le Chatelier qui a bien voulu nous aider de ses conseils pour la rédaction du chapitre

Introduction

sur la métallographie microscopique et nous communiquer la plupart des intéressants photographes dont la reproduction aide à l'intelligence du texte de ce chapitre.

Pas plus pour la métallographie microscopique que pour les autres questions traitées dans ce volume, il ne nous a été possible, vu son cadre limité, de les étudier à fond, avec tous les détails auxquels conduiraient cette étude approfondie. Il faudrait, nous le répétons, un seul volume et de grandes dimensions, pour chacune d'elles. Il nous a donc fallu en condenser les éléments essentiels, et nous souhaitons seulement d'avoir utilement préparé le lecteur à lire avec fruit et intérêt les ouvrages spéciaux déjà si nombreux parus sur ces questions, et dans lesquels elles sont traitées avec tous les développements qu'elles comportent.

M. ZEROLO.

Août 1906

PREMIÈRE PARTIE

CHAPITRE PREMIER

Les outils.

Généralités. — Une des caractéristiques principales de la construction mécanique moderne, et en particulier de la construction automobile dans les grandes usines, est l'emploi prédominant du travail fait au moyen de machines-outils.

Pour que les machines-outils donnent un travail satisfaisant et économique, il est extrêmement important que les outils qu'elles emploient soient de bonne fabrication, et qu'ils soient établis en acier de bonne qualité. Si cela peut entraîner un certain accroissement des frais d'achat, il en résulte, en revanche, une notable amélioration du rendement de la machine et de l'outil qui fera rattraper bien vite la différence.

Nous allons indiquer, dans les chapitres suivants, quelles sont les diverses sortes d'aciers employés dans la fabrication des outils (chapitre II) ; puis, nous étudierons les aciers ordinaires à outils (chapitre III) et les aciers spéciaux (chapitre IV), en indiquant les principales propriétés et les usages les plus courants.

Guide du constructeur d'automobiles

Ces derniers, les aciers spéciaux, c'est-à-dire ceux dans lesquels le fabricant a incorporé un métal (tungstène, chrome, nickel, etc., dont l'action doit s'ajouter à celle du carbone pour augmenter la dureté du métal, pour provoquer ou pour exalter telle ou telle des qualités de l'acier), tendent à devenir d'un emploi de plus en plus fréquent. Cette faveur est la conséquence toute naturelle de l'emploi également de plus en plus général dans la construction de métaux de très grande dureté nécessitant, par suite, pour être travaillés, des outils eux-mêmes très durs.

D'ailleurs, même pour le travail des métaux courants, les aciers de grande dureté présentent de réels avantages : ils permettent, en effet, un travail plus rapide, soit qu'ils donnent la possibilité de prendre des « passes » plus fortes, soit que, par suite des propriétés particulières de certains aciers spéciaux, ils ne craignent pas l'échauffement résultant de vitesses de travail très grandes des machines-outils.

Les aciers à outils de bonne qualité demandent, pour donner tous les résultats que l'on est en droit d'en exiger, à être travaillés avec certaines précautions. Nous exposerons donc (chapitre V) comment ils doivent être trempés pour ne rien perdre de leurs qualités si recherchées. Trop souvent, cette opération de la trempe des outils est faite dans les ateliers un peu au hasard. Les aciers spéciaux, notamment, demandent généralement des soins particuliers pour leur travail.

Nous compléterons ces renseignements par quelques indications rapides sur le forgeage de ces

Les Outils

mêmes aciers et sur les précautions spéciales que peuvent requérir les principaux outils employés dans les ateliers.

Enfin, pour en finir avec les matières premières employées dans la confection des principaux outils, nous parlerons (chapitre VI) de la composition des meules, des divers types qui en existent (d'après le mode de fabrication). Cette étude des meules sera complétée dans le troisième volume de cet ouvrage par l'indication des précautions particulières qu'il convient de prendre dans leur emploi pour éviter les accidents.

Telles sont les principales matières premières employées dans la fabrication des outils. Nous ne parlerons pas, en effet, du fer, du cuivre, etc., pouvant être employés dans certains outils spéciaux, tels que, par exemple, les marteaux à masse de cuivre ; ces métaux, en effet, ne présentent rien de particulier en tant que métaux à outils, tandis qu'il n'en est pas de même pour les aciers, ainsi que nous allons le voir.

CHAPITRE II

Généralités sur les aciers à outils.

Les procédés de fabrication, ainsi que les propriétés physiques et chimiques des aciers, seront étudiés plus loin (2^e partie, chapitre III), en même temps que les opérations de la trempe et du recuit (1^{re} partie, chapitre V) et les méthodes d'essai et d'analyse des aciers (3^e partie, chapitres I, II et III). Dans le chapitre qui va suivre, nous allons nous borner à quelques indications sur les particularités les plus intéressantes relatives aux aciers employés à la confection des outils.

Nous avons, en effet, étudié déjà l'outil au point de vue de son travail (1^{er} volume, chapitre IV) et considéré les diverses formes qu'il affecte dans la pratique (outils de tour, fraises, outils de raboteuses et étaux-limeurs, forets, alésoirs, etc., etc.). Pour compléter ces indications sur *les outils*, il nous reste donc à étudier rapidement la matière dont ils sont faits, l'*acier à outils* (1).

C'est ce que nous allons faire maintenant :

Ainsi que nous le verrons plus tard (2^e partie, chapitre III), l'acier peut être produit de diverses

(1) Les outils employés dans les ateliers de construction mécanique sont, en effet, pour ainsi dire, toujours en acier

Généralités sur les aciers à outils

façons, et on distingue, d'après le procédé de fabrication, l'acier *Martin*, l'acier *puddlé*, l'acier *Bessemer*, l'acier *au creuset*, l'acier *corroyé*, etc. Tous ces aciers peuvent trouver leur emploi dans la confection des outils. Toutefois, la variété la plus employée, tout au moins pour les outils de première qualité, est l'acier *au creuset*. Ce métal, en effet, possède de précieuses qualités d'homogénéité et de pureté qui le font rechercher ; mais il est d'un prix relativement élevé : aussi les fabricants font-ils parfois usage, pour les outils ordinaires, d'acier Bessemer ou d'acier Martin, sous le nom d'acier *fondue*, terme qui fait souvent croire au consommateur qu'il lui a été fourni de l'acier au creuset (O. Thallner).

Indépendamment de ces distinctions basées sur le mode de production de l'acier, on peut distinguer deux catégories principales d'aciers à outils :

1^o Les aciers à outils ne contenant que du carbone (sans aucun autre corps étranger destiné à augmenter la dureté du métal), la dureté de ces aciers étant uniquement due à leur teneur en carbone ; nous les appellerons *aciers ordinaires* ;

2^o Les aciers à outils contenant, en même temps que le carbone, d'autres corps (chrome, tungstène, nickel, etc.) destinés à en augmenter la dureté (*aciers spéciaux*).

Nous allons étudier, au cours des deux chapitres suivants, ces deux sortes d'aciers à outils, mais, auparavant, il nous faut exposer quelques indications générales s'appliquant à tous les aciers.

Influence des impuretés sur les propriétés des aciers. — La présence accidentelle dans l'acier de certaines substances (plus particulièrement le soufre, le phosphore, l'arsenic, le cuivre, etc.), même en quantité infiniment petite, en modifie complètement les propriétés, à un degré tel que quelques dix millièmes de l'une quelconque de ces substances dans un acier suffisent à le rendre impropre à la confection des outils. La qualité de l'acier dépend de sa teneur en éléments nuisibles, et la somme des quantités de ces éléments qui s'y rencontrent peut fournir une expression numérique de la qualité du métal (O. Thallner).

Des divers essais qui ont été effectués, et notamment de ceux qu'ont entrepris les aciéries de Bismarkhütte, il résulte que la quantité maxima totale d'impuretés (soufre, cuivre, phosphore) qui peut être tolérée dans un acier à outils est de 0,10 0/0. Avec cette teneur d'impuretés, le métal n'est d'ailleurs pas de première qualité : c'est un acier désigné dans le commerce : « Acier de *bonne* qualité. » Pour avoir un acier de *très bonne* qualité, il faut exiger que la somme des teneurs en soufre, cuivre et phosphore soit au plus égale à 0,06 0/0.

L'effet de ces impuretés est, surtout, d'augmenter la fragilité du métal. Il y a lieu de remarquer, cependant, que la même quantité de ces corps étrangers peut avoir un effet très sensiblement différent suivant la teneur en carbone de l'acier considéré, ou, en d'autres termes, suivant le degré de dureté de ce métal. Plus un acier est dur et plus l'influence des impuretés est notable. Les teneurs

Généralités sur les aciers à outils

maxima de 0,06 0/0 pour les aciers de très bonne qualité et de 0,10 0/0 pour les aciers bons ordinaires, sont des moyennes ; il résulte donc de ce qui précède que ces chiffres devront être légèrement abaissés pour des aciers très durs, tandis que, pour des aciers doux, une certaine tolérance est possible vis-à-vis de ces chiffres.

O. Thallner, dans son intéressant ouvrage *l'Acier à outils*, résume ces particularités dans la règle pratique suivante :

En règle générale, on pourra admettre qu'un acier, devant répondre à un but déterminé, pourra être pris d'autant plus dur qu'il sera plus pur, c'est-à-dire moins souillé d'éléments nuisibles (soufre, cuivre, phosphore, etc.).

Or, plus le métal que l'on emploiera à la fabrication d'un outil déterminé pourra être pris dur, plus sera grand le rendement de l'outil, mais plus seront délicats et minutieux les soins à donner à l'acier, au cours de la fabrication de l'outil.

Origine et influence des divers corps étrangers pouvant se trouver dans un acier. — Il est intéressant d'indiquer, même très rapidement, quelle est l'origine, dans l'acier, des divers métalloïdes et métaux exerçant une influence nuisible sur les qualités du métal, ainsi que la nature même de cette influence.

SOUFRE. — Le soufre est, avec le phosphore, l'élément nuisible le plus fréquent dans les aciers ; ceux de ces métaux où l'on ne trouve pas de soufre, tout au moins à l'état de traces, sont rares. Ainsi,

Guide du constructeur d'automobiles

voici les teneurs en soufre de quelques aciers, à titre d'exemple, d'après M. Knab :

Acier au creuset de Kapfenberg (Styrie).....	0,010
Acier puddlé d'Ebbwale	0,002
Acier Bessemer déphosphoré de Witkowitz (Moravie)	0,020
Acier Bessemer déphosphoré de Sheffield...	0,075
(Ce dernier acier, de par sa teneur en soufre seule, serait impropre à la confection d'outils de très bonne qualité, d'après ce que nous avons dit plus haut.)	
Acier fondu Krupp pour canons.....	traces
Acier Bessemer de Neuberg.....	traces

La présence presque constante du soufre dans les aciers est due à ce fait que les minerais de fer sont presque toujours accompagnés de quantités plus ou moins grandes de pyrites de fer ; de plus, les coques employés à la fabrication de la fonte en apportent aussi une certaine quantité.

Le soufre a pour effet de rendre très difficile le laminage de l'acier qui en renferme ; il donne généralement au métal une teinte plus foncée (Knab.)

PHOSPHORE. — Le phosphore a, sur les qualités d'un acier, une influence encore plus funeste que le soufre. Amené par les minerais et par les combustibles, le phosphore se réduit dans le haut fourneau et se concentre dans la fonte.

Plus l'acier considéré est carburé et plus est appréciable — et nuisible — l'influence du phosphore. C'est ainsi que du fer à peu près pur, à peine carburé, peut renfermer jusqu'à 6 millièmes de phosphore sans perdre sa malléabilité à chaud, tandis que l'acier, à 5 ou 6 millièmes de carbone, ne

Généralités sur les aciers à outils

peut se laminier que si la proportion de phosphore qu'il renferme est inférieure à un millième (Knab). La quantité de phosphore pouvant être tolérée dans un acier est d'autant plus faible que cet acier est plus dur (voir plus haut, page 21) : le carbone semble exalter l'effet des corps que peut contenir un acier.

L'effet du phosphore est de donner de la fragilité à l'acier ; dès que la teneur en phosphore dépasse 0,25, l'acier devient extrêmement cassant et tout-à-fait impropre, cela va sans dire, à la fabrication de bons outils.

Nous donnerons, à titre d'exemple, les teneurs en phosphore de quelques aciers du commerce :

Acier Bessemer de Gratz.....	traces.
Acier Krupp pour canons.....	0.020
Acier déphosphoré de Sheffield	0.036
Acier Bessemer doux de Neuberg .	0.044
Acier puddlé d'Ebbwale.....	0.096

SILICIUM. — La présence du silicium dans l'acier est à peu près constante ; les minerais sont accompagnés de gangues renfermant toujours plus ou moins de silice. Les aciers au creuset eux-mêmes, malgré leur très grande pureté, n'en sont pas tout-à-fait exempts, car le métal absorbe pendant la fusion une certaine quantité de silicium qu'il emprunte aux parois du creuset.

En général, la teneur en silicium des aciers est très faible ; l'influence de ce métalloïde sur les propriétés de l'acier n'a pas été très exactement connue pendant longtemps. Il semblait que le silicium augmentait le mordant de l'acier, mais aussi sa

fragilité (O. Thallner). Cependant, Mrazek, professeur à Przibram, s'est attaché à démontrer que le silicium est inoffensif dans un acier lorsque la teneur du métal en silicium est inférieure aux deux valeurs suivantes :

Pour 4 millièmes et plus de carbone, la teneur maxima en silicium qui peut être tolérée est de 4 à 5 millièmes ;

Pour moins de 2 millièmes de carbone, la teneur en silicium pourrait atteindre et même dépasser 1 0/0 sans que l'acier cessât d'être laminable.

Cette opinion sur le caractère inoffensif du silicium dans l'acier pour les teneurs ordinaires est aujourd'hui admise par tous. M. Léon Guillet a étudié les aciers au silicium méthodiquement et, de ses remarquables travaux, sur lesquels nous aurons l'occasion de revenir plus tard, il résulte que seuls les aciers contenant moins de 5 0/0 de silicium peuvent être utilisés et que leur résistance au choc, après trempe, est très grande. Ces aciers sont très employés pour les ressorts (voir II^e partie, chapitre IV), mais ne conviennent guère pour la fabrication des outils, pour lesquels il est nécessaire que la teneur en silicium soit très faible.

Le soufre, le phosphore et le silicium sont les trois métalloïdes se rencontrant le plus fréquemment dans l'acier, en dehors du carbone dont nous étudierons l'influence et les propriétés au chapitre III (II^e partie). Il nous reste à dire quelques mots de l'effet du cuivre sur les propriétés de l'acier. Quant aux autres métaux ayant une influence favorable sur les propriétés de l'acier (chrome, nickel,

Généralités sur les aciers à outils

tungstène, etc.), nous les étudierons en parlant des aciers spéciaux (chapitre IV).

CUIVRE. — Les minerais de fer étant fréquemment accompagnés de chalcopryrite ou pyrite de cuivre ou de malachite, le cuivre se rencontre assez souvent dans l'acier (car le cuivre, moins oxydable que le fer, ne peut guère être éliminé par le traitement au haut fourneau ou par l'affinage).

Si la teneur en cuivre d'un acier est un peu élevée, le métal devient rouverin, c'est-à-dire cassant à chaud sous le choc du marteau.

Tels sont les principaux éléments qui peuvent se rencontrer dans un acier, accidentellement, et le rendre impropre à la confection des outils.

Ayant ainsi étudié les défauts possibles d'un acier à outils, il nous reste à considérer les diverses sortes d'aciers convenant à la confection des divers outils et à en indiquer rapidement les qualités et les propriétés.

CHAPITRE III

Les aciers ordinaires à outils.

Définition. — Nous décrirons sous le nom d'aciers *ordinaires* à outils ceux qui ne doivent leur dureté qu'à leur teneur en carbone, à l'exclusion de tout autre corps (tungstène, manganèse, chrome, etc.), et par opposition aux aciers *spéciaux* qui feront l'objet du chapitre suivant, et qui contiennent certains de ces éléments dont l'action ajoutée à celle du carbone, a pour effet d'en augmenter la dureté.

Classification. — Le mode de classification des aciers à outils et les termes adoptés pour en désigner et en distinguer les diverses sortes varient considérablement d'une usine à l'autre.

Les unes font usage d'un mode de classement par numéro correspondant à la teneur en carbone. Telle est, par exemple l'ancienne *Echelle de Tunner*, employée à Neu-berg :

Acier n° 7.....	0.12 0/0 de carbone.	
— 6.....	0.28	—
— 5.....	0.50	—
— 4.....	0.75	—
— 3.....	1.00	—
— 2.....	1.25	—
— 1.....	1.50	—

D'autres usines préfèrent de simples désignations

Les aciers ordinaires à outils

telles que : *très dur, fort dur, extra-dur, dur, demi-dur, dur tenace, tenace, très tenace, doux* (O. Thallner).

Il est évident que, ces désignations ne reposant pas sur des caractères précis, exactement mesurables, elles s'appliqueront, suivant les fabriques, à des métaux de propriétés différentes. L'acier « extra-dur » de l'usine A, par exemple, pourra fort bien correspondre, comme dureté, à l'acier « dur tenace » de l'usine B. Cependant, comme le fait très justement remarquer O. Thallner, ces classifications ont leur utilité très grande malgré leurs imperfections. Le produit fourni par la fabrique X sous le nom d'acier « demi-dur », par exemple, ou d'« acier n° 4 » sera toujours semblable à lui-même. Le consommateur sera donc assuré de pouvoir toujours obtenir le même métal en demandant à la même fabrique le même acier désigné par un des termes indiqués précédemment ou par un numéro, suivant l'usage de l'usine considérée.

Voici, à titre d'exemple, la classification des aciers à outils adoptée par les aciéries à outils de Bismarkhütte, telle que la publie M. Otto Thallner, chef de la fabrication à ces aciéries, dans son ouvrage : *L'acier à outils*.

TABEAU

Guide du constructeur d'automobiles

DEGRÉ DE DURETÉ	TENEUR MOYENNE EN CARBONE	EMPLOIS
Très dur.....	1,50	Pour outils à tourner, forer, raboter, aléser des matières très dures.
Dur.....	1,25	Pour outils ordinaires de tour et de machines à raboter, pics à tailler les meules, grattoirs, etc.; pour outils à trancher les matières dures.
Demi-dur.....	1,00	Pour tarauds, forets en spirale, alésoirs, fraises, coins à frapper, poinçons, enfin pour les outils les plus divers de chaudronnerie et de forge.
Dur tenace.	0,85	Pour tarauds, fraises, alésoirs, matrices, étampes, burins, tranches, etc.
Tenace.....	0,75	Pour burins, tranches, ressorts, marteaux, etc.
Doux.....	0,65	Pour outils de forges, boute-rolles.

M. Campredon distingue sept sortes d'aciers ordinaires à outils, d'après la teneur en carbone.

N° 1-Acier à rasoirs.....	1.500	0/0 de carbone.
2-Acier à tiers-points...	1.375	—
3-Acier à outils de tour..	1.250	—
4-Acier à filières	1.125	—
5-Acier à burins.....	1.000	—
6-Acier à bédanes.....	0.875	—
7-Acier à matrices.....	0.750	—

Plus un acier est riche en carbone et plus il est

Les aciers ordinaires à outils

difficile à travailler à chaud. Ainsi que nous l'avons indiqué déjà précédemment, tous les outils de première qualité sont fabriqués au moyen d'*acier fondu au creuset*. L'acier étant d'autant plus fusible qu'il est plus dur (ou en d'autres termes que sa teneur en carbone est plus élevée), pendant longtemps, on n'a su produire d'une façon courante que des aciers durs, lesquels ne sauraient convenir indistinctement à la confection de tous les outils. Les progrès de la métallurgie ont permis de résoudre ces difficultés, et aujourd'hui les aciéries à outils parviennent à livrer couramment des aciers à outils de toutes duretés.

Nous n'entrerons ici dans aucun détail sur la fabrication de l'acier au creuset, la réservant pour l'étude sommaire de la métallurgie de l'acier que nous ferons dans la II^e partie de ce volume (chap. III).

Avant de passer aux aciers spéciaux à outils, disons encore quelques mots de la forme sous laquelle sont livrés au consommateur les aciers à outils : les fabriques débitent généralement le métal sous forme de barres prismatiques. Chacune de ces barres porte, généralement, la marque de fabrique caractéristique de l'usine productrice et une étiquette collée.

Le plus souvent, la couleur de l'étiquette varie avec la dureté de l'acier. Ainsi, par exemple, dans une certaine usine, l'acier très dur, pour outils de tour, pour planes, etc., etc. (à 1.50 0/0 de carbone), porte une étiquette jaune pâle; l'acier à 1.25 0/0 de carbone, une étiquette jaune jonquille; l'acier à 1 0/0 de carbone, une étiquette rouge, etc., etc. La couleur de l'étiquette est choisie généralement

Guide du constructeur d'automobiles

de telle façon que l'acier le plus dur reçoive l'étiquette de la couleur la plus claire, et l'acier le plus doux celle de la couleur la plus sombre (Thallner). De plus, ces étiquettes portent des indications imprimées relatives à la teneur en carbone de l'acier considéré, à sa dureté, à ses principaux usages, aux précautions à prendre, s'il y a lieu, pour le travail de cet acier (forgeage et trempe).

Cet usage n'est pas exclusivement limité, cela va sans dire, aux aciers ordinaires à outils ; les aciers spéciaux dont nous parlerons dans le chapitre suivant, sont livrés sous la même forme et portent également des étiquettes dont la couleur diffère de celles employées pour les aciers ordinaires.

La qualité primordiale à rechercher dans un acier ordinaire à outils est la pureté. Il importe, en outre, que le métal soit aussi homogène que possible, c'est-à-dire qu'il présente une uniformité absolue de composition chimique et de conformation moléculaire dans la masse du métal.

Or, il est bien démontré aujourd'hui que seule la fabrication au creuset permet d'obtenir à coup sûr un acier à outils réunissant les qualités que l'on en exige. Ce n'est qu'en fondant au creuset des matières très pures que l'on peut produire un métal parfaitement pur lui-même. C'est ainsi que les bons aciers à outils produits à Sheffield, et dont la renommée est universelle, sont obtenus au moyen de fers de Suède extrêmement purs (ne renfermant aucun des métaïloïdes qui nuisent aux qualités de l'acier). Il est, d'ailleurs, évident, *a priori*, que le creuset constitue un excellent appareil pour l'obtention d'un produit

Les aciers ordinaires à outils

exempt de substances nuisibles, puisqu'il ne met en contact le métal fondu qu'avec les parois dont l'influence est pratiquement négligeable (voir page 23) : l'acier est, dans le creuset, à l'abri de l'air et, en outre, le contact direct avec le combustible (qui introduit presque toujours du soufre ou du phosphore) est évité.

CHAPITRE IV

Les Aciers spéciaux à outils.

Définition. — On donne le nom d'aciers spéciaux à ceux qui renferment, outre le carbone, un ou deux métaux (aciers ternaires et aciers quaternaires : voir II^e partie, chapitre IV) dont l'addition a pour but d'augmenter la dureté du produit, ou de modifier favorablement certaines de ses qualités. Les métaux incorporés le plus communément à l'acier à cet effet sont le *tungstène*, le *chrome*, le *nickel* et le *manganèse*.

Donnons d'abord quelques indications sur l'influence de chacun de ces métaux sur les propriétés de l'acier.

Tungstène. — Le tungstène augmente considérablement la dureté de l'acier, ainsi que sa résistance.

Il « fortifie » le tranchant, mais, après trempe, la ténacité tend à diminuer.

Il suffit d'une addition de tungstène à la dose de 2 0/0 pour donner à l'acier, même non trempé, une texture à grain très fin, d'un velouté caractéristique ; après la trempe, même pour de très faibles teneurs en tungstène, l'acier au tungstène montre une texture très serrée et une cassure soyeuse ; pour des teneurs en tungstène plus élevées, la structure

Les aciers spéciaux à outils

de l'acier devient tellement fine et veloutée qu'il est impossible de distinguer le grain à l'œil nu (O. Thallner).

Les teneurs en tungstène des aciers au tungstène varient dans la pratique de 1 0/0 à 10 0/0. Toutefois, plus communément, elles oscillent entre 2 et 6 0/0.

Il résulte de ce que nous avons dit ci-dessus sur l'influence du tungstène sur les propriétés de l'acier, que les aciers au tungstène conviennent surtout pour les outils tranchants et ayant à travailler sans choc.

Signalons, avant de parler du chrome, un inconvénient des aciers au tungstène : après plusieurs chauffages du métal, le tungstène s'oxyde peu à peu, ce qui diminue la dureté de l'acier. Les aciers au tungstène sont, d'ailleurs, très sensibles aux excès de température.

Chrome. — Le chrome, de même que le tungstène, mais à un degré moindre que ce métal, augmente la dureté de l'acier auquel il est incorporé. Toutefois, l'action du chrome n'est pas identique à celle du tungstène : en effet, le chrome augmente très notablement l'élasticité de l'acier, ainsi que sa résistance au choc (1).

Les aciers au chrome conviennent très bien pour la confection des outils de tour : la teneur en chrome

(1) D'où l'emploi qui a été fait des aciers au chrome pour la fabrication des obus.

Guide du constructeur d'automobiles

est alors voisine généralement de 2,5 0/0, ce qui donne un métal très dur. Cette teneur atteint même, pour certains aciers, la valeur de 3 0/0. Elle est rarement inférieure à 1 0/0 (Thallner).

Nickel. — Les aciers au nickel sont assez peu employés pour la confection des outils : en effet, l'action du nickel sur le métal trempé est bien moins appréciable que celle des deux métaux précédents. Ce n'est guère que sur l'acier à l'état naturel (non trempé) que l'influence du nickel (accroissement de la dureté et de la ténacité) se fait sentir.

L'acier au nickel est donc réservé pour la construction de certains organes plutôt que pour la fabrication des outils.

Manganèse. — Il est rare qu'un acier à outils ne contienne pas une quantité plus ou moins appréciable de manganèse. Ainsi, les aciers à outils ordinaires tiennent généralement de 0,2 à 0,5 0/0 de manganèse. La présence de cette faible teneur de manganèse est due à l'addition de ce métal faite au cours de la fabrication de l'acier, addition qui a pour but d'absorber les gaz et de détruire les oxydes, d'obtenir, par suite, un métal dense et sans soufflures.

En effet, le manganèse ajouté dans ces conditions à un bain d'acier fondu, « s'oxyde aux dépens d'une partie de l'oxyde de fer mélangé au métal, et forme avec ce qui en reste et avec la silice provenant de l'oxydation du silicium et de l'usure des revêtements, une scorie très liquide qui se sépare parfaitement du métal. Si l'on n'employait pas le manganèse, une

Les aciers spéciaux à outils

partie de l'oxyde de fer resterait dans le métal et le rendrait rouverin et absolument incapable de supporter le laminage. Il est impossible de n'ajouter au bain d'acier que la quantité de manganèse qui devra passer dans la scorie, et il en reste toujours au moins 0,15 à 0,20 0/0 dans les aciers doux et 0,20 à 0,50 0/0 dans les aciers durs. Le manganèse donne aux aciers durs une grande résistance, tout en leur conservant une ductilité suffisante, ce qui ne peut être obtenu avec le carbone seul. » (Knab.)

Pour d'aussi faibles teneurs, l'influence du manganèse est cependant à peine appréciable : on observe une légère augmentation de la résistance et de la dureté ; en outre, le mordant de l'acier paraît être un peu plus vif (O. Thallner).

Malgré cela, on vend souvent dans le commerce ces aciers sous le nom d'*aciers au manganèse* ; mais il faut entendre que cette dénomination indique seulement qu'il a été fait une addition de manganèse pendant la fusion, en vue de l'obtention d'un métal homogène, sans porosité et non sujet à criquer.

Mais il existe aussi des *aciers au manganèse* véritables renfermant de 8 à 20 0/0 de manganèse. Ces aciers sont peu employés pour la fabrication des outils, bien que les aciers perlitiques (voir III^e partie chapitre III) au manganèse offrent une très grande résistance au choc (M. Léon Guillet) ; de plus, la dureté naturelle et la ténacité des aciers au manganèse véritables sont telles que le travail en est extrêmement difficile.

Un fabricant de moulages d'acier de Sheffield, M. Hadfield, obtint le premier des aciers au manganèse à très forte teneur de manganèse. Il parvint à

Guide du constructeur d'automobiles

réaliser des alliages peu carburés, tenant 10, 20 et même 30 0/0 de manganèse. Or, chose curieuse, alors que les aciers à 3 ou 4 0/0 de manganèse sont très durs et très fragiles, presque impossibles à travailler, les aciers à très haute teneur de manganèse se laminent parfaitement ; on obtient un métal exempt de soufflures, très liquide, convenant très bien, par suite, aux moulages d'acier.

Pour de très fortes teneurs en manganèse, on obtient un acier d'une extrême dureté, mais offrant une grande résistance au choc : il ne peut être travaillé qu'à la meule (on a ainsi produit des outils tranchants divers pouvant couper du fer sans être ébréchés ; ces outils sont coulés et aiguisés à la meule, sans trempe).

Classification des aciers spéciaux à outils. — Divers modes de classification sont employés dans l'industrie pour classer les aciers spéciaux à outils.

Certains fabricants les distinguent par leur composition (aciers au tungstène, aciers chromés, aciers au manganèse, etc.).

Ce système de classification, basé sur l'élément constitutif prédominant, est parfois complété par les diverses dénominations (extra-dur, dur, doux, etc.) relatives aux propriétés physiques de l'acier considéré.

O. Thallner distingue trois espèces principales d'aciers spéciaux à outils, ce sont :

1. *Les aciers à outils naturellement durs*, connus sous les noms d'acier Boreas et d'acier Mushet (voir plus loin) ;

Les aciers spéciaux à outils

2. *Les aciers spéciaux pour outils de tours;*

3. *Les aciers pour aimants.*

Disons quelques mots de chacune de ces trois catégories.

1° *Aciers à outils naturellement durs.* — Ces aciers sont caractérisés par leur très grande dureté à l'état naturel, c'est-à-dire non trempé, ce qui permet d'en faire des outils tranchants pouvant être employés sans être trempés.

Ce sont généralement des aciers quaternaires (voir II^e partie, chapitre IV); voici, en effet, quelques exemples d'analyses d'aciers à outils naturellement durs, cités par Thallner :

Acier Mushet :

Carbone.....	1.71 0/0
Manganèse.....	1.80 —
Silicium.....	0.81 —
Tungstène.....	7.75 —

Acier naturellement dur de Bismarkhütte.

Carbone.....	2.04 0/0
Manganèse.....	1.78 —
Silicium.....	1.08 —
Tungstène.....	9.50 —

Acier de Styrie :

Carbone.....	1.78 0/0
Manganèse.....	1.85 —
Silicium.....	1.01 —
Tungstène.....	9.72 —

Ce sont donc, en somme, des aciers au tungstène très carburés contenant, en outre, un peu de manganèse et de silicium.

Guide du constructeur d'automobiles

Pour donner à ces aciers la plus grande dureté possible, il faut les laisser refroidir *lentement* après les avoir chauffés au rouge cerise : la trempe ne leur donne aucune dureté.

Cette propriété des aciers naturellement durs a comme conséquence que l'échauffement de l'outil (dû à un travail rapide ou à l'attaque de métaux très durs) ne vient pas diminuer sa dureté.

2° *Aciers spéciaux pour outils de tour.* — Ces aciers, d'une très grande dureté, sont généralement composés des éléments suivants :

Carbone.....	1 à 1.50 0/0
Tungstène.....	3 à 6 —
Silicium.....	} Mêmes proportions que dans les
Manganèse..	

aciers à outils ordinaires.

On emploie, pour certains travaux de tour des aciers extra-durs désignés par les fabricants sous des noms divers, tels que : acier Poldy, Novo, Express, Speedicut, etc. Ces aciers permettent un travail environ trois fois plus rapide que les aciers ordinaires.

On fait aussi avec ces aciers spéciaux, des outils divers et notamment des forets, au moyen desquels on peut percer des pièces avec une très grande rapidité et travailler aisément des aciers très durs. Nous donnons à titre d'exemple, dans les figures 1 et 2, les diagrammes des vitesses et avances à donner aux forets "Speedicut", d'après la notice de MM. Bonvillain et Ronceray. La figure 1 est relative au perçage de la fonte, la figure 2 se rapporte au perçage de l'acier doux. La lecture de ces diagrammes nous montre, par exemple, qu'un foret

Les aciers spéciaux à outils

de 25 m/m de diamètre doit tourner dans les conditions suivantes :

1° Dans la fonte (fig. 1).

Nombre de tours par minute	200
Avance par minute.....	125 m/m
Avance par tour.....	0 m/m 40

2° Dans l'acier doux (fig. 2).

Nombre de tours par minute	300
Avance par minute.....	125 m/m
Avance par tour.....	0 m/m 70

Lorsque la pièce à travailler est mince, la vitesse et l'avance peuvent être augmentées.

Les chiffres donnés par les diagrammes pour la vitesse et l'avance peuvent dans beaucoup de cas être augmentés jusqu'à dépasser le double de leur valeur première.

Si la matière est dure, on diminue la vitesse et l'avance.

Les vitesses et les avances ci-dessus s'entendent pour le cas (sauf pour la fonte) où l'on lubrifie convenablement le foret pendant son travail. Lorsqu'il est impossible de lubrifier, il faut diminuer la vitesse et l'avance d'environ 25 %.

Enfin, il convient, pour avoir un bon rendement de l'outil, de ne jamais diminuer l'avance au-dessous d'un minimum. Ce minimum sera, par exemple (pour un foret de 25 m/m) d'environ 75 m/m par minute.

3° *Aciers pour aimants.* — Disons quelques mots aussi de ces aciers (bien qu'ils ne trouvent pas

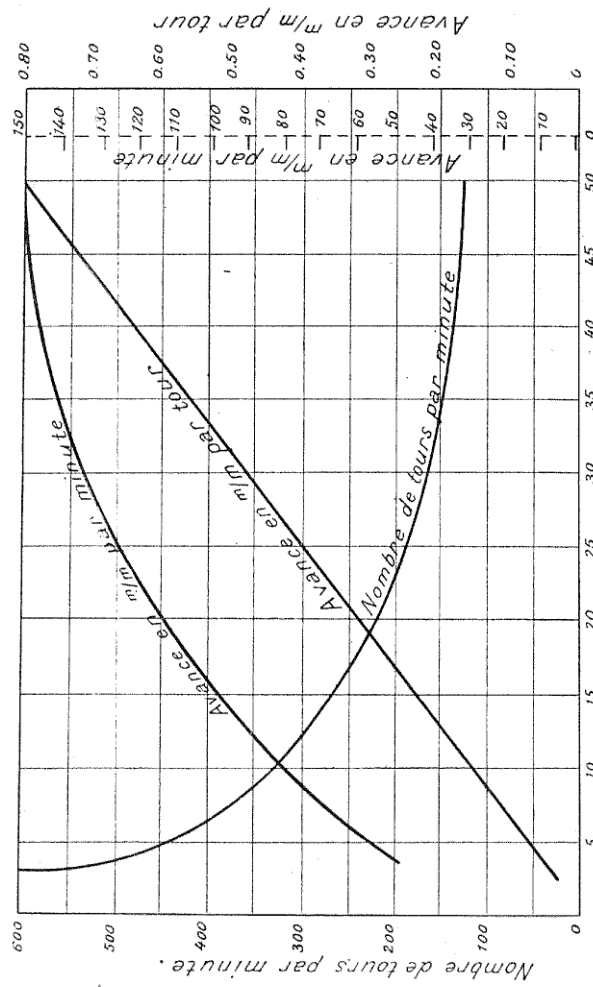


Fig. 1. — Diagramme représentant les avances et vitesses moyennes à donner aux forets hélicoïdaux en acier « Speedicut » dans la fonte.

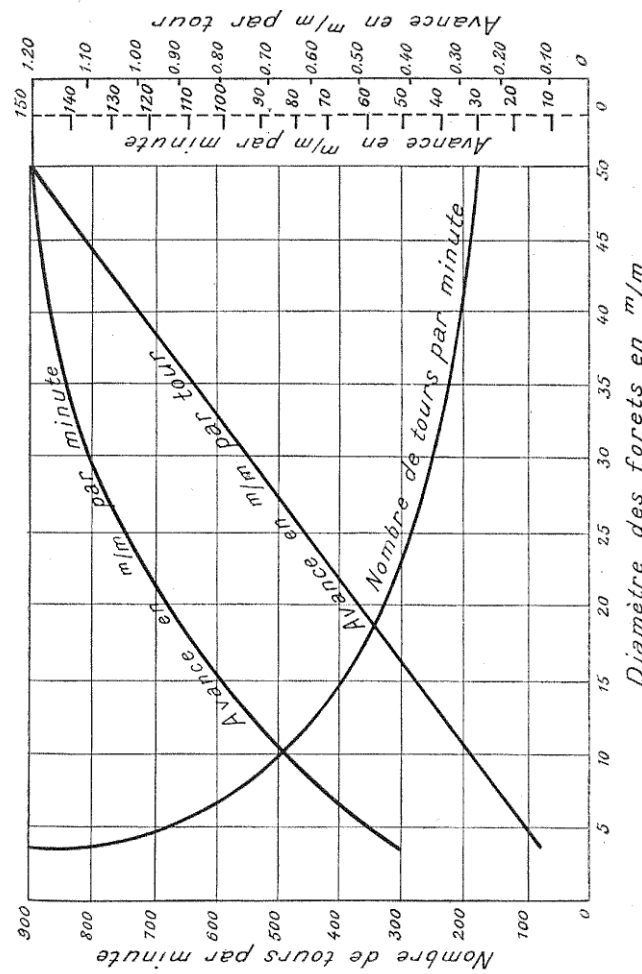


Fig. 2. — Diagramme représentant les avances et vitesses moyennes à donner aux forets hélicoïdaux en acier « Speedicut » dans l'acier doux.

Guide du constructeur d'automobiles

d'emploi pour la fabrication des outils) à cause de l'intérêt qu'ils présentent pour la construction des magnétos.

La composition chimique de ces aciers est, d'une façon générale, analogue à celle des divers aciers spéciaux. Le tungstène paraît être, de tous les métaux employés dans les aciers spéciaux, celui dont l'effet est le plus favorable, car il améliore d'une façon remarquable les propriétés magnétiques de l'acier.

Aussi les aciers pour aimants contiennent-ils, le plus souvent, une dose assez forte de tungstène (Thallner).

On a également reconnu que, plus un acier est dur et plus sont grandes aussi sa force coercitive (1) et la quantité de magnétisme absorbé.

Disons quelques mots, maintenant, des aciers employés dans la fabrication des fraises.

Aciers pour fraises. — Nous avons montré dans le 1^{er} volume (chap. VI), en même temps que les précieuses qualités de ces outils universels que sont les fraises, tous les services qu'elles sont susceptibles de rendre dans la construction mécanique et le grand usage qui en est fait.

Pour répondre à tous les besoins, les fraises doivent être faites en excellent acier : le léger supplément de dépense qui peut en résulter au moment de l'achat, est largement compensé par le travail que fournit l'outil.

Une seule sorte d'acier convient pour la fabrica-

(1) On sait qu'on donne le nom de force coercitive à la cause de la persistance de la force magnétique après aimantation d'un aimant artificiel.

Les aciers spéciaux à outils

tion des fraises, disent MM. Jurthe et Mietzschke(1), « c'est un acier exempt de tout mélange nuisible (soufre, phosphore, cuivre, arsenic, etc.), ayant une teneur en carbone variant de 1 à 1,5 0/0.

« De plus, comme il est nécessaire d'avoir une dureté spéciale pour la puissance de coupe de l'acier de la fraise, on ajoute à l'acier du wolfram (tungstène), du chrome, du manganèse et d'autres métaux analogues. Ces additions, en apportant les qualités de ces métaux, élèvent puissamment la qualité et la résistance de l'acier. Les fraises faites en acier au tungstène se sont particulièrement bien comportées; elles possèdent une trempe et une résistance pour la coupe de tout premier ordre. »

On fabrique également des fraises en « acier pour tournage rapide », contenant des mélanges en proportions variables de tungstène, chrome et manganèse.

Les aciers pour fraises sont connus dans le commerce sous divers noms, tels que *Böhler-Rapid*, *Poldi-Hütte*, etc. L'acier pour fraises Böhler-Rapid se laisse facilement travailler par l'acier fondu ordinaire à outils, tandis que le 000 Poldi-Hütte est difficile à travailler.

Voici, d'après Jurthe et Mietzschke, quelques exemples d'analyses de ces aciers, choisis parmi les plus connus :

Acier B :

Carbone	0,6 à 0,7 0/0
Chrome	7
Tungstène ..	21

(1) O. Jurthe et Mietzschke, *Le Fraisage*, Paris, Dunod, 1905.

Guide du constructeur d'automobiles

Acier P :

Carbone.....	0,6
Chrome.....	7
Tungstène.....	10

Acier K :

Carbone.....	0,7
Chrome.....	3
Tungstène.....	9

Acier T :

Carbone.....	0,7
Chrome.....	3
Tungstène.....	9

Acier S :

Carbone.....	0,6
Chrome.....	3
Tungstène.....	9
Molybdène.....	4

Ces aciers spéciaux pour fraises donnent d'excellents résultats, mais, ainsi que nous le montrerons plus loin (chap. V), ils doivent être traités avec des précautions particulières, en ce qui concerne la trempe (refroidissement dans un courant d'air froid notamment).

Mais les avantages des « fraises à grande vitesse de coupe » valent bien ces quelques soins à leur donner : elles réalisent, en effet, un très grand progrès dans la technique du fraisage, dont on ne peut même pas encore prévoir toute la portée (E. Jurthe et O. Mietzschke). Les nombreuses expériences qui ont été faites à ce sujet sont, en effet, nettement

Les aciers spéciaux à outils

concluantes (on a pu réaliser des vitesses de coupe variant de 300 à 874 millimètres par seconde, avec des vitesses d'avance de 64 à 134 millimètres par minute).

Pour achever cette étude rapide des aciers à outils, il nous reste à donner quelques indications sur la trempe des outils. Cette question rentrerait peut-être plutôt dans le cadre du III^e volume, mais, comme elle est intimement liée à l'étude même des aciers à outils, nous avons préféré ne pas l'en détacher et elle fera l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE V

La trempe et le forgeage des outils.

Phénomène de la trempe. — On sait que l'on donne le nom de *trempe* à l'opération qui consiste à chauffer un corps jusqu'à une certaine température, puis à le refroidir rapidement, en le plongeant dans un milieu à basse température, liquide (eau, huile, etc.) ou même gazeux (courant d'air froid employé pour la trempe de certains aciers à fraises : voir plus loin).

Appliquée à l'acier, la trempe a pour but d'augmenter la dureté du métal. Elle le rend, de plus, susceptible de prendre un brillant poli.

A l'état naturel, c'est-à-dire non trempé, l'acier a, le plus souvent, des propriétés analogues à celles du fer, il se laisse plier et sa dureté n'est guère plus élevée que celle du fer : il est alors ductile et malléable. Mais, après la trempe, le métal devient beaucoup plus dur en même temps qu'il devient aussi élastique et cassant.

D'ailleurs, s'il est facile, par la trempe, de donner ces qualités nouvelles à un acier à l'état naturel, il est également possible de réaliser la transformation inverse, et de faire reprendre à l'acier son état primitif.

Le Recuit. — C'est en cela que consiste l'opération du *recuit* ; il suffit de chauffer à une température

La trempe et le forgeage des outils

convenable (voir plus loin) l'acier trempé, et de le laisser refroidir ensuite très lentement : l'acier revient à l'état primitif. On peut, du reste, graduer cette nouvelle transformation et arrêter l'effet du recuit à un point déterminé.

Cette faculté est précieuse : en effet, d'une part, le travail de l'acier trempé serait pratiquement impossible. Par le recuit, il est facile de ramener un outil trempé à l'état primitif, dans lequel le métal se laisse aisément forger.

D'autre part, le recuit permet de corriger les effets fâcheux, dans certains cas, d'une trempe trop dure.

Remarquons, d'ailleurs, que tous les outils subissent un certain recuit après la trempe (voir plus loin).

Tous les aciers n'ont pas besoin d'être trempés ; il en existe, nous l'avons déjà dit (voir p. 37), qui sont d'une dureté telle à l'état naturel, que toute trempe est inutile : d'ailleurs, cette opération aurait un effet inverse de celui qu'elle a habituellement.

Pour tremper un outil, il faut donc :

- 1° Chauffer l'acier ;
- 2° Le refroidir rapidement ;
- 3° Le recuire à un degré déterminé.

Nous allons étudier successivement chacune de ces trois opérations, assez délicates, et qui ne sont réussies à coup sûr que par des ouvriers habiles et expérimentés.

A. — Pratique du chauffage de l'acier à outils —

Les outils en acier doivent subir des chauffages, soit que l'on ait besoin de les forger pour en modifier la forme, soit que, une fois l'outil arrivé à sa forme

définitive, on veuille le tremper ou le recuire.

Le chauffage de l'acier doit être fait avec certaines précautions, si l'on veut éviter de faire perdre à l'acier quelques-unes de ses qualités.

On doit s'efforcer, tout d'abord, de réduire au minimum le nombre des « chaudes » ou chauffages que l'on fait subir à l'acier pour pouvoir le forger. Nous avons vu précédemment que certains aciers sont altérés par les chaudes répétées. Cependant, si l'on observe quelques précautions au cours de ces opérations, il est possible de faire subir au même outil toute une série de chaudes sans altérer les qualités du métal.

Voici, tout d'abord, quels sont les deux principes fondamentaux, dont l'observation rigoureuse est indispensable si l'on veut obtenir des résultats satisfaisants (O. Thallner) :

1° *L'acier doit être toujours chauffé le plus uniformément possible, et de telle façon qu'en aucun de ses points le métal ne se trouve porté à une température supérieure à celle qui est rigoureusement nécessaire à la réussite de l'opération en vue de laquelle le chauffage a lieu.*

2° *On doit chauffer aussi rapidement qu'on peut le faire sans que certaines parties de la pièce à chauffer (angles, arêtes) prennent une température supérieure à celle du corps même de la pièce.*

Les combustibles. — Mais ce ne sont pas là les seules précautions à prendre. Lorsque le chauffage de l'acier se fait dans une forge ouverte (ce qui est, jusqu'à présent, le cas le plus fréquent), la composition du métal peut subir de profondes altérations du

La trempe et le forgeage des outils

fait des impuretés contenues dans les combustibles employés, et plus particulièrement du soufre.

En effet, le combustible adopté le plus souvent pour l'alimentation des forges est le *charbon de forge* ou *houille grasse maréchale* qui boursoufle fortement au feu et a un pouvoir calorifique très élevé. Mais cette houille contient généralement une teneur assez élevée en soufre. Or, l'affinité du soufre pour le fer à température élevée est très grande, et la combinaison qui en résulte enlève toutes ses bonnes qualités au métal. Il est évident, d'ailleurs, qu'il est peu logique d'exiger du fabricant un acier de grande pureté, à teneur extrêmement faible en soufre, pour faire subir ensuite à ce métal des opérations ayant pour effet d'en altérer la pureté.

Pour éviter ce grave inconvénient, le mieux est d'empêcher tout contact direct entre le combustible et le métal : nous verrons plus loin que cela est possible et nous montrerons comment.

Il peut arriver, cependant, que l'on ne dispose pour le chauffage de l'acier que d'une forge ouverte et de houille maréchale. Voici comment on peut alors, dans une certaine mesure, obvier à l'inconvénient signalé :

Laisser la houille s'allumer parfaitement, et lorsqu'elle sera en pleine incandescence, attendre que le coke qui se sera formé ne dégage plus de fumées visibles. Opérer de même chaque fois qu'on jettera du charbon frais sur la grille. Dans ces conditions, le soufre est éliminé aussi complètement que possible (O. Thallner).

On fait usage parfois, dans les forges ou feux de maréchal, de *cokes durs* ou *cokes de fonderie*. Ces

combustibles exigent beaucoup de vent : il en résulte une certaine facilité pour brûler l'acier traité par ce moyen. O. Thallner conseille, lorsqu'on est forcé de

se servir de ces cokes, de les employer dans un four cylindrique vertical de 1 mètre de hauteur environ et de 0^m,40 à 0^m,60 de diamètre (voir fig. 3). Au-dessus de ce corps cylindrique est disposé un laboratoire A, réchauffé par la combustion du coke en F, et dans lequel se fera le chauffage de l'outil, soit en le tenant au moyen d'une pince, soit en le posant sur une grille *dd*.

Le four est soufflé par *v*.

C'est là déjà un

premier système évitant le contact immédiat entre le combustible et le métal.

Les appareils de chauffage. — Aussi bien dans les

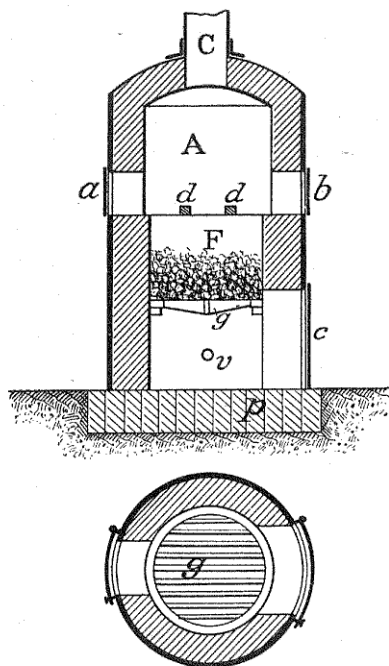


Fig. 3. — Four à cuve pour chauffage au coke des outils avant trempe (d'après O. Thallner).

La trempe et le forgeage des outils

forges ouvertes ou feux de maréchal que dans les fours rudimentaires, le chauffage uniforme et régulier des grandes pièces d'acier est très difficile sinon impossible. Même pour des outils de faible dimension, il faut des ouvriers extrêmement habiles pour vaincre la difficulté. Or, ainsi que nous l'avons dit tout à l'heure, si l'on ne veut pas voir éclater la pièce en plusieurs endroits au moment de la trempe, il faut la chauffer avec la plus grande régularité possible. Cela est tout à fait impossible dans un feu de maréchal.

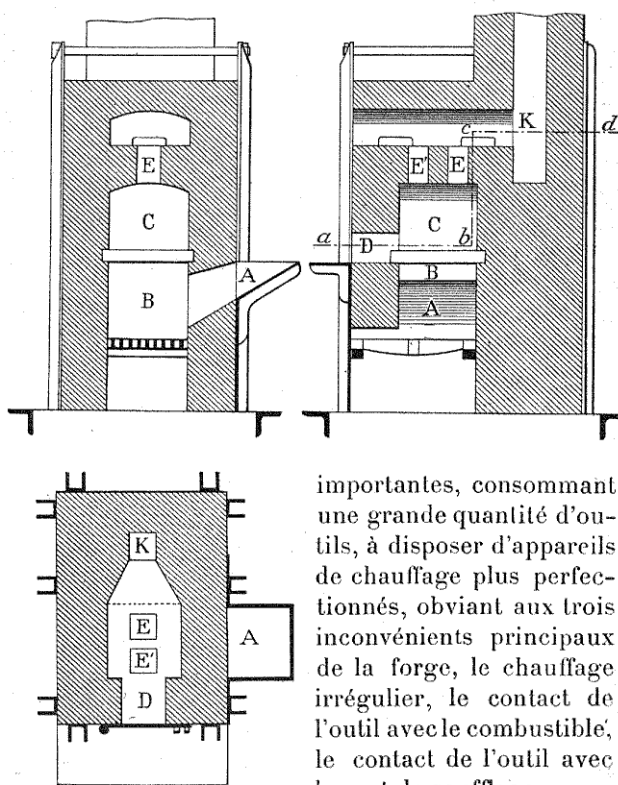
Cependant, il n'est pas impossible d'agencer une forge ouverte pour éviter ces inconvénients : O. Thallner indique notamment de disposer dans la forge, appuyée sur un barreau d'acier, une sorte de boîte en tôle garnie d'argile, liée avec du poil de vache, et formant, en quelque sorte, un four à moufle primitif.

Ce procédé ne pourrait guère être employé, d'ailleurs, si l'on fait usage dans la forge, de houilles grasses maréchales. Il faut alimenter le feu avec du coke ou du charbon de bois.

Un autre inconvénient du chauffage des outils par contact direct avec le combustible dans les feux de forge, est que l'acier se trouve exposé au vent, dont l'effet est d'oxyder la surface du métal ; d'enlever même au métal, lorsqu'il est porté à l'incandescence, partie de son carbone (cette réaction, dont l'effet est de diminuer la dureté et le mordant de l'acier, se fait précisément surtout aux pointes où une plus grande dureté est nécessaire, sur les angles, arêtes et tranchants).

Guide du constructeur d'automobiles

Pour toutes ces raisons, il y a intérêt, toutes les fois que cela est possible et surtout dans les usines



importantes, consommant une grande quantité d'outils, à disposer d'appareils de chauffage plus perfectionnés, obviant aux trois inconvénients principaux de la forge, le chauffage irrégulier, le contact de l'outil avec le combustible, le contact de l'outil avec le vent de soufflage.

Fig. 4. — Four à tremper pour chauffage au coke (d'après Jurthe et Mietzschke).

Les *fours à cuve*, dont nous avons déjà indiqué un exemple (fig. 3), remédient à ces inconvénients.

La trempe et le forgeage des outils

La figure 4 représente un autre four à tremper pour chauffage au coke. La figure montre : à gauche, une coupe verticale transversale du four ; à droite, une coupe verticale perpendiculaire à la précédente ; enfin, à la partie inférieure, une coupe horizontale par *a b c d*. On alimente par A ; B est le foyer et C la chambre de chauffe fermée par une porte en D. Les gaz chauds s'échappent par E, E' vers la cheminée K.

L'emploi des *mouffles* donne de très bons résultats parce qu'il évite, d'une façon très complète, tout contact entre le combustible et même les gaz chauds et l'outil à tremper.

Il existe un grand nombre de systèmes de fours à tremper à moufle. La figure 5 en représente un modèle, d'emploi très pratique, pour chauffage au gaz ;

A est le moufle ou chambre de chauffe, en terre réfractaire. Les gaz chauds l'entourent de tous côtés (ils brûlent en B) ; le chauffage est ainsi très uniforme. Un petit ventilateur C fournit le courant d'air né-

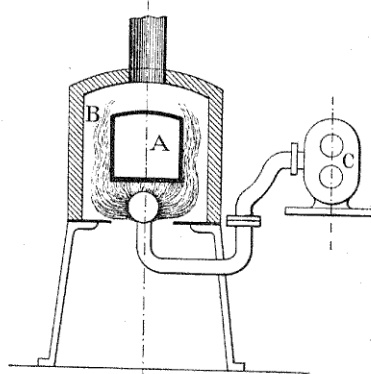


Fig. 5. — Four à tremper à moufle, avec chauffage au gaz.

On a recommandé, notamment pour les fraises, de

Guide du constructeur d'automobiles

chauffer rigoureusement à l'abri du contact des gaz chauds. Dans ce but, les fraises sont empilées dans des caisses ou dans des moufles entre des matières qui peuvent avoir une bonne influence.

On a employé notamment ainsi du charbon de peau et de la farine de sabots. Aussitôt que les fraises ainsi disposées s'échauffent, les matières dégagent des gaz qui réagissent sur les fraises et leur apportent de nouvelles quantités de carbone améliorant beaucoup la trempe et la durée de coupe. Comme, en outre, elles ne se trouvent à l'air libre d'aucun côté, elles ne peuvent s'oxyder et conservent une belle couleur grise. Ce mode de chauffage des fraises est maintenant le plus employé, et beaucoup de fabriques d'outils renommées l'emploient exclusivement (Jurthe et Mietzschke).

Chauffage des outils dans des bains métalliques. —

Le chauffage en moufle donne toute satisfaction au point de vue de l'absence de contact entre l'outil chauffé et le combustible ou les produits de la combustion. Mais la répartition de la chaleur dans l'outil peut devenir irrégulière, par suite, notamment, du contact de l'outil avec les parois du moufle.

On a donc cherché, surtout pour certains outils délicats, tels que les fraises, par exemple, un procédé de chauffage assurant une répartition plus régulière de la chaleur. On obtient ce résultat en chauffant l'outil dans un *bain de métaux en fusion* ou dans une *dissolution de sels* dont le point de fusion est connu.

Le métal le plus employé à cet effet est le *plomb*, choisi aussi pur que possible (surtout exempt de

La trempe et le forgeage des outils

soufre). Le plomb fond à 327° C., à une température, par suite, plus basse que la température de trempe de l'acier fondu; pour atteindre celle-ci, il faut donc chauffer davantage le bain de plomb. Pour éviter autant que possible la vaporisation du plomb et son oxydation, on le recouvre d'une couche de 2 à 3 centimètres de poussière de houille.

Le plomb est fondu dans un creuset en fonte sur un four spécial ou un feu de forge ouvert.

On a soin de ne pas abandonner les outils dans le bain de plomb, car les couches inférieures sont souvent à température plus élevée : on les suspend à des fils de fer.

Il est évident que l'évaluation exacte de la température, dans ces conditions, n'est guère possible que si l'on fait usage d'un pyromètre. Faute de cet instrument, on devra se contenter de l'évaluation approximative au moyen de l'incandescence de l'outil (Voir plus loin, p. 57).

Le procédé qui consiste à chauffer l'acier dans des *sels fondus* est peu répandu, bien qu'il constitue une des meilleures méthodes connues (O. Thallner).

On emploie divers sels pour composer ces bains, mais, en raison de ses qualités et de son prix modique, le *sel marin* ordinaire est le plus employé. On fond le sel dans un creuset de fonte, comme le plomb; pour faciliter la fusion du sel marin, on commence par fondre dans le même récipient un peu de carbonate de soude du commerce, plus fusible. On recommande aussi d'ajouter un peu de salpêtre pour donner de la fluidité au bain, et de chromate de potasse qui améliore le bain.

Guide du constructeur d'automobiles

L'addition d'un peu de ferro-cyanure de potassium améliore également le bain ; en en mettant une proportion convenable, non seulement on remédie à la décarburation possible des outils dans le bain, mais encore on donne à celui-ci des propriétés cémentantes et on peut améliorer la qualité de certains aciers.

Il va sans dire que le même inconvénient du surchauffage peut se produire, comme avec le plomb ; toutefois, les inconvénients sont moindres, parce que le surchauffage se manifeste par un bouillonnement de la masse fondue. Il est donc plus facile de l'éviter.

On suspendra également les outils dans le bain, au moyen d'un fil de fer.

Avant de plonger les outils dans le bain de sel fondu, on devra soigneusement s'assurer que l'outil n'est recouvert ni d'huile, ni de crasse, ni d'eau (la moindre humidité sur la pièce pourrait provoquer la projection explosive, très dangereuse, de la masse fondue). Il suffit de les chauffer légèrement pour éviter la présence d'eau.

Avec le bain de plomb, on risque que le métal reste adhérent à l'acier en certains points (surtout dans les angles rentrants, entre les dents, etc.) ; la conséquence en est que, dans le bain de trempe, le contact direct entre l'outil et le liquide n'a pas lieu, et les parties ainsi recouvertes de plomb ne sont pas trempées.

Cet inconvénient n'est pas à craindre si l'on emploie le bain de sel fondu : l'enduit fluide qui pouvait adhérer à l'acier se détache de lui-même dès qu'on plonge l'outil dans le bain de trempe.

La trempe et le forgeage des outils

Enfin, le bain de sel fondu a l'avantage de conserver à la surface de l'outil l'aspect métallique ; il nettoie même un outil dont la surface serait oxydée.

C'est donc là une excellente méthode à tous les points de vue et dont l'adoption est tout particulièrement à recommander pour le traitement des outils importants et notamment des fraises.

ÉVALUATION DE LA TEMPÉRATURE DE L'ACIER

Dans les diverses chaudes que doit subir l'acier pour être travaillé, ou en vue de la trempe, il est toujours très important de pouvoir apprécier aussi exactement que possible la température à laquelle est porté l'outil chauffé. L'évaluation exacte de ces températures ne peut guère se faire qu'avec un pyromètre, instrument dont l'emploi industriel tend à se généraliser. Nous en décrirons succinctement plus loin les types les plus employés à ce jour.

Mais, dans certains cas, une simple évaluation approximative suffit, ou bien on se trouve conduit à apprécier la température sans disposer de pyromètre. On met alors à profit les phénomènes lumineux qui accompagnent l'échauffement de l'acier. Ils se traduisent par des changements de couleurs se produisant aux températures suivantes :

Rouge naissant.....	515 à 550°
Rouge sombre.....	650 à 700°
Cerise naissant.....	750 à 800°
Cerise.....	800 à 900°
Cerise clair.....	900 à 1.000°
Orangé foncé.....	1.000 à 1.100°
Orangé clair.....	1.100 à 1.200°

Guide du constructeur d'automobiles

Blanc sale.....	vers	1.250°
Blanc soudant.....	vers	1.300°
Blanc éclatant.....	vers	1.400°
Blanc éblouissant....	1.500 à 1.600°	

A cette dernière température, l'acier lance des étincelles.

Mesure des températures élevées au moyen de pyromètres.

L'usage de pyromètres permet seul une évaluation exacte de la température à laquelle est porté l'acier. Combiné à l'un des procédés que nous venons d'étudier (chauffage des outils dans des bains de plomb ou de sels fondus), le pyromètre permettrait même d'exécuter les opérations de trempe avec une exactitude et une régularité toutes scientifiques.

Nous décrivons ici deux pyromètres qui, par leurs nombreuses qualités, se sont rapidement répandus dans les laboratoires : le *pyromètre thermo-électrique* de M. le Professeur Le Chatelier et le *pyromètre* de Féry ou *lunette pyrométrique Féry*.

Nous dirons aussi quelques mots de la *lunette pyrométrique Le Chatelier* ou *pyromètre optique Le Chatelier*.

Pyromètre thermo-électrique Le Chatelier. —

On connaît le principe des pyromètres thermo-électriques : « La soudure de deux métaux chauffés à une température donnée est le siège d'une force électromotrice qui n'est fonction que de la température seule, au moins dans certaines conditions. Dans un circuit renfermant plusieurs soudures

La trempe et le forgeage des outils

différentes à des températures différentes, la force électromotrice totale est égale à leur somme algébrique. Dans un circuit fermé, il se produit un courant égal au quotient de cette force électromotrice résultante par la résistance totale (1). »

Le couple thermo-électrique du pyromètre de M. Le Chatelier est formé de deux fils, l'un de platine, l'autre de platine rhodié, à 10 0/0 de rhodium.

Les extrémités des deux fils sont tortillées ensemble, mais il ne faut pas se contenter de ce mode de réunion, car ils peuvent se détordre aux températures élevées; il est donc préférable de les souder. Pour effectuer cette soudure, on dispose de trois moyens :

α. — Lorsque le couple ne doit servir qu'à la mesure de températures moyennement élevées (inférieures à un millier de degrés), on peut se contenter de la soudure à l'or, la plus facile à exécuter : il suffit d'entortiller un fil d'or autour de l'extrémité des fils; on peut fondre dans un simple bec de Bunsen.

β. — On peut aussi souder au palladium; mais ce métal est moins fusible que l'or; pour arriver à le fondre dans un bec de Bunsen, il faut le protéger contre le rayonnement en plaçant le couple à souder dans un creux ménagé dans un morceau de charbon.

γ. — Mais, toutes les fois que l'on dispose d'un chalumeau oxyhydrique, il est préférable de faire la

(1) H. Le Chatelier et O. Boudouard, *Mesure des températures élevées*, Paris, 1900.

Guide du constructeur d'automobiles

soudure autogène. On prépare le couple en tortillant les extrémités des fils et on chauffe jusqu'à ce qu'on voie se produire la fusion des premières spires.

Le couple étant ainsi soudé, il est bon de le protéger contre toutes les causes de détérioration (tous les métaux fondus, notamment, attaquent le platine). Dans les laboratoires, on se contente parfois d'enduire le couple de la pâte suivante (M. Roberts Austen) :

Argile.....	10 parties.
Quartz pulvérisé très fin.....	90 —
Silicate de soude.....	Quantité suffisante pour avoir une pâte qui ne soit pas trop fluide.

On peut encore, — et c'est peut-être un mode de protection plus efficace — enrouler autour des fils du fil d'amiante (qui empêche tout contact entre les deux fils) et placer le tout dans un petit tube de porcelaine.

Enfin, dans les usines, on préfère souvent faire passer les fils dans des tubes de porcelaine ou mieux de terre réfractaire perforés de deux trous sur toute la longueur (fig. 6), ces tubes étant eux-mêmes placés dans une canne de fer ou de nickel; la soudure dépasse les isolants et la canne en nickel qui les contient de 5 centimètres environ; de petits tubes en porcelaine servent à protéger cette soudure.

L'autre extrémité de la canne en nickel porte une poignée en bois P sur laquelle se trouvent, extérieurement, les bornes de prise de courant *b* et *b'* et, intérieurement, deux pinces qui limitent la longueur du couple, ainsi que deux poulies sur chacune

La trempe et le forgeage des outils

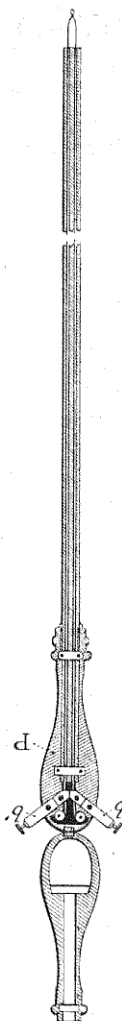
desquelles est enroulée une longueur supplémentaire de fils du couple, ce qui permet d'en faire sortir une nouvelle quantité en cas d'avarie de la soudure.

Le platine est indispensable lorsqu'il s'agit de mesurer des températures très élevées, par exemple pour des températures supérieures à 700 ou 800°, mais il a le défaut de coûter fort cher et de s'altérer relativement vite. (En atmosphère réductrice, notamment, il devient rapidement cassant.) Aussi a-t-on cherché à le remplacer par un métal moins cher, au moins pour la mesure des températures inférieures à 800°. Un couple constitué par un fil de fer et un fil de *constantan* (alliage à parties égales de cuivre et de nickel) donne d'excellents résultats. On fait usage des mêmes galvanomètres que pour les couples platine + platine rhodié (voir plus loin) : la graduation seule diffère.

Un couple thermo-électrique ainsi constitué étant chauffé, il se développe une certaine force électro-motrice, d'autant plus intense que la température à laquelle est portée la soudure est plus élevée.

La température peut se déduire de

Fig. 6 — Couple thermo-électrique de M. H. Le Chatelier, monté dans une canne en nickel.



la force électromotrice quand la résistance du circuit est connue ou lorsque cette résistance est constante. Pour mesurer la force électromotrice, on fait usage d'un *galvanomètre*. Les expériences sur la résistance spécifique du platine ont conduit à l'adoption de galvanomètres à résistance de 200 ohms.

On emploie, par exemple, le *galvanomètre aperiodyque Deprez d'Arsonval*, avec cadre en fil de maillechort de 0^{mm}2 à 0^{mm}3 de diamètre.

M. Carpentier construit un galvanomètre dans lequel la lecture sur l'échelle graduée se fait au moyen d'un microscope. L'appareil est enfermé dans une boîte et le tout constitue un ensemble robuste et facile à transporter. Dans ce galvanomètre, le

cadre est suspendu au moyen d'une petitespirale, moins fragile qu'un fil fin.

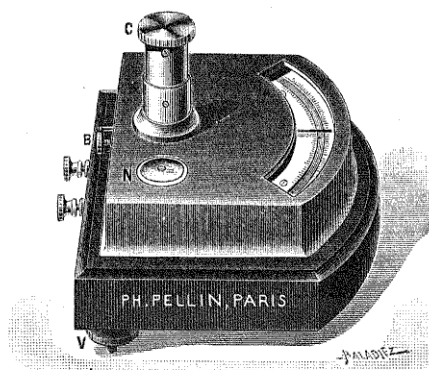


Fig. 7. — Galvanomètre pyrométrique à lecture directe, de M. H. Le Chatelier.

Le *Galvanomètre pyrométrique à lecture directe* de M. H. Le Chatelier, construit par M. Pellin, et

que représente la figure 7, est d'un emploi particulièrement commode. C'est un instrument robuste, établi pour être employé dans les laboratoires industriels.

Il se compose d'un aimant en acier au tungstène

La trempe et le forgeage des outils

logé dans le socle de l'appareil (un centrage précis de l'armature cylindrique permet d'obtenir un champ circulaire très uniforme), d'un cadre mobile et d'une suspension en fil de platine. Le fil qui est en communication avec la masse et qui constitue un pôle, sert de support au cadre mobile constitué par un enroulement de fil de maillechort; il sert également de conducteur, étant réuni à l'une des extrémités de la bobine. L'autre extrémité du fil du cadre est reliée à une spirale en fil de platine isolée de la masse, constituant le second pôle de l'appareil.

Le cadre tend, sous l'action du courant du couple, à se mettre dans un plan perpendiculaire à celui de l'aimant, la torsion du fil de suspension s'oppose en partie à l'action du courant et ce cadre s'arrête dans une position d'équilibre qui dépend de la force du courant et de la valeur du couple de torsion.

L'appareil est gradué en millivolts et en *degrés de température*; une aiguille en aluminium terminée en lame de couteau se déplace sur la double division dont l'échelle totale est établie pour 800 ou 1600°, selon qu'on veut employer un couple fer + constantan (voir plus haut) ou un couple platine + platine rhodié.

Cet appareil peut être installé à n'importe quelle distance du couple thermo-électrique et ses indications ne sont pas sujettes aux influences magnétiques extérieures, grâce au principe de sa construction (cadre mobile en champ magnétique permanent).

Pour *régler* l'appareil, on en règle d'abord l'horizontalité au moyen des vis *V* du socle, de manière que la bulle du niveau *N* soit bien centrée. Puis, on rend l'équipage libre en dévissant le

Guide du constructeur d'automobiles

bouton *B*, on amène l'aiguille au zéro au moyen du bouton *C* qui tourne à centre dans un logement pratiqué à la partie supérieure de l'appareil. La hauteur de l'équipage (et par conséquent celle de

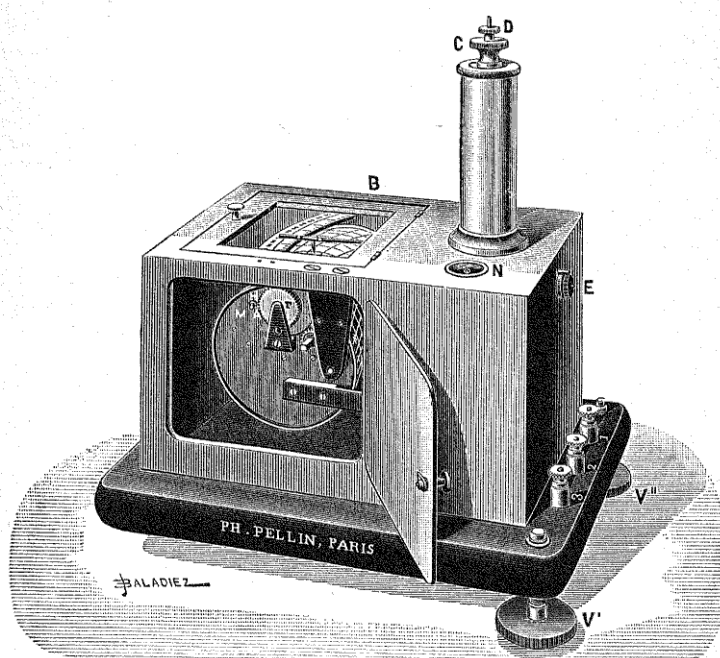


Fig. 8. — Galvanomètre pyrométrique enregistreur, de M. H. Le Chatelier.

l'aiguille) est réglée une fois pour toutes par le constructeur.

Pour le transport de l'appareil d'un endroit dans un autre, il est recommandé de ne jamais oublier de caler l'équipage mobile à l'aide du bouton *B* ; en

La trempe et le forgeage des outils

négligeant cette précaution, on risquerait de casser la suspension.

M. H. Le Chatelier a imaginé aussi un *Galvanomètre pyrométrique enregistreur*, également construit par M. Pellin, et que représente la figure 8.

Cet appareil est d'une construction identique à celle du précédent ; le bâti en aluminium repose sur un socle en noyer porté par trois vis calantes V V' V'' (dont deux, V' et V'' sont visibles sur la figure), vis qui assurent le réglage de l'instrument.

Sous la partie supérieure B de l'appareil, se trouve suspendu et parfaitement équilibré un mouvement d'horlogerie à échappement à ancre portant un tambour en aluminium qui reçoit la feuille de papier pour l'enregistrement ; ce tambour fait un tour complet en 26 heures et son mouvement d'horlogerie se monte tous les quinze jours.

Une came r actionnée par le mouvement d'horlogerie met en contact pendant 20 à 25 secondes le tambour avec l'encrier porté par l'aiguille du galvanomètre, puis l'en éloigne rapidement et sans secousse en raison même de son équilibre. Ce contact a lieu toutes les deux minutes et la figure inscrite sur le papier est une série de points ; trente points sont donc tracés pendant une heure représentée par 13 millimètres de course du tambour ; on a donc un point tous les $4/10$ de millimètre.

Toute la partie enregistrante de l'appareil est entièrement mécanique, pour éviter toute attraction obtenue par des contacts électriques qui développent des courants induits susceptibles de fausser les indications données par le couple thermo-électrique.

Guide du constructeur d'automobiles

L'enregistrement est régulier, sans vibrations au moment du contact ou après celui-ci, et l'appareil est d'un maniement facile. Le réglage de la hauteur de l'aiguille, et par conséquent le réglage du contact de l'encrier au tambour, se font au moyen de la tête de torsion CD supportant tout l'équipage de la bobine ; le bouton D a pour mission de monter ou de descendre la bobine et son aiguille portées par la suspension ; le bouton C ramène tout l'équipage au zéro. — On régleradonc le contact par le bouton D, et le zéro de l'appareil par le bouton C.

Graduation de l'appareil et lecture de l'enregistrement. — L'aiguille fixée à la partie supérieure du cadre se meut sur une échelle divisée de 0 à 180 et peut indiquer la température de 0° à 800° ou de 0° à 1800° pour la course totale de l'échelle suivant que les fils du couple sont reliés aux bornes 1 et 2 dans le premier cas (0°-800) ou aux bornes 1 et 3 dans le second cas (0°-1800). Ces bornes sont numérotées et fixées sur le socle de l'appareil, ainsi qu'on peut le voir sur la figure.

L'étalonnage et la graduation de ces appareils sont faits par le constructeur. Une feuille de papier quadrillé sur laquelle sont inscrites deux courbes sont remises avec l'appareil ; ce sont les courbes d'étalonnage de l'instrument. Elles ont été établies en se servant des points de fusion et d'ébullition connus ; on note pour chacun de ces points la déviation de l'aiguille ; puis, sur la feuille de papier quadrillé, on porte en abscisses des longueurs égales représentant les divisions de l'échelle, de 0 à 180, et en ordonnées des longueurs proportionnelles aux températures des métalloïdes ou métaux observés ;

La trempe et le forgeage des outils

on réunit les points ainsi obtenus par une courbe qui est très sensiblement une droite.

Exemple de lecture. — Supposons le couple relié aux bornes 1 et 2 et l'aiguille du galvanomètre en équilibre à la division 120, par exemple ; sur la feuille d'étalonnage nous cherchons sur la ligne des abscisses la division 120 et nous voyons à la ligne des ordonnées que cette division correspond à 600 degrés, par exemple.

Cette lecture est exactement la même pour la feuille d'enregistrement du tambour ; cette feuille est divisée verticalement en 18 parties correspondant aux 180 divisions de l'échelle de l'appareil, et horizontalement en 24 arcs de cercle portant des chiffres romains ; l'intervalle d'un arc à un autre correspond à une heure de temps. Les deux séries de I à XII représentent un enregistrement de 24 heures (jour et nuit). La lecture d'un point se fait donc comme précédemment.

Supposons en effet un point marqué sur l'arc de cercle VIII ; ce point correspond sur la ligne verticale à la division 120 par exemple ; nous savons que la division 120 de l'échelle correspond à la température 600° ; nous pouvons donc dire que la température enregistrée à 8 heures du matin était de 600 degrés.

Cet appareil peut également fonctionner à lecture directe ; il suffit pour cela d'arrêter le mouvement d'horlogerie, en tournant le bouton H sur l'indication « arrêt », lorsque le tambour est retombé après une inscription.

Pour régler l'appareil, on opère de la façon suivante :

Guide du constructeur d'automobiles

- 1° Installer le galvanomètre sur une table bien stable ;
- 2° Régler l'horizontalité au moyen des vis calantes en amenant la bulle d'air du niveau N à être bien centrée ;
- 3° Mettre la feuille de papier : dévisser le bouton qui est à l'intérieur du tambour, sortir le tambour de son axe, enrouler le papier suivant les indications inscrites sur chaque feuille, remettre le tambour en place en le faisant tourner sur lui-même de manière à le mettre à l'heure, l'encrier servant d'index ; remettre le bouton et fixer le tambour ;
- 4° Mettre de l'encre dans l'encrier porté par l'aiguille ;
- 5° Monter le mouvement d'horlogerie ;
- 6° Rendre libre l'aiguille en tournant le bouton E, amener l'aiguille à zéro à l'aide du bouton C ;
- 7° Mettre en marche le mouvement d'horlogerie en tournant le bouton H sur la lettre M = marche (A = arrêt).

Graduation d'un couple thermo-électrique. — Il existe une relation entre la force électromotrice et la variation de la température : e_1 étant la force électromotrice correspondant à une température déterminée t_1 , on a :

$$\text{Log } e_1 = m \text{ Log } t_1 + n$$

(t_1 étant exprimée en degrés centigrades ; n est la caractéristique du couple).

Dans une autre expérience, on aura :

$$\text{Log } e_2 = m \text{ Log } t_2 + n$$

La trempe et le forgeage des outils

La graduation du couple thermo-électrique doit être faite chaque fois que l'on fait usage d'un couple neuf, car d'un fil à l'autre il y a des différences très appréciables.

On trouve aujourd'hui dans le commerce des couples thermo-électriques livrés accompagnés de

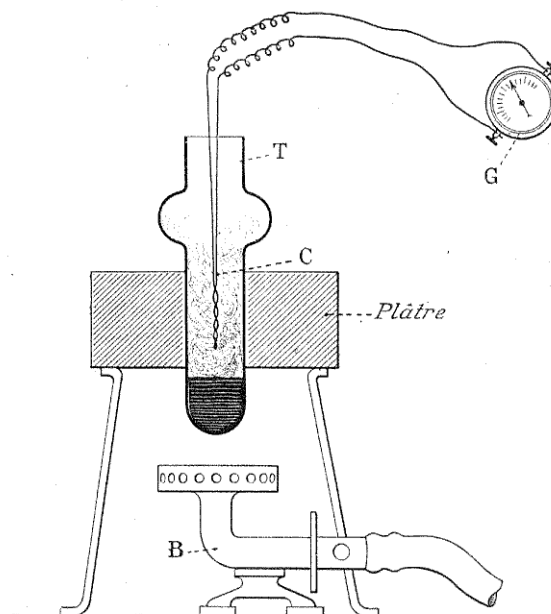


Fig. 9. -- Graduation d'un couple thermo-électrique. — Point d'ébullition du soufre.

B, bec Bunsen; T, tube en verre; C, couple thermo-électrique
G, galvanomètre.

leur courbe d'étalonnage indiquant les forces électromotrices en fonction des températures.

L'opération de la graduation ne présente pas de

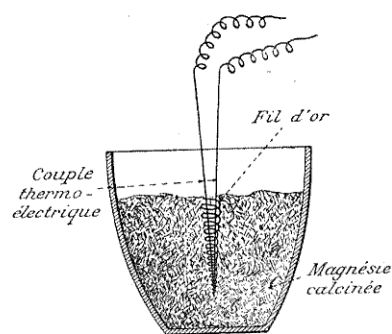
Guide du constructeur d'automobiles

difficultés spéciales, d'ailleurs. On prend un certain nombre de points connus, tels que :

Ebullition de l'eau.....	100°
— du soufre.....	480°
— du zinc.....	930°
Fusion de l'argent.....	970°
— de l'or.....	1065°
— du platine..	1780°

La figure 9 représente la disposition de l'expérience pour le point d'ébullition de l'eau ou celui du soufre. — On note la déviation du galvanomètre. On refait l'expérience pour plusieurs autres points connus.

Pour les points correspondant à la fusion des métaux, la meilleure méthode opératoire consiste à



F. 10. — Graduation d'un couple thermo-électrique. — Point de fusion de l'or.

dépasser le point de fusion, puis à laisser refroidir; au moment où le métal se solidifie, on peut observer un arrêt net dans le mouvement de l'index.

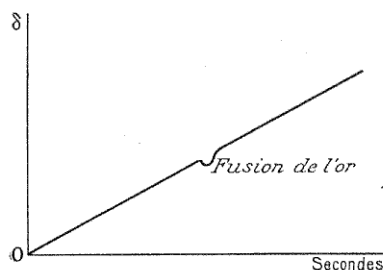
Pour le point de fusion de l'or, quand on ne dispose — comme c'est le cas le plus

fréquent — que de très faibles quantités de ce métal, on enroule quelques milligrammes de fil d'or autour du couple et on chauffe très régulièrement.

La trempe et le forgeage des outils

(dans un creuset rempli de magnésie calcinée). On suit le déplacement de l'index et on note l'arrêt, de très courte durée.

La figure 10 montre comment on dispose l'expérience lorsqu'on emploie un fil d'or. La courbe de la figure 11 représente le déplacement de l'index pendant le chauffage, avec le court arrêt que l'on observe au moment de la fusion.



Une fois que l'on a déterminé de la sorte un certain nombre

de points, on construit la courbe du galvanomètre (fig. 12). On porte en abscisses les valeurs des déviations observées, et en ordonnées les températures.

La figure 12 donne un exemple d'une courbe d'étalonnage d'un couple platine + platine à 10 % de rhodium. On a opéré au moyen des points d'ébullition de l'eau, du soufre et du zinc et du point de fusion de l'argent.

	Température	Division correspondante de l'échelle
Ebullition de l'eau....	100°	7, 0
— du soufre..	480°	32, 5
— du zinc....	930°	70, 9
Fusion de l'argent....	970°	80, 0

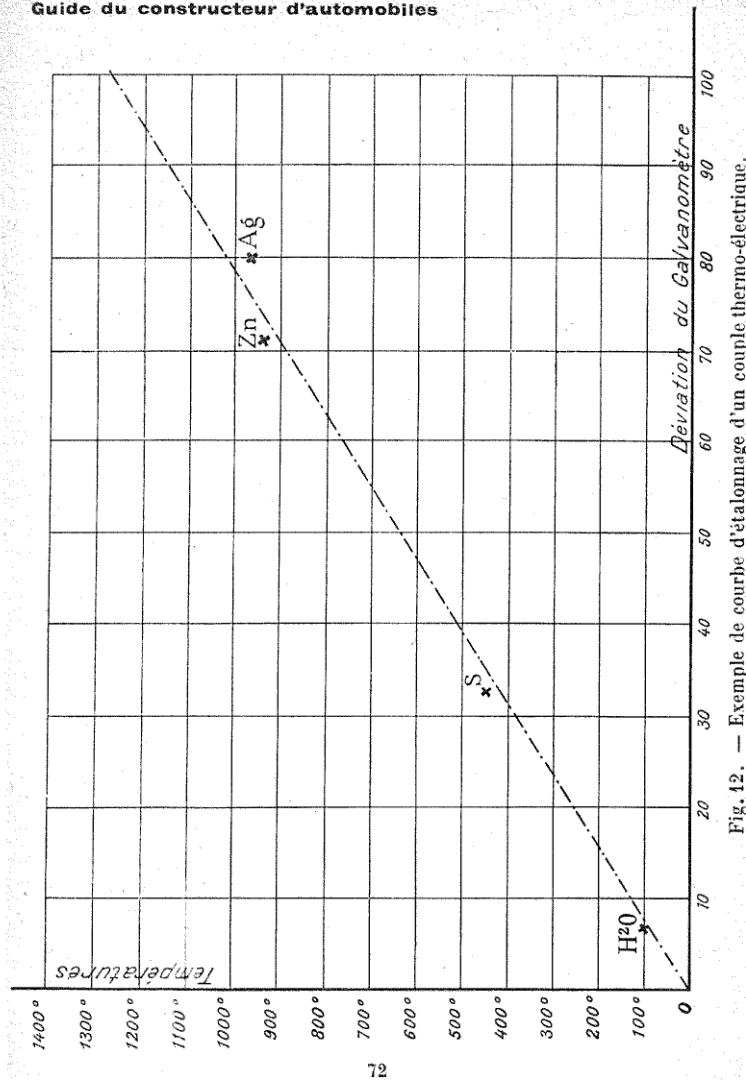


Fig. 42. — Exemple de courbe d'étalonnage d'un couple thermo-électrique.

La trempe et le forgeage des outils

La courbe reliant ces points est très sensiblement une droite.

Ces galvanomètres sont d'un emploi extrêmement facile, une fois la graduation faite. Malheureusement, le couple platine + platine rhodié finit par s'altérer (voir plus haut).

La figure 13 montre l'application du pyromètre de M. H. Le Chatelier à la mesure des températures d'un four; les fils du couple sont logés à l'intérieur d'une canne métallique, suivant le dispositif de la figure 6.

Lorsque le couple thermo-électrique doit être placé à demeure dans un courant d'air chaud, on le dispose de la manière représentée par la figure 14.

La soudure, les fils du couple isolés par une torsade d'amiante sont

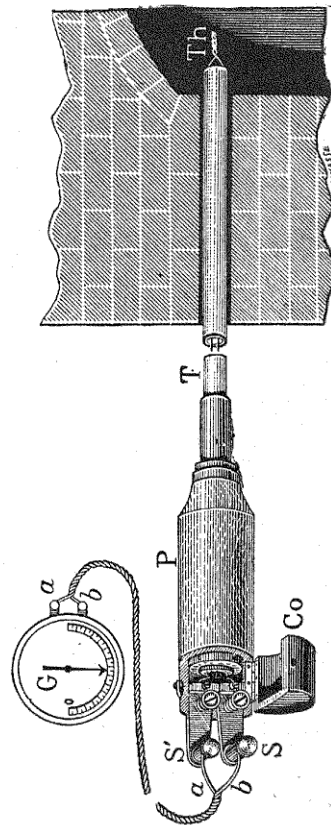
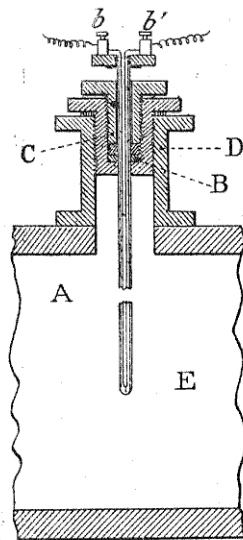


Fig. 13. — Installation d'un couple thermo-électrique de M. Le Chatelier, pour la mesure des températures d'un four.

placés dans un tube

en nickel A, fermé à une de ses extrémités de manière à éviter toute action oxydante ou réductrice; ce tube porte à une distance convenable, du côté de l'extrémité ouverte, une bague en fer B qui est maintenue dans un presse-étoupe C qu'on peut fileter extérieurement et fixer sur la tubulure filetée D de la conduite d'air chaud E.



Les extrémités du couple constituant les pôles sont réunies à deux bornes *b* et *b'* mises en communication par un câble avec les bornes du galvanomètre.

On peut disposer ainsi un certain nombre de couples en divers points d'une conduite d'air chaud et les réunir successivement au moyen d'un commutateur au galvanomètre, pour connaître les températures aux divers points correspondants de la conduite.

Fig. 14. — Couple thermo-électrique de M. H. Le Chatelier placé à demeure dans un courant d'air chaud.

L'emploi des pyromètres thermo-électriques, avec couple platine + platine rhodié, devient impossible

quand la température à mesurer dépasse 1780° (point de fusion du platine), et pratiquement bien en dessous de ce point limite, car à ce moment les matières réfractaires qui isolent les fils deviennent conductrices et les déviations ainsi produites peu-

La trempe et le forgeage des outils

vent altérer largement les indications de l'appareil.

En outre, aux températures élevées, le platine tend à se combiner à un grand nombre de corps, notamment au silicium (fourni par les matériaux des fours eux-mêmes) et au carbone (fourni par les gaz carburés dégagés généralement par les combustibles industriels). Il en résulte une notable altération du platine.

Les pyromètres que nous allons décrire maintenant ne présentent pas cet inconvénient.

Lunette pyrométrique Féry — Cet appareil s'applique surtout à la mesure des températures à l'intérieur des fours, sans l'introduction d'aucun corps solide dans le four.

Il est fondé sur le chauffage *par rayonnement* du couple thermo-électrique : au lieu de plonger directement le couple dans le four dont on veut mesurer la température, on l'échauffe par le rayonnement émis par le four.

La loi énoncée par Stefan, en 1882 (et connue sous le nom de *loi de Stefan*), donne la relation entre l'intensité du rayonnement et la température du four : *La quantité de chaleur rayonnée par un four ou un corps noir (1) est proportionnelle à la qua-*

(1) Cette loi n'est rigoureuse que pour un four ne présentant qu'une petite ouverture par rapport à son volume (*enceinte isotherme*) ou pour les corps dits noirs, oxyde de fer, de cuivre, de chrome, charbon, etc. Elle est en défaut pour les métaux polis, les oxydes blancs.

Cependant, si ces corps, qui ont un pouvoir émissif plus petit que l'enceinte isotherme ou le charbon, dont le pouvoir émissif est pris pour unité, sont placés dans un four, ils suivent la loi de Stefan.

trième puissance de la température absolue du corps rayonnant.

$$R = a T^4$$

L'exactitude théorique de cette loi est aujourd'hui démontrée.

Voici comment est constituée la lunette Féry, d'après la description qu'en fait M. Léon Guillet :

« Si on vise un four incandescent au moyen d'une lunette, l'objectif donne l'image du four, et cette image est non seulement lumineuse, mais elle est *chaude*. La chaleur solaire concentrée ainsi au moyen d'une lentille suffit, on le sait, à allumer de l'amadou.

« Il suffit donc de placer dans notre lunette un couple analogue à celui que M. Le Chatelier introduit dans le four, pour prendre la température de l'image du four.

« On conçoit facilement que la quantité de chaleur ainsi reçue ne sera qu'une fraction infiniment petite de celle du four, il faudra donc un couple beaucoup plus sensible pour obtenir le courant électrique nécessaire au déplacement de l'aiguille du galvanomètre qui indique la température.

« Tel est, en quelques mots, le principe du nouveau pyromètre dont la figure 15 donne une vue d'ensemble. La lunette L, supportée par un trépied solide, est amenée devant l'ouverture du four ou devant le moufle T dont il s'agit de mesurer la température; on vise cette ouverture qui est mise au point par le pignon P, sur la petite pile thermo-électrique placée dans la lunette. Immédiatement le galvanomètre G, relié à la lunette par deux cor-

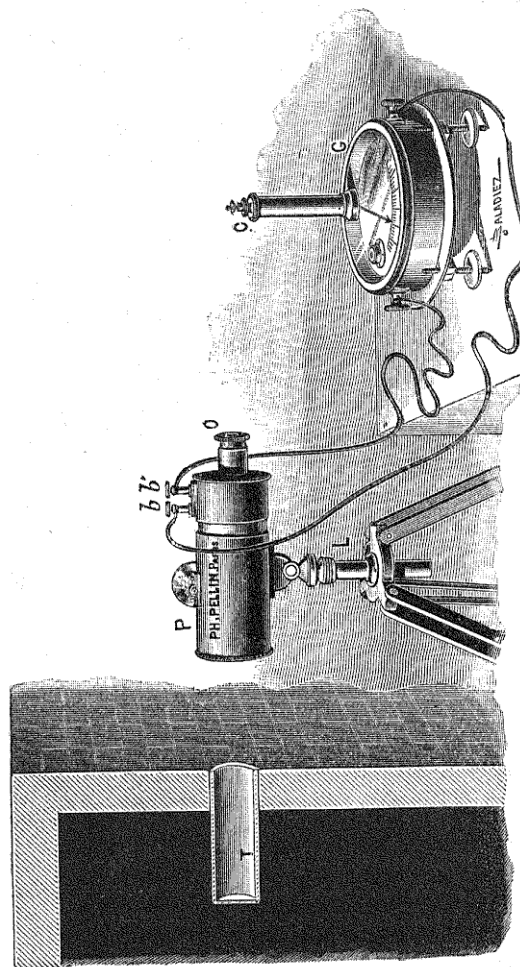


Fig. 13. — Lunette pyrométrique de M. Ch. Féry, disposée pour mesurer la température à l'intérieur d'un four.

dons souples qui peuvent être très longs (15 mètres au maximum), indique par le déplacement de son aiguille (visible sur la figure) la température du four.

« Ajoutons que, bien que très sensible, et il le faut étant donnée la faible énergie mise en jeu, le galvanomètre est très robuste et ne craint ni le transport ni les chocs.

« Les indications du pyromètre Féry sont indépendantes de la distance et des dimensions de l'ouverture du four, à partir d'une certaine valeur minima, ce qui en rend le maniement particulièrement commode.

« La lunette qui vient d'être décrite et qui fonctionne actuellement dans un grand nombre d'usines indique la température entre 900° et 1.800°; on peut, suivant les besoins, en partant de plus de 900°, obtenir une température limite extrême plus élevée, mais il est impossible de descendre au-dessous de 900°.

« Pour répondre aux demandes des industriels ayant à suivre des opérations marchant à plus basse température, M. Féry vient de rendre un appareil sensible à partir de 500°; ceci a été obtenu grâce à des perfectionnements apportés dans la nature et la construction du couple, et aussi en remplaçant la lentille de sa lunette par un miroir analogue à ceux employés dans les télescopes (*Télescope pyrométrique Féry*). En outre, cet appareil est plus sensible que le précédent. Il convient tout spécialement pour la trempe, le recuit, la cémentation des aciers, etc.

« Donc, il suffit d'approcher la lunette du four, de viser à l'endroit dont on veut connaître la tempéra-

La trempe et le forgeage des outils

ture, de mettre au point (et cela se fait aussi aisément qu'avec une jumelle de théâtre), et de lire dans le galvanomètre, qui d'ailleurs est gradué en température et peut être placé à une grande distance du four, pourvu que le fil qui le relie à la lunette soit à faible résistance.

« On voit combien une telle méthode est simple. » A l'usine de Dion-Bouton, dans les ateliers de cémentation et de trempe, les températures sont relevées tous les quarts d'heure par un ouvrier ; dans ces conditions, les erreurs de cémentation sont aussi réduites que possible (Voir III^e partie, chapitre IV).

La figure 16 montre (au moyen d'une coupe longitudinale et d'une coupe transversale) les détails de

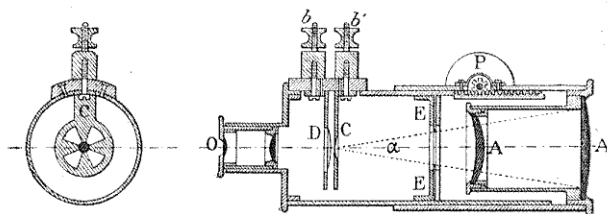


Fig. 16. — Lunette pyrométrique de M. Ch. Féry, coupe transversale et coupe longitudinale.

construction d'une lunette pyrométrique Féry. Pour augmenter l'ouverture de l'objectif sans trop en augmenter les aberrations, on a constitué l'objectif par deux lentilles A, A' montées dans le même tube commandé par le pignon P pour la mise au point. Le couple thermo-électrique, constitué par deux fils fins tendus sur les supports D et C, est réuni aux bornes *b* et *b'* permettant de le relier au galvanomètre.

Devant les fils du couple est disposé un écran métallique en forme de croix, visible en C (sur la coupe perpendiculaire à l'axe de la lunette) ; cet écran ne laisse à découvert que la soudure du couple.

On comprend facilement qu'à partir du moment où cette soudure est couverte par l'image de l'ouverture percée dans la paroi du four, les indications deviennent indépendantes de cette ouverture.

On devra donc, dans l'emploi de l'appareil

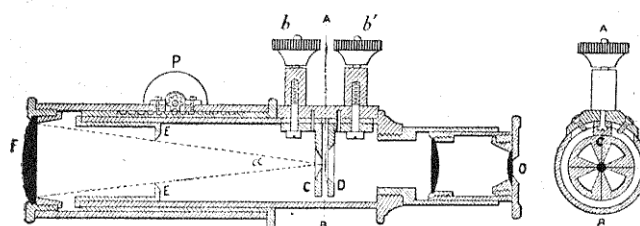


Fig. 17. — Lunette pyrométrique Féry.

employer une ouverture suffisante pour qu'à un mètre, distance minima à laquelle la visée est commode, l'image de l'ouverture déborde franchement le petit disque central de la croix, qui constitue la soudure chaude du couple.

Un diaphragme E, placé à une distance fixe du couple, ne permet jamais à l'objectif de travailler à pleine ouverture, afin que les variations de tirage de l'instrument nécessaires pour la mise au point ne changent pas les indications. Il en résulte que le cône des rayons calorifiques qui tombe sur la soudure ayant au sommet un angle constant, les indications sont indépendantes de la distance, pourvu

La trempe et le forgeage des outils

que l'image soit plus grande que le centre de la croix formant le réticule de la lunette.

La figure 17 montre une variante de la lunette pyrométrique Féry, de construction un peu plus simple. Les lettres ont la même signification que dans la figure 16. L'objectif F n'est constitué ici que par une seule lentille.

Lunette pyrométrique ou Pyromètre optique Le

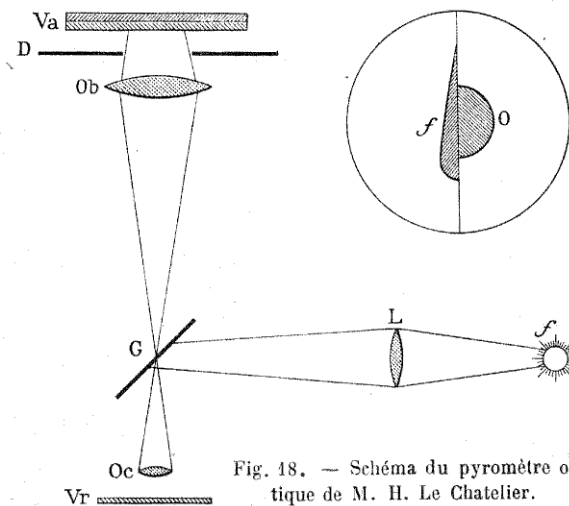


Fig. 18. — Schéma du pyromètre optique de M. H. Le Chatelier.

Chatelier. — La lunette pyrométrique de M. le professeur Le Chatelier est d'un système tout différent. La figure 18 montre d'une façon tout à fait schématique la disposition de cet appareil. On observe directement aussi le corps incandescent, mais l'évaluation de la température se fait sans couple thermo-

Guide du constructeur d'automobiles

électrique, par un procédé purement optique. Un verre rouge Vr placé devant l'oculaire Oc, permet de n'étudier qu'une radiation bien déterminée ; les rayons lumineux émis par le corps observé sont envoyés par l'objectif Ob sur l'oculaire Oc en traversant une glace sans tain G à 45° ; cette glace renvoie sur l'oculaire l'image d'une flamme f servant d'étalon (petite lampe à essence). Entre le corps observé et l'objectif sont interposés des verres Va de pouvoirs absorbants connus, et un œil de chat D.

Supposons l'œil de chat à la division n_0 pour une bougie et à la division n pour un objet autre, avec une interposition de m verres, de pouvoir absorbant $1/11$; on aura pour le rapport des intensités ρ la relation :

$$\rho = \left(\frac{n_0}{n} \right)^2 \times \left(\frac{1}{11} \right)^m$$

La figure montre, à droite, l'image vue dans l'oculaire : dans une moitié du champ on voit la demi-flamme étalon f et dans l'autre moitié le demi-objet O : on agit sur l'œil de chat et on interpose des verres absorbants jusqu'à égalité d'intensité des deux images, puis on applique la formule et on en déduit la température.

L'emploi systématique de pyromètres dans les usines de construction mécanique et surtout dans la construction automobile aurait des conséquences excellentes au point de vue de la régularité et de la réussite des opérations se faisant à haute température, comme la trempe et la cémentation.

Pour cette dernière opération, surtout, ainsi que

La trempe et le forgeage des outils

nous le montrerons plus tard (voir II^e partie, chapitre III), l'évaluation exacte de la température du four a une importance très grande. On ne peut que souhaiter vivement de voir ces méthodes scientifiques se substituer aux procédés empiriques malheureusement encore trop répandus.

B. — Refroidissement de l'outil ou Trempe proprement dite. — L'outil ayant été porté à la température convenable par l'un des moyens que nous avons étudiés tout à l'heure, il s'agit de le refroidir brusquement pour le tremper.

Avant de passer à l'étude de l'opération de la trempe proprement dite, voici quelle est, d'après O. Thallner, la règle primordiale à observer pour obtenir un bon résultat :

Le refroidissement de l'outil porté à l'incandescence doit avoir lieu dans des conditions d'uniformité telles, que la chaleur se trouve soustraite à la portion à tremper d'une façon absolument uniforme.

Cette règle n'est pas aussi facile à appliquer qu'elle pourrait le paraître à première vue : dès que l'outil est plongé dans le bain de trempe, il se trouve entouré d'une gaine de vapeur qui l'empêche de se tremper uniformément. Aussi doit-on le remuer constamment dans le bain de trempe.

Il faut remarquer aussi que parfois l'outil, bien qu'il ait été chauffé régulièrement avant la trempe, se trouve exposé à un refroidissement irrégulier (un courant d'air suffit souvent), de sorte que, au moment où il est plongé dans le bain de trempe, il présente déjà une température irrégulière. On évi-

tera donc les courants d'air et on placera le bac de trempe aussi près que possible de l'appareil de chauffage.

Liquides de refroidissement. — Dans la presque totalité des cas (Voir plus loin, *Trempe dans un courant d'air*), l'outil est plongé, pour la trempe, dans un liquide.

Dans la plupart des cas, le liquide employé pour la trempe est l'eau naturelle. La meilleure température de l'eau est de 15 à 22° C.

Il convient que l'eau employée soit bonne conductrice de la chaleur. L'eau de source ou de puits, qui tient généralement en dissolution certains sels, trempe plus vivement que l'eau de rivière quand elle est trouble ou chargée de chaux. Quand une eau de source trempe trop vivement, on peut modérer son action par addition d'un peu de soude ou de potasse. Inversement, l'eau de rivière trempant trop faiblement peut être améliorée par addition de sels ou d'acides en faible quantité.

L'eau ayant servi pendant longtemps à la trempe acquiert généralement de très bonnes qualités, dues à ce que les matières étrangères finement diluées, en suspension, se déposent peu à peu au fond de la cuve, tandis que certaines substances solubles à effet nuisible sont éliminées.

Il semble qu'on puisse donner dès le début cet état stable à un bain de trempe en le faisant bouillir ou en y plongeant un certain nombre de pièces de fer portées à l'incandescence.

On emploie parfois d'une façon systématique

La trempe et le forgeage des outils

comme bain de trempe une *solution aqueuse de sel marin*; le plus souvent, on adopte des solutions saturées. Ce bain donne une trempe énergique.

L'addition d'*acides* à l'eau (en proportion allant jusqu'à 20/0) donne une trempe encore plus vive.

Au contraire, les dissolutions de *carbonate de soude* ou de *sel ammoniac* ont une action moins énergique.

L'*eau de savon* ne trempe pas; on utilise cette propriété pour refroidir un acier sans lui faire prendre la trempe (O. Thallner).

Le *lait de chaux* est employé lorsqu'on veut une trempe douce et notamment pour les outils de forme compliquée qui peuvent se fendre à la trempe.

Les *corps gras* trempent moins énergiquement que l'eau; ils donnent une trempe douce et très tenace. On trempe donc à l'*huile*, au *sui*/ certains outils minces, exposés à se fendre et auxquels on veut donner une trempe douce.

On fait parfois usage, comme bain de trempe, de bains métalliques. De tous les liquides de trempe, le *mercure* est celui qui offre la plus grande conductibilité à la chaleur et donne la trempe la plus vive (O. Thallner). Mais l'emploi en est très rare.

En revanche, on emploie assez fréquemment le *plomb* fondu, ou encore l'*étain* ou le *zinc*. A proprement parler, ce n'est pas là un procédé de trempe. Le bain de métal fondu est à température trop élevée pour tremper réellement le métal: l'acier

ainsi traité ne prend guère de mordant, mais il acquiert une dureté extrême et sa flexibilité et son élasticité augmentent aussi.

On applique ce procédé de trempe à certains outils pour le travail des matières tendres, surtout dans les fabrications en série.

Trempe dans un courant d'air. — Bien que très rarement, on emploie parfois le procédé de trempe dans un courant d'air pour certains aciers spéciaux, et plus particulièrement des aciers à fraises. Jurthe et Mietzschke citent notamment comme requérant ce procédé de trempe les aciers pour fraises, dont nous avons déjà parlé (voir page 43), connus sous les noms de Böhler-Rapid et de Poldi-Hütte. Ils estiment que le refroidissement à l'air remédie naturellement au danger de rupture des dents, ce qui est un avantage sérieux pour les fraises à profils compliqués.

Ces aciers doivent, d'ailleurs, être chauffés à une température beaucoup plus élevée (presque au blanc) que les aciers ordinaires.

C. — Recuit des outils. — On donne le nom de *recuit* à la chaude que l'on fait subir aux outils après la trempe, pour leur donner une certaine élasticité que la trempe a pu leur faire perdre.

Ce réchauffage de l'outil peut être effectué de trois façons différentes que nous allons énumérer. Dans les deuxième et troisième méthodes, où l'on fait intervenir une source extérieure de chaleur, il faut observer rigoureusement les règles que nous avons énoncées page 48.

La trempe et le forgeage des outils

Voici quels sont les trois procédés de recuit :

- a) Refroidir incomplètement l'outil trempé; le retirer alors du bain de trempe : le cœur de l'outil, resté chaud, réchauffe toute la pièce jusqu'à la température de recuit voulue; on arrête alors le recuit par immersions répétées jusqu'à complet refroidissement (*recuit par la chaleur interne*);
- b) Tremper jusqu'à refroidissement complet, puis recuire en réchauffant l'outil au moyen d'une source de chaleur extérieure;
- c) Opérer comme dans la première méthode (recuit par la chaleur interne), mais en accélérant le réchauffage au moyen d'une source de chaleur extérieure.

Nous verrons plus loin (Voir *Traitement des principaux outils*) quels sont les outils pour lesquels le recuit par la chaleur interne convient spécialement; d'une façon générale, ce procédé s'applique aux outils qui ne reçoivent qu'une trempe locale (outils de tour, burins, tranches, forets, certaines fraises, etc., etc.)

On apprécie le degré de recuit au moyen de la couleur que prend la surface de l'outil. Il est donc nécessaire que la surface en soit propre et bien nettoyée. Dès que la couleur désirée est obtenue, on arrête le recuit en plongeant rapidement, à plusieurs reprises, l'outil dans l'eau.

O. Thallner recommande, pour rendre particulièrement tenace un outil qui doit travailler au choc et recevoir des coups, de le faire revenir *plusieurs fois de suite*. On effacera les couleurs dues au premier recuit et on les fera réapparaître une seconde fois.

Guide du constructeur d'automobiles

Ce procédé est surtout à recommander pour des outils en acier dur, devant avoir une grande résistance au choc et aux coups (burins, tranchets, etc.)

Une bonne méthode de recuit par la chaleur interne consiste à tremper les outils à l'eau, puis à les laisser refroidir dans l'huile; la transmission de la chaleur interne se fait avec une très grande régularité.

Lorsqu'on opère le recuit par une source de chaleur extérieure, on apprécie facilement la température atteinte par les couleurs du métal. Voici quelles sont les températures correspondant aux diverses couleurs de recuit :

1. Jaune clair.....	220°
2. Jaune.....	230°
3. Jaune foncé	245°
4. Jaune brun.....	255°
5. Rouge brun.....	265°
6. Rouge pourpre.....	275°
7. Violet.....	285°
8. Bleu violacé.....	295°
9. Bleu clair	310°
10. Gris.....	325°

Au delà de 330°, la couleur de recuit est nulle :

« Le choix de la couleur de recuit dépend :

De l'intensité de la trempe (l'acier doit subir un recuit d'autant plus avancé qu'il aura reçu une trempe plus vive);

Du degré de dureté de l'acier (pour un même usage, un acier plus dur devra subir un recuit plus avancé qu'un acier plus doux);

De la composition de l'acier : un métal rendu fra-

La trempe et le forgeage des outils

gile par sa teneur en éléments nuisibles devra être recuit plus complètement qu'un autre plus pur.

Des usages auxquels sont destinés les outils.

Quand le degré de dureté a été mal choisi, il est fort rare qu'on puisse, par un recuit poussé plus ou moins loin, remédier à cet inconvénient, qui entraîne un mauvais rendement de l'outil et des avaries pendant le travail de ce dernier.

Le choix de la couleur de recuit est déterminé moins par le degré de dureté à atteindre que par celui de la ténacité que l'on exige de l'outil.

Enfin, on fera revenir deux à trois fois de suite à la même couleur de recuit les outils dont on n'exige pas une dureté fort élevée, mais qui doivent posséder une dureté spéciale. » (O. Thallner.)

Forgeage de l'acier à outils. — Le forgeage des outils ne présente guère de particularités spéciales, en ce qui concerne l'opération même du forgeage, qui se pratique au moyen de l'outillage de forge que nous avons décrit dans le I^{er} volume (chap. XI), et donne lieu aux divers tours de mains et façons d'opérer dont nous parlerons en traitant des *Procédés de fabrication* (III^e volume).

Les particularités intéressantes à noter sont relatives aux températures qu'il convient d'adopter pour chaque genre d'outil. Nous allons les passer en revue dans ce qui va suivre.

Traitement des principaux outils usuels et aciers convenant pour leur fabrication [d'après O. Thallner (1)].

(1) O. Thallner, *L'acier à outils*, Paris, 1900.

Guide du constructeur d'automobiles

1. **Outils de tour.** — *Qualité d'acier à employer.*
Dur et très dur.

Forgeage. — Au rouge cerise, avec chauffage exclusivement au charbon de bois. Forger aussi rapidement que possible, en évitant les coups de marteau trop violents. Laisser toujours refroidir les outils après forgeage.

Trempe. — Chauffer lentement, au rouge cerise naissant, sur une longueur d'environ 20 millimètres, à partir du tranchant, la chaleur allant en décroissant graduellement à partir de ce point. Donner peu de vent.

Tremper alors à l'eau jusqu'à extinction de toute incandescence, en remuant l'outil dans l'eau. Retirer à ce moment l'outil, le frotter à blanc et le faire revenir par la chaleur interne, jusqu'au jaune très clair. Arrêter à ce point le recuit en immergeant plusieurs fois l'outil dans l'eau chaude : y laisser refroidir l'outil.

2. **Fraises.** — Nous avons indiqué plus haut (voir p. 86) les précautions spéciales que peuvent demander pour leur travail les aciers à fraises.

2. **Forets hélicoïdaux.** — *Acier à employer :*
Demi-dur à dur.

Trempe. — Pour les forets, le chauffage en moufle, ou mieux encore, dans des bains de plomb ou de sels fondus, convient tout particulièrement. Il s'agit, avant toute autre chose, d'éviter que l'outil ne se voile.

La trempe et le forgeage des outils

Si l'on se trouvait obligé de chauffer dans un feu de maréchal, on ne tremperait que la moitié ou le tiers de la longueur du foret (si toutefois les trous à percer n'étaient pas trop profonds). On remédierait ainsi, dans la mesure du possible, à l'inconvénient du chauffage irrégulier.

Tremper à l'eau dans un bain aussi profond que possible ; imprimer aux outils un mouvement de rotation autour de l'axe, ainsi qu'un mouvement de va-et-vient dans le sens vertical (il est essentiel de faire tourner l'outil sur lui-même car, sans cela, une face se refroidirait plus vite que le reste de l'outil, qui risquerait de se voiler). Laisser refroidir le foret dans le bain de trempe, puis le faire revenir au jaune et, à ce moment, le redresser par serrage à la presse.

Liquide de trempe. — On recommande de tremper dans des solutions saturées de sel marin, de soude ou de chlorure d'ammoniaque.

Recuit. — Au bain de sable ou à un feu doux de charbon de bois.

4. Forets ordinaires. — *Acier à employer.* — Demi-dur à dur.

Forgeage. — Au rouge cerise bien caractérisé. Chauffage, si possible, au charbon de bois.

Trempe. — a) Forets minces. — Chauffer au rouge cerise, uniformément, sur une longueur de 10 millimètres à partir du tranchant.

Tremper à l'eau jusqu'à complet refroidissement.

Recuit : au jaune, en chauffant l'outil en arrière du tranchant.

Guide du constructeur d'automobiles

b) Forets larges. — Même trempe, et recuit par chaleur interne, dont on renforcerait l'action, si elle était insuffisante, par un chauffage de l'outil.

5. **Mèches.** — Même traitement que pour les forets hélicoïdaux.

6. **Outils de raboteuses et d'étaux-limeurs.** — Comme pour les outils de tour (n° 1).

7. **Tarauds.** — *Acier à employer.* — Tenace à dur tenace pour de petits tarauds, dur tenace à demi dur pour des tarauds plus grands.

Fabrication. — Par tournage et fraisage de barres pleines.

Trempe. — Chauffer lentement jusqu'au rouge cerise naissant dans un feu de charbon de bois (dont on a arrêté le vent). Donner alors le vent pour porter rapidement le taraud à la température de trempe.

Tremper à l'eau, en plongeant l'outil, le filetage en avant pour les tarauds cylindriques, ou la tête en avant pour les tarauds coniques.

Retirer à l'extinction de l'incandescence et laisser revenir par chaleur interne au jaune ou au brun. Arrêter le recuit par immersion prolongée dans l'eau.

Eviter le chauffage à feu ouvert, qui peut produire une décarburation superficielle.

8. **Coussinets de filières à fileter.** — *Acier à employer.* — Comme pour les tarauds.

La trempe et le forgeage des outils

Trempe — Chauffer comme les tarauds. La forme des coussinets de filière rend inapplicable le recuit par chaleur interne.

On laissera donc refroidir complètement après trempe, et l'on trempera au suif (donnant une trempe douce) jusqu'à complet refroidissement.

Recuit. — Au rouge brun pour les coussinets trempés dur et au jaune pour les coussinets trempés doux (chauffer sur feu de charbon de bois doux ou, mieux, sur des plaques de tôle portées au rouge).

9. Alésoirs. — Même acier à employer et même traitement que pour les tarauds.

10. Burins. — *Acier à employer.* — Acier demi-dur pour les burins d'ajusteurs, servant au travail de matières dures et destinés à être employés avec marteaux à main. Acier dur pour les burins pneumatiques. Acier très tenace pour les burins destinés au travail de matières tendres et qu'on voudra soumettre à l'action énergique de marteaux lourds.

Forgeage. — Ne pas dépasser le rouge cerise.

Trempe. — Chauffer au rouge sur 20 millimètres de longueur à partir du tranchant, comme pour les outils de tour.

Trempe comme pour ces mêmes outils.

Brosser rapidement le burin et arrêter l'action de la chaleur interne par une immersion rapide dans l'eau, quand l'outil prend la couleur violette ou bleue.

Guide du constructeur d'automobiles

11. Tranches. — *Acier à employer.* — Demi-dur pour tranches à chaud. — Tenace pour tranches à froid.

Forgeage, trempe et recuit. — Comme pour les burins (n° 10).

Tels sont les outils d'usage le plus fréquent dans les ateliers et ceux que les ajusteurs et ouvriers outilleurs peuvent avoir le plus souvent à mettre en état. On voit que chaque type d'outil demande certains soins spéciaux qu'il est indispensable d'observer, si l'on veut que l'outil ait un bon rendement.

CHAPITRE VI

Les Meules.

Nous avons montré dans le premier volume (chapitre X) que la meule est aujourd'hui un outil d'emploi extrêmement général, dans des machines diverses et pour des usages variés. Nous allons compléter ici ce que nous en avons déjà dit par quelques indications sur la composition des meules et sur leur fabrication.

Composition des meules. — Les meules employées aujourd'hui dans les machines à meuler, à affûter ou à rectifier sont fabriquées au moyen de minéraux de grande dureté ou encore de produits artificiels également très durs réduits en poudre plus ou moins fine et agglomérés en disques au moyen de substances diverses.

Il y a donc, dans une meule, deux éléments à considérer :

1° Le corps dur constituant la partie active, la partie agissante de la meule ;

2° L'agglomérant, destiné à donner de la cohésion au premier élément, pris toujours à l'état pulvérulent.

Nous allons étudier successivement ces deux constituants.

I. — Corps durs servant à la fabrication des meules.— Ces produits sont, tantôt naturels, tantôt artificiels.

Examinons tout d'abord les *produits naturels* employés dans la fabrication des meules.

A). Produits naturels. — Le plus employé, on pourrait presque dire le seul employé, est l'émeri.

Emeri. — On désigne en minéralogie sous le nom d'émeri la variété grenue du corindon.

Le *corindon* est de l'alumine ou oxyde d'aluminium ($\text{Al}^2 \text{O}^3$) avec traces d'oxyde de fer, de chrome ou de titane.

Son degré de dureté (dans l'échelle de dureté de Mohs) est de 9, c'est-à-dire qu'il raye la topaze et est rayé par le diamant. Il se présente dans la nature sous forme de petits cristaux rhomboédriques, à cassure conchoïdale ou esquilleuse, à éclat vitreux, parfois adamantin, incolore ou plus souvent de couleurs variées (rubis, saphyr, topaze orientale, améthyste orientale).

L'émeri est constitué par un mélange de corindon et de peroxyde de fer, en quantités variables.

Les proportions varient entre les limites suivantes :

Corindon.....	60 à 80 0/0
Oxyde de fer.....	33 à 8 0/0
Silice }	faible quantité
Chaux }	
Eau de cristallisation.....	traces.

L'émeri se rencontre surtout à Naxos et à Smyrne (ce sont les gisements les plus réputés); on en a découvert aussi un gisement aux Etats-Unis.

Les Meules

Voici deux analyses, citées par M. G. Richard (1), de poudres d'émeri de Naxos et de Smyrne, après séchage :

	Smyrne	Naxos
Corindon.....	80.5	84
Oxyde de fer.....	11.7	7.7
Silice.....	6.6	7.8
Eau.....	1.2	0.5
	100.0	100.0

On a trouvé en France, à Pénestin (Morbihan) un émeri connu sous le nom d'*émeri français* ou *émeri de l'Ouest* et tenant 90,3 0/0 d'alumine.

Enfin, M. Durrschmidt a montré que la calcination d'une *bauxite* du Var (de composition $\text{Al}^2\text{O}^3 \text{H}^2\text{O}$, + traces de silice, oxyde de fer et titane), donne une sorte d'*émeri artificiel* de grande dureté, à 84 0/0 d'alumine.

L'émeri se trouve à la surface du sol, en blocs que l'on brise au feu, puis que l'on soumet à un bocardage, à un broyage entre des cylindres de fonte durcie, enfin à un tamisage ou à un triage par lévigation dans l'eau.

Tels sont les principaux produits naturels employés dans la fabrication des meules.

B). Produits artificiels. — On a inventé divers produits destinés à remplacer l'émeri ou bien à confectionner des meules de dureté supérieure à celle des meules d'émeri.

Le *carborundum* est un des plus connus parmi ces

(1) G. Richard, *Traité des machines-outils*, vol. II.

Guide du constructeur d'automobiles

produits. C'est un siliciure de carbone Si C. (70 0/0 de silicium et 30 0/0 de carbone) dont M. Acheson a imaginé la fabrication industrielle, au four électrique. Le carborundum produit, à poids égal, un travail beaucoup plus considérable que l'émeri ; il paraît, en outre, détremper moins que ce dernier.

Le carborundum se clive aisément ; il en résulte l'impossibilité d'en faire des meules agglomérées au caoutchouc (voir plus loin) ; en effet, les arêtes produites par le clivage des cristaux coupent l'agglomérant ; on est donc forcé de l'agglomérer au moyen de pâtes analogues aux pâtes à porcelaine (voir plus loin, *Agglomérants*).

Pour la même raison, on ne peut guère faire de toiles ou papiers au carborundum, comme on fait des toiles et papiers à l'émeri, car le support est rapidement coupé par les arêtes vives des cristaux.

On fabrique le carborundum en soumettant à un courant intense, dans un four électrique, un mélange composé de :

Coke ou charbon de cornue pulvérisé.....	20 parties
Sable.....	29 —
Sciure de bois.....	2 —
Sel marin.....	5 —

Le carborundum est fabriqué à l'usine de Niagara Falls, à l'usine de l'Arbine, à la Bathie (Savoie) et à Benatek, en Bohême.

On a proposé d'autres substances comme corps durs pour la fabrication des meules. Ce sont généralement des corindons ou des émeris artificiels préparés au four électrique au moyen de bauxite.

II. — **Agglomérants.** — Les produits employés pour agglomérer les corps durs servant à la fabrication des meules sont très nombreux; beaucoup d'usines font de la nature de leur agglomérant un secret jalousement gardé. Nous allons énumérer les plus connus.

Pour donner de bons résultats, tout agglomérant doit satisfaire aux deux conditions suivantes :

1° Etre assez résistant pour ne pas souffrir des effets de la force centrifuge ;

2° Etre assez friable pour ne pas encrasser la meule (dans le cas contraire, celle-ci se glace, se lisse et n'a plus d'effet utile).

Les agglomérants les plus connus sont :

Le *silicate de soude*, qui est peut-être le plus employé. C'est notamment l'agglomérant des meules anglaises Ransome, des meules « silicate » américaines, etc.

Le silicate, en solution sirupeuse, est malaxé avec la poudre d'émeri de façon à former une pâte que l'on presse dans des moules à main ; on sèche ensuite doucement dans un four. Dans certaines meules de ce genre, le fabricant dispose à l'intérieur une toile métallique destinée à en augmenter la résistance.

M. Durrschmidt signale, dans le même ordre d'idées, l'agglomérant suivant :

Phosphate de chaux.....	15
Feldspath.....	2
Silicate de soude.....	37,5

Le *caoutchouc vulcanisé* (meules « Vulcanite », etc.) donne des meules très résistantes pouvant, sans danger d'éclatement, tourner jusqu'à des vitesses

Guide du constructeur d'automobiles

circonférentielles de 3.000 mètres par minute. Ces meules sont, de plus, de très grande durée.

L'émeri est malaxé avec le caoutchouc ; le produit est ensuite laminé, puis moulé à la presse hydraulique.

Les *pâtes à base de kaolin* ou de *feldspath* sont également très employées. C'est l'agglomérant des meules américaines « vitrifiées ». La poudre d'émeri est mélangée à une bouillie à base de kaolin ; la pâte est moulée et séchée, puis solidifiée par une cuisson au blanc dans des fours spéciaux, jusqu'à vitrification de l'agglomérant. Ces meules, fabriquées sans compression, possèdent une texture poreuse rendant leur coupe franche. Elles conviennent tout particulièrement pour le meulage à l'eau, car, à cause de cette grande porosité, l'eau est rejetée sous forme de rosée, à travers les pores de la meule, sur la pièce à meuler. De plus, l'agglomérant, tout en donnant beaucoup de cohésion, n'a aucune action chimique sur la nature de l'émeri ou du corindon et a la propriété de se réduire en poussière aussitôt qu'il vient en contact avec la pièce à meuler, ne nuisant en rien aux propriétés coupantes des grains d'émeri.

Enfin, la vitrification de l'agglomérant assure à ces meules une grande durée et une parfaite inaltérabilité à l'eau (American Emery Wheel Works).

Les meules en *carborundum* sont agglomérées d'une façon analogue : le carborundum en poudre est mêlé à 70 0/0 d'une pâte à base d'argile : le produit est moulé, comprimé, puis chauffé pendant soixante-dix heures dans un four de potier. Les meules obtenues

nues sont extrêmement dures et conviennent pour le travail des aciers les plus durs.

L'*oxychlorure de magnésie* a été proposé également comme agglomérant aussi résistant que le caoutchouc ; mais les meules ainsi fabriquées ne peuvent guère travailler à l'eau, car elles sont altérées par l'humidité.

Le *tanin*, mêlé de gélatine et de colle forte, est l'agglomérant des meules « Tanite ».

Enfin, on a essayé la *gomme laque*, mais ce produit donne des meules se glaçant facilement.

Ces produits sont les principaux agglomérants employés dans la fabrication des meules.

DEUXIÈME PARTIE

CHAPITRE PREMIER

Les métaux employés dans la construction des automobiles.

Généralités. — La construction automobile emploie presque tous les métaux usuels : les fontes, toute la série des aciers divers, le cuivre rouge, ses alliages (bronzes et laitons), l'aluminium (rarement employé à l'état pur, utilisé le plus souvent sous forme d'alliages), et divers alliages, tels que les alliages anti-friction, etc.

Nous allons étudier successivement ces divers métaux.

Les *fontes* sont employées surtout pour la fabrication des cylindres des moteurs ; certains constructeurs, ont établi des cylindres en acier (1), mais la généralité des moteurs sont à cylindres en fonte.

L'*acier* est certainement le métal qui entre dans la fabrication de la plus grosse partie du mécanisme

(1) Voir notre *Manuel Pratique d'Automobile*, 2^e édit, p. 17.

Guide du constructeur d'automobiles

d'une voiture automobile. Les engrenages, les axes, les leviers de toutes sortes, les vilebrequins, les bielles, les essieux, les ressorts, etc., etc., sont en acier.

L'automobilisme utilise presque tous les *aciers spéciaux* livrés aujourd'hui par l'industrie métallurgique ; une tendance très marquée se manifeste vers l'emploi plus fréquent encore de ces métaux dont les propriétés spéciales sont grosses d'applications pour la construction automobile.

Le *cuivre* pur, ou *cuivre rouge*, est relativement peu employé dans la construction automobile. En dehors des fils conducteurs, le cuivre rouge n'est guère utilisé qu'en chaudronnerie, pour les tuyaux de circulation de gaz et d'eau, et, plus rarement, pour la confection des réservoirs d'essence et d'eau (lesquels sont plus fréquemment en laiton).

Les *alliages de cuivre* (*laiton*, formé de cuivre et de zinc, et *bronzes* formés de cuivre, étain et zinc) sont employés dans diverses pièces d'automobiles ; les carburateurs, les graisseurs, les réservoirs d'eau et d'essence, un grand nombre de petites pièces, telles que les régulateurs placés sur le volant de direction, etc., etc.

L'*aluminium* est assez rarement employé pur, mais, allié à d'autres métaux, l'emploi en est très important dans les automobiles. Ses propriétés de métal très léger en font, en effet, un auxiliaire précieux (densité = 2,56). Aussi en fait-on un fréquent usage pour la fabrication de pièces ne nécessitant pas une

Les métaux employés

résistance très considérable, mais qu'il y a tout intérêt à rendre aussi légères que possible, car elles constituent un poids mort :

Carters de changement de vitesses, carters des moteurs, carters des cames d'allumage, etc. On fabrique aussi en aluminium les volants de direction.

Enfin, divers *alliages*, tels que le métal *anti-friction* employé dans les coussinets, ont également des applications dans la construction automobile.

Nous allons examiner successivement ces divers métaux et alliages, et dire quelques mots de leur métallurgie, de leurs propriétés physiques, chimiques et mécaniques, en envisageant dans ces propriétés ce qu'elles ont surtout d'intéressant au point de vue de la construction des automobiles, et en indiquant dans chaque cas, quelles sont les qualités que le constructeur doit exiger des métaux qui lui sont fournis (la III^e partie de ce volume montrera la façon de vérifier si les métaux possèdent les qualités requises).

Les autres métaux non énumérés ci-dessus, sont très rarement employés, et, en tout cas, jamais seuls. Nous n'en parlerons donc pas.

CHAPITRE II

La Fonte.

Généralités. — La *fonte* est un carbure de fer, renfermant plus de 2 0/0 de carbone. On admet, en général, pour distinguer les trois produits essentiels de la métallurgie du fer, le fer, la fonte et l'acier, que le fer doit renfermer moins de 0,200 0/0 de carbone, l'acier de 0,300 à 1,500 0/0 environ, et la fonte plus de 2 0/0 (la teneur en carbone allant jusqu'à 7 0/0).

Il existe donc toute une série ininterrompue de produits de la métallurgie du fer, depuis le fer chimiquement pur jusqu'aux fontes les plus carburées, et, à vrai dire, la délimitation entre les trois produits fer, acier et fonte, est assez peu nette. Certains produits métallurgiques très employés aujourd'hui pourraient aussi bien être classés dans les fers que dans les aciers. Tels sont les « aciers extradoux » à 0,18 0/0 de carbone, par exemple, qui sont, en somme, le métal connu également sous le nom de fer fondu.

Propriétés du fer pur. — A titre de document, indiquons ici rapidement les principales propriétés du fer pur.

Le fer est un métal gris bleuâtre, à odeur spéciale (surtout appréciable par le frottement). Il est mal-

La Fonte

léable et ductile quand il n'a pas été écroui par martelage ou laminage (on peut, du reste, remédier à l'écrouissage par un recuit).

Le fer fondu a une structure grenue et finement cristalline; la structure du fer forgé est fibreuse.

Le fer est magnétique jusqu'à la température d'environ 860° C (point critique supérieur).

Le fer se soude à lui-même, sans aucun autre auxiliaire, à la condition, toutefois, d'avoir été débarrassé de toute couche d'oxyde.

États allotropiques du fer. — Il est démontré, aujourd'hui, que le fer existe sous trois états allotropiques désignés par M. Osmond par les lettres α , β , γ .

Les travaux de MM. Pionchon, Osmond, Henry Le Chatelier et Roberts-Austen ont conduit aux conclusions suivantes (M. Léon Guillet) :

Au-dessous de 740°, le fer est à l'état de fer α ;

Entre 740° et 860°, il est à l'état de fer β ;

Au-dessus de 860°, il est à l'état de fer γ .

D'autres expériences, faites par M. Ball et par M. Roberts-Austen paraissent déceler l'existence de deux autres états allotropiques du fer. Le premier aurait observé une transformation à 1,300° et le second aurait constaté un changement à 600°.

Mais l'existence de ces deux états du fer n'est pas encore absolument certaine. Nous ne parlerons donc que des fers α , β , γ .

« Suivant la notation de M. Osmond, nous appellerons : A_2 le point de 740° ; A_3 le point de 860° (1).

(1) Léon Guillet : *Etude théorique des alléages métalliques*, p. 57.

Guide du constructeur d'automobiles

« Comment a-t-on été conduit à admettre ces trois états allotropiques du fer ?

1° Si l'on examine les propriétés magnétiques du fer pur que l'on chauffe, on voit que ces propriétés s'atténuent considérablement à 740° (M. Curie, thèse de doctorat);

2° Si l'on suit la variation de la résistance électrique d'un fer pur dont on élève, peu à peu, la température, on note que, tandis que cette résistance s'est décuplée quand la température a passé de 0 à 860°, elle reste sensiblement constante à cette température. Il y a donc là une propriété caractéristique (M. H. Le Chatelier);

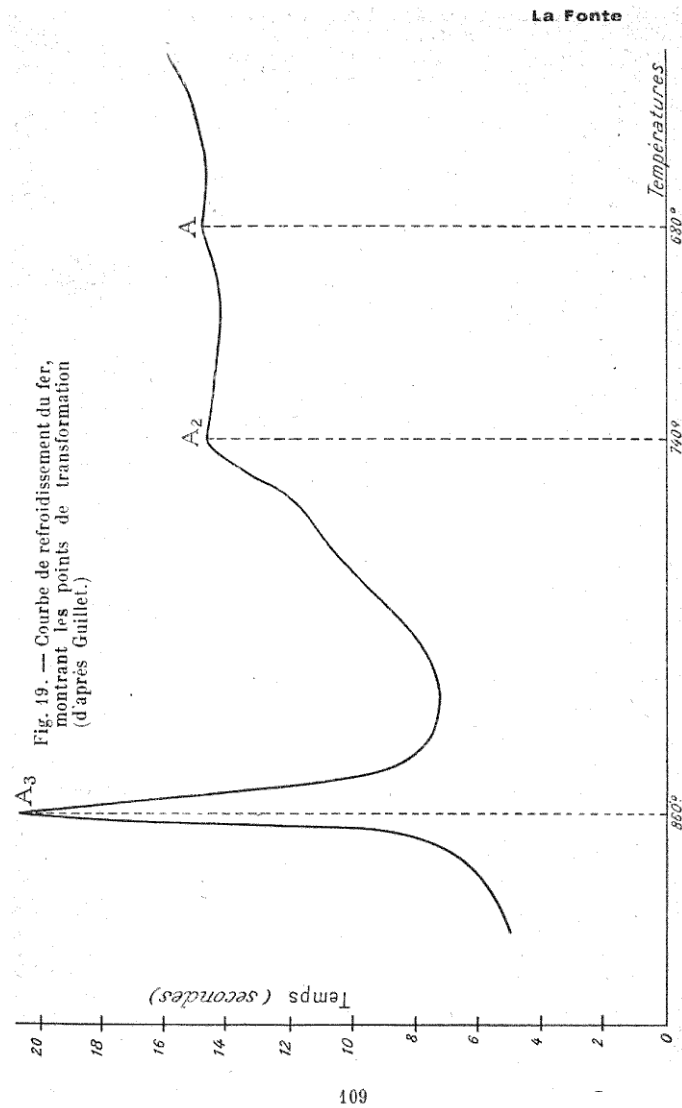
3° Si l'on prend un morceau de fer et que l'on étudie sa courbe de refroidissement, on notera des absorptions de chaleur, c'est-à-dire un ralentissement dans le refroidissement, aux températures d'environ 740° et 860° (M. Osmond).

« Si, comme l'a fait M. Osmond, on prend, pour tracer la courbe de refroidissement, comme abscisses, les températures, et comme ordonnées le nombre de secondes que met l'indice du galvanomètre pour baisser de une division de la règle graduée, on obtient une courbe du genre de celle de la figure 19.

« Cette courbe prouve que, pour baisser de 1° dans les environs de 860°, il a fallu plus longtemps qu'à un autre moment et, par conséquent, qu'il y a eu ralentissement dans le refroidissement.

« Il en est de même à 740°, bien que le ralentissement soit beaucoup moins accentué.

« Enfin, nous devons noter un très léger renflement à 680°; à cette température correspond le point A₁, dont nous verrons l'importance plus tard. (Voir :



Guide du constructeur d'automobiles

Points de transformation de l'acier) ».

D'après MM. Osmond et Cartaud (*Annales des Mines*, 1900), le fer à ses trois états cristallise dans le système cubique :

Le fer β et le fer γ cristallisent identiquement.

Le fer β ne se mélange pas isomorphiquement avec le fer α .

M. H. Le Chatelier pense, cependant, que la vraie forme du fer γ est celle d'un rhomboèdre voisin du cube.

Le fer α est magnétique; le fer β et le fer γ ne le sont pas.

Le fer α et le fer β ne dissolvent pas le carbone, tandis que le fer γ le dissout.

Le fer α est malléable; le fer β est dur et cassant.

MÉTALLURGIE DU FER (Notions sommaires de)

Dans la métallurgie moderne du fer, la fonte est le premier terme, celui par lequel on doit toujours passer pour obtenir les deux autres. C'est, en effet, la fonte qui est le produit obtenu directement à partir du minerai.

Les procédés de la métallurgie du fer peuvent se classer en deux grands groupes :

1°) Le *procédé direct*, permettant d'obtenir le fer pur, ou sensiblement pur, directement, en partant du minerai (foyer catalan). Nous ne citons ce procédé que pour mémoire, car il n'est plus employé à l'heure actuelle que dans les pays non civilisés.

La figure 20 représente le foyer catalan. Le minerai est traité au charbon de bois, dont la combustion

sous le vent amené par la tuyère, donne de l'oxyde de carbone qui réduit l'oxyde de fer. On obtient une loupe de fer spongieux qui est ensuite cinglée.

2°) Le *procédé indirect*, ainsi dénommé parce que, pour obtenir le fer, on commence par produire au haut fourneau de la fonte et que celle-ci est soumise ultérieurement à des opérations d'affinage ayant pour but de la transformer en fer

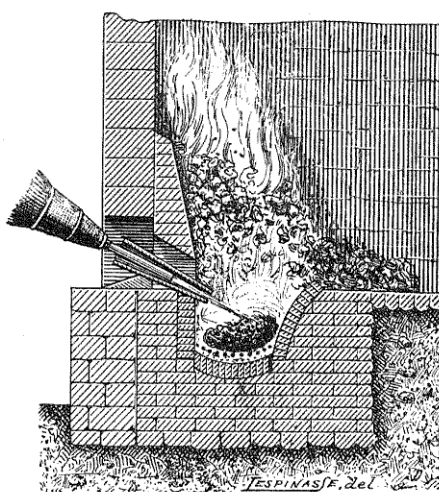


Fig. 20. — Fourneau catalan.

ou en acier. C'est le seul procédé que nous décrivons ici, très rapidement d'ailleurs, car nous ne saurions avoir la prétention d'étudier en quelques pages, d'une façon complète, la métallurgie du fer et le travail du haut fourneau.

Minerais de fer. — Les minerais de fer les plus employés sont les *oxydes* (magnétite, fer oligiste, hémalites, minerais en grain, etc.), le *carbonate* ou sidérose ; enfin, rarement employés, les *silicates*.

La *magnétite* (Fe^3O^4) ou oxyde magnétique de fer,

est le minerai le plus pur, ses principaux gisements sont en Suède.

L'*oligiste* ou *fer oligiste*, l'*hématite rouge*, etc., sont des variétés de sesquioxyde anhydre (Fe_2O_3).

La *limonite*, l'*hématite brune*, les *minerais en grains (oolithiques)* sont des variétés de sesquioxyde de fer hydraté ($2 \text{Fe}_2\text{O}_3, 3 \text{H}_2\text{O}$).

Ces deux groupes de minerais (sesquioxyde anhydre et sesquioxyde hydraté) sont très abondants dans la nature. En France, il en existe d'importants gisements au Berry, dans les Ardennes, la Haute-Marne, les Pyrénées, les Cévennes, etc., etc.

La *sidérose* ou *fer spathique* est le carbonate de fer CO_3Fe ; il en existe d'abondants gisements en France (dans l'Isère) et en Angleterre, où les couches de sidérose alternent souvent avec les couches de houille, conditions idéales d'exploitation.

Principe de la métallurgie du fer. — Le principe de la métallurgie du fer est la réduction de l'oxyde de fer Fe_2O_3 ou sesquioxyde (1) par l'oxyde de carbone CO, avec formation d'acide carbonique CO_2 :



Cependant, la réduction de l'oxyde Fe_2O_3 par le carbone solide se produit aussi, avec formation, soit d'oxyde de carbone, soit d'anhydride carbonique. L'importance relative de ces diverses réactions varie avec l'allure du haut-fourneau.

La première de ces réactions est facile à réaliser au rouge, mais une température beaucoup plus élevée est nécessaire dans la métallurgie du fer, pour aggro-

(1) Les minerais ayant une autre composition sont ramenés par grillage à la composition Fe_2O_3 .

mérer le métal et pour le séparer de la gangue. Cette température est réalisée dans le haut-fourneau.

Voyons comment est constitué cet appareil.

Le haut-fourneau.—

Le haut-fourneau, dont la figure 21 représente le schéma, se compose, en principe, de deux troncs de cône reliés par leurs bases. Les proportions relatives des deux parties sont assez variables.

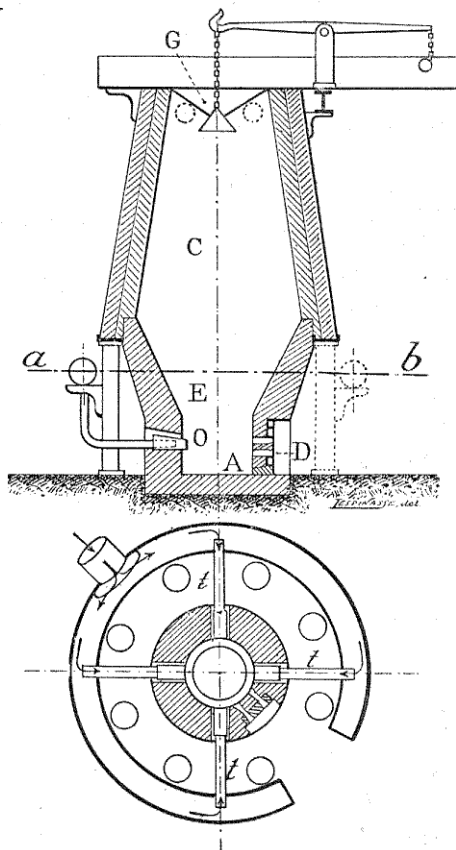


Fig. 21. — Haut-fourneau. Coupe verticale schématique et coupe horizontale par *a b*.

Le tronc de cône supérieur *C* est dit la *cuve*; le tronc

de cône inférieur constitue les *étalages* E. (v. fig. 21); à la partie inférieure du haut-fourneau, au-dessous des étalages, se trouve une portion de cylindre, nommé l'*ouvrage* O, dans lequel viennent déboucher les tuyères *t* servant au soufflage du haut-fourneau. Au-dessous de l'ouvrage se trouve le *creuset* A, fermé à la partie antérieure par une paroi nommée *dame* (D, fig. 21); devant celle-ci est disposé un plan incliné. Enfin, le creuset est percé à la partie inférieure d'un *trou de coulée*, maintenu bouché, pendant l'opération, au moyen d'un tampon de terre réfractaire.

L'ouverture supérieure du haut-fourneau est désignée sous le nom de *gueulard* G; elle est fermée dans tous les hauts-fourneaux modernes au moyen d'un dôme métallique, que l'on peut soulever pour l'introduction des charges; ce dôme porte des conduites permettant de recueillir les gaz combustibles qui, autrefois s'échappaient dans l'air par le gueulard, et qu'on utilise aujourd'hui, soit à la récupération (voir plus loin), soit à l'alimentation de moteurs au gaz de haut-fourneau.

Les *dimensions des hauts-fourneaux* ont notablement varié au cours des perfectionnements apportés à la métallurgie du fer.

La *hauteur* est limitée par la résistance des charges à l'écrasement; avec des coques résistants, on peut établir des hauts-fourneaux d'une hauteur moyenne de 20 mètres. Aujourd'hui, on a tendance à atteindre des hauteurs de 25 à 28 mètres.

Le *diamètre au gueulard* est toujours inférieur ou égal à 5 mètres, surtout à cause des difficultés de

manœuvre de l'appareil de fermeture. La *hauteur du ventre* ne doit pas être trop forte, et il convient que la cuve ait une pente assez douce pour éviter des dislocations dans la descente des charges.

Le *diamètre au ventre* est généralement le double de celui de l'ouvrage ; il ne dépasse guère 7 mètres.

Dans les hauts-fourneaux actuels, la cuve est supportée par des colonnes, ainsi que le montre la figure 21, qui représente un haut-fourneau du type couramment employé aujourd'hui.

Par la figure 22, qui représente l'ensemble des hauts fourneaux n^{os} 2, 3 et 4 des usines Schneider du Creusot, on peut juger de l'aspect extérieur et des proportions générales de ces appareils. Ces hauts-fourneaux ont 20 mètres de hauteur, cette cote étant celle qui convient le mieux aux matières premières traitées au Creusot.

Voici quels sont, à titre d'exemple, les volumes des diverses parties de l'un de ces hauts-fourneaux :

Creuset et ouvrage	5 ^{m3} ,370
Etalages.....	99 ^{m3} ,456
Cuve.....	229 ^{m3} ,381
Chambre à gaz.....	28 ^{m3} ,888
Vide total.....	362 ^{m3} ,795

Les hauts-fourneaux sont établis sur des fondations d'une très grande solidité : on en comprend sans peine l'urgente nécessité.

L'ensemble du haut-fourneau est construit en briques réfractaires (on a généralement renoncé à la construction en pizé, difficile à réaliser). Les briques de la partie inférieure sont très alumineuses ; celles de la partie supérieure devant surtout résister au frottement des matières solides, sont très dures, mais peu réfractaires.

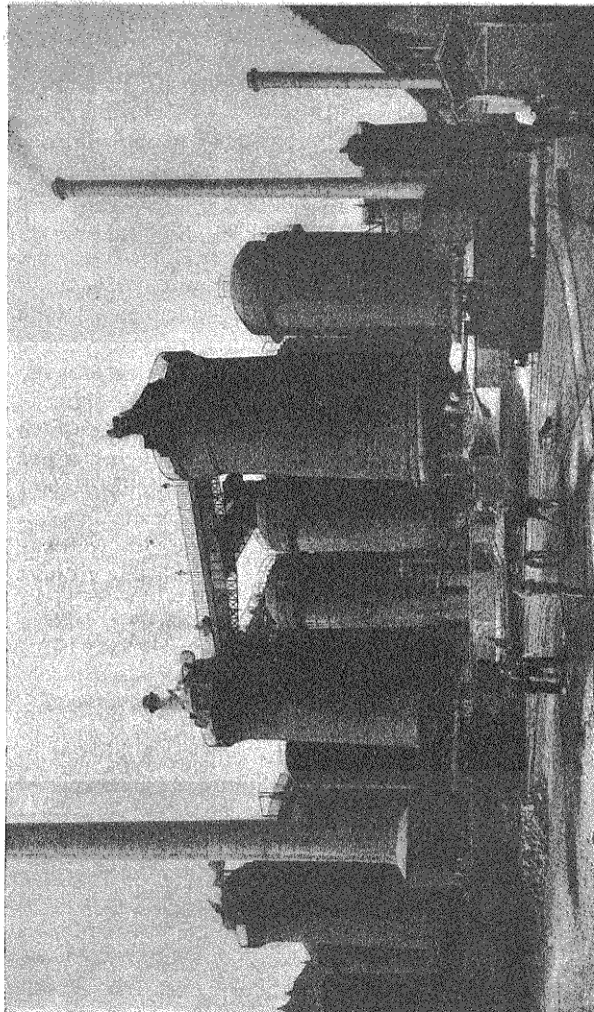


Fig. 22. — Usine Schneider, au Creusot Façade des hauts
fourneaux 2, 3 et 4

La Fonte

L'épaisseur des parois est voisine de 1 mètre (0 m. 70 à 0 m. 75 au gueulard).

La maçonnerie est enveloppée de tôle.

Le système de *fermeture du gueulard* le plus employé est le « cup and cone » dont la figure 21 montre en G le schéma. Les *prises de gaz* sont disposées suivant l'axe du haut-fourneau, toutes les fois que cela est possible ; cependant cette disposition crée une grave difficulté pour le chargement du haut-fourneau.

La *machine soufflante* est, pour ainsi dire, le cœur du haut-fourneau. Ces souffleries sont de très grande puissance ; ce sont presque toujours des compresseurs à pistons actionnés par des machines à vapeur ou par des moteurs au gaz de haut-fourneau.

Ces machines doivent avoir un fonctionnement d'une extrême régularité, et cela pendant des années sans un seul arrêt.

Chauffage du vent. — Primitivement, les hauts-fourneaux étaient soufflés au vent froid. Mais, depuis longtemps on a reconnu la nécessité de chauffer le vent avant de l'envoyer dans le haut-fourneau. La température de chauffage généralement atteinte aujourd'hui est de 750 à 800°.

Les *appareils de chauffage du vent* les plus employés sont les appareils Cowper et les appareils Whitwell, et surtout les premiers.

Le principe de ces appareils est le suivant : dans une capacité réfractaire est disposé un empilage de

Guide du constructeur d'automobiles

briques réfractaires. Au moyen d'un système de valves, on peut faire arriver dans ces appareils, à volonté, les gaz chauds du haut-fourneau (à 25 0/0 d'oxyde de carbone environ) ou le vent de la machine soufflante. Dans une première phase de l'opération, on envoie dans « le Cowper » les gaz combustibles et chauds du haut-fourneau, ainsi qu'un volume d'air convenable pour provoquer la combustion de ces gaz : ceux-ci brûlent et portent au rouge les empilages de briques contenues dans l'appareil ; les produits de la combustion s'échappent par de hautes cheminées qui assurent le tirage. La figure 23 montre, par une coupe partielle, l'ensemble d'un haut-fourneau et des appareils de chauffage du vent.

Après un temps suffisant (une à deux heures), la masse réfractaire du Cowper est portée au rouge, ayant emmagasiné une grande quantité de chaleur. On ferme alors la communication avec les gaz du haut-fourneau et on fait arriver dans l'appareil le vent de la machine soufflante. Celui-ci parcourt, en sens inverse, le même chemin que les gaz du haut-fourneau précédemment, mais en prenant à la masse réfractaire la chaleur qu'elle a emmagasinée, de sorte que le vent arrive aux tuyères pour être soufflé dans le haut-fourneau, porté à la température voulue.

Le Cowper se refroidit peu à peu ; lorsque sa température s'est abaissée par trop, on ferme l'arrivée de vent et on recommence le chauffage de l'appareil au moyen des gaz du haut-fourneau.

Il y a généralement quatre appareils Cowper par haut-fourneau (voir figure 22.)

Marche du haut-fourneau. — Un haut-fourneau,

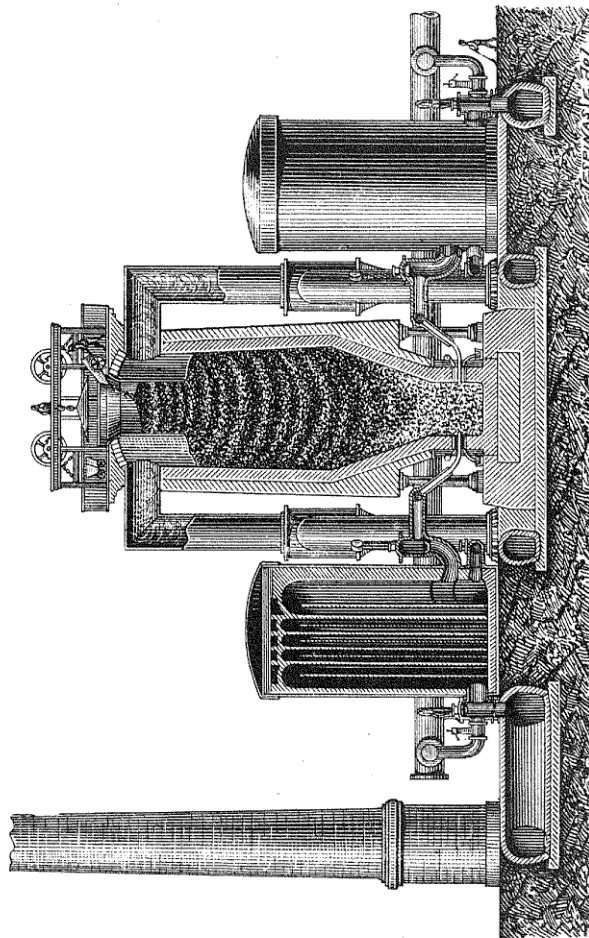


Fig. 23. — Demi-coupe et demi-élévation d'un haut-fourneau avec ses appareils de chauffage du vent.

Guide du constructeur d'automobiles

une fois allumé, reste en service ininterrompu très longtemps. C'est ainsi, par exemple, que le dernier fourneau reconstruit aux usines du Creusot, allumé le 9 août 1879, ne fut mis hors feu que le 8 mars 1897, ce qui fait une « campagne » de près de *dix-huit années*.

L'allumage du haut-fourneau, qui constitue une opération assez solennelle dans l'industrie métallurgique, se fait généralement aujourd'hui de la manière suivante :

On met à froid dans le haut fourneau :

- 1° Une couche de fraïsil.
- 2° Du bois debout jusqu'à mi-hauteur des étalages ;
- 3° Du coke bien lavé ;
- 4° Une charge ordinaire de coke avec la proportion de castine (ou, mieux, de laitier très basique) ;
- 5° Un mélange de coke et de minerai relativement fusible.

On allume; pour cela, on introduit dans le bois un ringard porté au rouge, et on laisse le gueulard ouvert pour produire la combustion par tirage naturel. Lorsque le bois se consume, les charges descendent et l'on voit arriver le coke devant les tuyères ; on donne alors le vent en petite quantité ; le haut-fourneau est bientôt en marche normale.

Pour donner une idée de la durée de cette opération, disons que, pour le dernier haut-fourneau allumé aux usines Schneider, au Creusot (le 8 novembre 1898), l'appareil, allumé à cinq heures du soir, a donné 17.000 kilogr. de fonte le lendemain à midi.

Une fois le haut-fourneau en marche, on y intro-

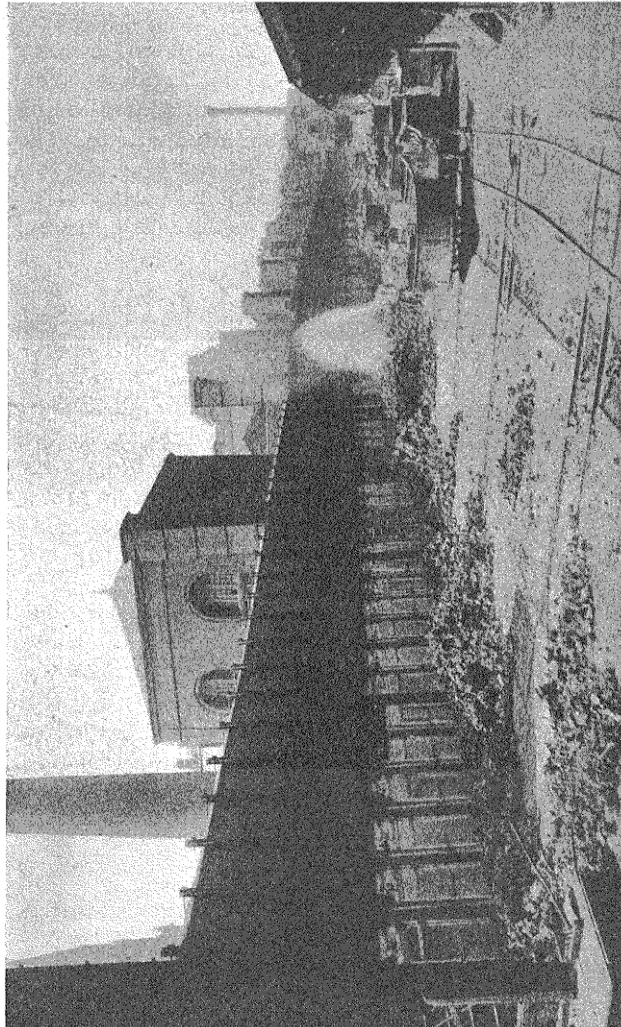


Fig. 24. — Usine Schneider, au Creusot. — Batterie de fours à coke.

Guide du constructeur d'automobiles

duit régulièrement les charges de minerais, de fondant et de combustible.

Les hauts-fourneaux modernes sont généralement munis d'appareils de chargement automatique.

Le *laitier*, plus léger que la fonte, reste à la surface de celle-ci, dans le creuset, et coule constamment, dès qu'il déborde la dame.

Coulée de la fonte. — La fonte tombe au fond du creuset, lequel est généralement rempli en douze à vingt-quatre heures. On débouche alors le haut-fourneau en détruisant le tampon d'argile qui obstrue le trou de coulée ; la fonte s'échappe dans une rigole ménagée à l'avance et qui la conduit à des canaux demi-cylindres creusés dans le sol (en sable) de la halle de coulée. La fonte s'y solidifie en formant les *gueuses*.

Les hauts-fourneaux sont complétés dans les grandes usines par les *fours à coke* servant à transformer la houille en coke pour l'alimentation du haut-fourneau.

Nous ne pouvons entrer ici dans le détail de la disposition de ces fours ; nous nous bornerons à les mentionner, pour mémoire, et à en figurer une « batterie » (figure 24, fours à coke de l'usine Schneider, au Creusot).

Enfin, pour donner idée de l'ensemble de l'installation, disons que le service des hauts-fourneaux à l'usine Schneider du Creusot comprend :

- Cinq hauts-fourneaux en marche ;
- Vingt appareils Cowper ;

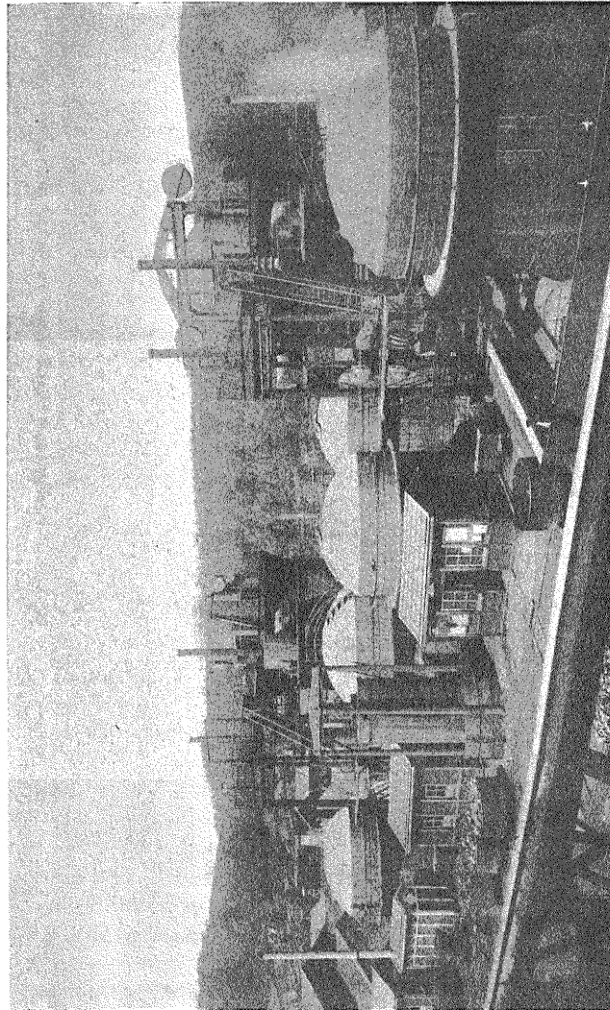


Fig. 25. — Usine Schneider, au Creusot. — Monte-charges et guculards des hauts-fourneaux 7 et 8.

Guide du constructeur d'automobiles

Trente chaudières tubulaires à gaz ;

Six machines soufflantes horizontales Corliss.

Une batterie de 155 fours à coke horizontaux (figure 24), montés sur une seule ligne ;

Douze chaudières tubulaires pour l'utilisation des flammes perdues des fours à coke ;

Un atelier de manutention et de broyage des houilles situé à l'une des extrémités de la batterie des fours ;

Deux ateliers d'agglomération de minerais comprenant 3 presses à double compression, système Couffinhal. (Dans ces ateliers, on transforme en briquettes les résidus de pyrites achetés au dehors.)

Un atelier d'entretien pour les réparations courantes.

Ces hauts-fourneaux (figure 25) sont desservis par un monte-charges hydraulique, et adossés, par une disposition naturelle des plus heureuses, à une plate-forme de 500 mètres de longueur et 100 mètres de largeur, dominant de 10 mètres le sol de la vallée et sur laquelle sont établies les estacades à minerais, ainsi que les diverses installations que comporte le service, sauf les appareils Cowper et une batterie de 18 chaudières à gaz qui sont installés sur le sol inférieur.

Composition des charges. — Les charges que l'on introduit régulièrement dans le haut-fourneau se composent de *minerai*, de *fondant* et de *charbon*.

Le *minerai* est un de ceux que nous avons énumérés page 111, ou un mélange.

Le *fondant* est destiné à provoquer, dans le « lit de fusion », avec la gangue du minerai employé, un

La Fonte

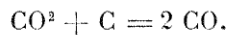
silicate fusible, le *laitier*, grâce à la production duquel la fonte se sépare aisément de la gangue. Suivant la nature de celle-ci, le fondant est calcaire (1) (carbonate de chaux) ; c'est le cas le plus fréquent ; le fondant porte alors le nom de *castine* ; ou bien le fondant est siliceux (2) ; on l'appelle alors *erbue*.

Enfin, le *charbon* toujours employé actuellement est le *coke* produit dans les fours que nous avons figurés (page 121).

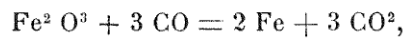
Le haut-fourneau étant en fonctionnement, on peut considérer, dans sa marche, deux ordres de phénomènes :

- 1° La marche ascendante des gaz ;
- 2° La marche descendante des solides.

1°) *Marche ascendante des gaz*. — Dans l'ouvrage, le charbon se transforme en acide carbonique, sous l'influence de l'oxygène de l'air, dans le voisinage des tuyères ; dans son mouvement ascensionnel, cet acide carbonique rencontre du charbon incandescent et se transforme en oxyde de carbone suivant la réaction :



L'oxyde de carbone, dans la cuve, rencontre du minerai chauffé au rouge sombre ; la réaction déjà indiquée se produit alors :



(1) Si la gangue est siliceuse.

(2) Si la gangue est calcaire.

Guide du constructeur d'automobiles

et l'oxyde de carbone se trouve de nouveau transformé en acide carbonique.

2^e) *Marche descendante des solides.* — La charge formée de minerai, de fondant et de combustible est introduite dans le haut-fourneau par le gueulard. Elle descend peu à peu dans le haut-fourneau; dans la cuve, à la partie supérieure, le minerai se déshydrate; à la partie inférieure de la cuve, il est porté au rouge sombre; là, sa rencontre avec l'oxyde de carbone, en provoque la réduction suivant la réaction rappelée ci-dessus. Le fer produit descend dans les étalages avec la gangue, le fondant et le charbon. En cet endroit, où la température est plus élevée, la gangue se transforme en silicate double d'alumine et de chaux (*laitier*), tandis que le fer se carbure et produit la *fonte*; la fonte et le laitier se liquéfient complètement pendant la traversée de l'ouvrage et tombent dans le creuset; le laitier, plus léger, surnage, la fonte reste au fond. (Voir plus haut, *coulée de la fonte*.)

Telles sont, rapidement exposées, les phases caractéristiques de la production de la fonte. Nous verrons dans le chapitre suivant comment cette fonte peut être transformée en acier. Il nous reste à étudier ici les diverses sortes de fontes que l'on produit, leurs propriétés et leurs usages.

Classification des fontes. — De même que pour les aciers, on peut distinguer pour les fontes deux grandes catégories :

A. Fontes ordinaires, contenant du carbone, du

La Fonte

silicium et de faibles teneurs en manganèse et en chrome.

B. Fontes spéciales, contenant une grande quantité de manganèse, de chrome ou de tungstène.

Dans chacune de ces catégories, on distingue plusieurs subdivisions :

A. **Fontes ordinaires.** — a) *Fontes blanches.* On désigne sous le nom de fontes blanches des fontes de couleur argentine, de grande dureté, lamelleuses et cassantes. Leur densité varie de 7,44 à 7,84. — Les fontes grises fondent entre 1050 et 1100°, mais en restant pâteuses, ce qui les rend impropres au moulage ; elles conviennent, en revanche, à la fabrication du fer et de l'acier.

Les fontes blanches sont fabriquées à température moins élevée que les fontes grises ; elles ne contiennent pas de carbone libre.

b) *Fontes grises.* — Ces fontes présentent une couleur allant du gris clair au gris noir. La densité varie de 6,79 à 7,05. Dans ces fontes, une partie seulement du carbone qu'elles contiennent est combinée au fer ; le reste du carbone est disséminé dans la masse à l'état de paillettes de graphite de grosseur variable. — Les fontes grises fondent vers 1.000°, en devenant très fluides, puis, à la solidification, augmentent de volume ; aussi les fontes grises sont-elles les meilleures fontes de moulage.

Elles contiennent en général beaucoup de silicium (2 à 3 0/0), mais très peu de soufre. Elles sont produites en allure chaude du haut-fourneau.

c) *Fontes truitées.* — Les fontes truitées sont inter-

médiaires entre les fontes grises et les fontes blanches. Elles sont constituées par une masse de fonte grise avec des mouches de fonte blanche ou inversement.

Parfois, les parties grises et les parties blanches sont distribuées en zones; on dit alors que la fonte est *rubanée*.

B. Fontes spéciales. — Nous ne les citerons que pour mémoire, car elles n'ont pas d'applications en construction; elles ne servent que dans certaines opérations de la métallurgie du fer. Ce sont :

Les *spiegel* ou *spiegel-eisen* (12 à 20 0/0 de manganèse, et 5 à 6 0/0 de carbone);

Les *ferro-manganèses* (25 à 80 0/0 de manganèse, très peu de carbone);

Les *ferro-siliciums* et *ferro-silicium-manganèses*; les *ferro-chromes* (jusqu'à 65 0/0 de chrome); les *ferro-lungstènes*.

Emplois des fontes. — **Composition et qualités à rechercher pour les divers emplois.** — On distingue ordinairement trois sortes de fontes, au point de vue de leurs emplois;

- A) Les fontes de moulage;
- B) Les fontes d'affinage;
- C) Les fontes pour acier.

Au point de vue strict de la construction automobile, la première catégorie est la seule qui nous intéresse, mais nous dirons aussi quelques mots des deux autres, comme introduction aux indications sur la métallurgie de l'acier que nous exposerons au chapitre suivant :

A. Fontes de moulage. — Ce sont les plus carburées et aussi les plus riches en graphite (voir tableau page 132) ;

La présence de ce *graphite* diminue leur résistance à la traction, mais, en revanche, ces fontes possèdent une plus grande résistance au choc et à l'écrasement.

Les fontes de moulage sont riches en silicium et c'est ce métalloïde qui provoque la séparation du carbone à l'état de graphite. Par un refroidissement brusque (une sorte de trempe) on peut empêcher la séparation du graphite dans une fonte de moulage ; mais, plus la fonte est riche en silicium et plus le refroidissement doit être brusque pour être efficace.

La présence du *silicium* dans une fonte de moulage est nécessaire, mais un excès (plus de 3 0/0) est nuisible, car il donne à la fonte une cassure esquilleuse.

Le *manganèse* à dose inférieure à 1,5 0/0 a également un effet favorable (il retient le carbone en combinaison) ; mais un excès de ce métal fait cristalliser la fonte.

Le *phosphore* diminue la ténacité de la fonte ; on doit donc, pour les moulages mécaniques, choisir des fontes aussi exemptes de phosphore que possible (1). Pour les moteurs d'automobile, on recherche des fontes à moins de 0,5 0/0 de phosphore. Pour des pièces peu importantes, on peut, à la rigueur, tolérer jusqu'à 1 0/0.

(1) Notons qu'il n'en est pas de même pour les moulages d'ornement, pour lesquels la ténacité est secondaire ; en revanche, le phosphore donnant de la fusibilité à la fonte, sa présence est favorable dans ce cas.

Guide du constructeur d'automobiles

Le *soufre* a une action également très nuisible, car il provoque des soufflures et des cavernes. On recherchera donc, surtout pour les moulages mécaniques, des fontes aussi pauvres en soufre que possible.

Qualités à rechercher dans les fontes de moulage.

— Les fontes de moulage employées pour des pièces d'automobile doivent avoir une ténacité aussi grande que possible. Elles doivent être bien fluides une fois fondues ; le grain doit en être serré, sans excès, sans soufflures ni cavernes.

Généralement, les fontes de moulage sont classées en 5 ou 6 numéros, d'après l'aspect du grain, les numéros croissant avec la finesse du grain. Les fontes numéros 1 et 2 ne peuvent guère être moulées directement, car elles sont trop graphiteuses. On les emploie en deuxième fusion.

Le numéro 3, qui peut être moulé directement, peut être employé pour des pièces très diverses.

Les numéros 4, 5 et 6, sont à grain très serré ; ce sont des fontes à faible teneur de silicium. Il en résulte que les pièces de faible épaisseur trempent facilement.

On recherchera surtout, comme fonte de moulage pour automobiles, une fonte à *grain serré*, à *teneur moyenne en silicium*, faiblement *manganésée* et surtout aussi pure en *soufre* et en *phosphore* que possible. Nous décrirons au chapitre II (III^e partie) les procédés d'analyse les plus usuels permettant de doser ces divers éléments.

Dans certains cas particuliers, lorsque l'on veut obtenir des pièces durcies à la surface, obtenues par

moulage « en coquille » (c'est-à-dire dans des moules métalliques), on choisit des fontes à teneur moyenne en silicium, suffisante pour que la partie non trempée, le cœur de la pièce, reste grise. Il faut, cependant, éviter un excès de silicium, car il faut alors un refroidissement extrêmement brusque (voir plus haut) pour empêcher la séparation du graphite ; il se produit alors des tensions excessives, pouvant occasionner des ruptures (de Billy).

B. Fontes d'affinage. — On donne le nom de fontes d'affinage aux fontes employées à la fabrication du fer.

Les fontes d'affinage ont des compositions extrêmement variables. En général, elles tiennent moins de silicium que les fontes de moulage.

Suivant les procédés d'affinage appliqués, on fait usage de telle ou telle variété. Voici les principales :

Pour le *traitement au bas foyer* : Fontes très graphitiques (jusqu'à 4,5 0/0 de carbone total, avec 1 0/0 de carbone dissous).

Pour le *puddlage bouillant* : Fontes grises, à 1 ou 2 0/0 de silicium, assez riches en manganèse ;

Fontes à moins de 1 0/0 de silicium : truitées grises et truitées blanches.

La principale *qualité à rechercher dans les fontes d'affinage* est la pureté : la présence du soufre, de l'arsenic et du phosphore sont à éviter soigneusement.

C. Fontes pour acier. — Ces fontes doivent être encore plus pures que les précédentes ; le phosphore, relativement facile à éliminer par le puddlage, reste dans le métal dans l'opération Bessemer ou Martin ;

Guide du constructeur d'automobiles

NATURE DE LA FONTE	CARBONE TOTAL %	CARBONE DISSOUS %	GRAPHITE %	SILICIUM %	SOUFRE %	PHOSPHORE %	MANGANÈSE %
Fontes de moulage ..	3 à 4	0,3 à 0,7	"	0,7 maximum 3,0	Le moins possible (très nuisible)	maximum 0,5	moins de 3,0
Fontes d'affinage							
a) Pour <i>bas-foyer</i>	jusqu'à 3,5	1,0	"	"	id.	id.	moins de 3 0
b) Pour <i>puddlage</i>	3 à 4	"	"	1 à 2	id.	id.	id.
Fonte pour aciers							
a) <i>Martin</i>	"	"	"	0,5 à 0,7	"	0,05 (acier ordinaire)	"
b) <i>Bessemer</i>	4,0	"	"	0,8 à 3,0	"	0,01 (acier à outils)	2 à 6
Fonte Thomas pour Bessemer basique...	"	"	"	Le moins possible	moins de 0,10	2,50 à 2,75	1,50 à 1,75

La Fonte

il faut donc des fontes très pures. La teneur en phosphore doit être inférieure à 0,05 0/0 pour la fabrication de l'acier ordinaire, et inférieure à 0,01 0/0 pour celle de l'acier à outils. Quant au carbone total, il doit être en teneur suffisante pour que tout le silicium soit éliminé avant le départ complet du carbone.

Les qualités à rechercher varient légèrement suivant que la fonte est destinée au Bessemer ou au Martin et suivant la nature du revêtement de ces appareils.

Nous ne pouvons, sans sortir des limites de notre cadre, entrer dans de plus amples détails; nous nous bornerons à résumer dans le tableau ci-dessus les compositions des fontes employées couramment.

Telles sont les principales variétés de fontes employées industriellement et les qualités les plus essentielles que l'on doit y rechercher.

Nous allons étudier maintenant l'autre produit de la métallurgie du fer dont les emplois sont encore plus développés et plus importants pour la construction automobile, l'acier.

CHAPITRE III

L'Acier.

Généralités. — Nous avons déjà vu que le terme « acier » s'applique à des fers carburés à teneur en carbure moindre que les fontes : on admet, en général, que l'acier tient de 0,135 à 1,5 0/0 de carbone. Ainsi que nous l'avons dit, la démarcation est assez délicate entre certains aciers et les fers commerciaux légèrement carburés.

L'acier, refroidi brusquement, « prend la trempe », c'est-à-dire que sa dureté et son élasticité augmentent notablement, tandis qu'il devient plus fragile.

Nous avons étudié dans la 1^{re} partie (chapitre V), la pratique de la trempe de l'acier ; ce que nous y avons dit présente un caractère tout à fait général. Nous ne reviendrons donc pas ici sur les questions de la trempe et du recuit.

Nous allons, ci-après, exposer les principaux procédés de fabrication de l'acier ainsi que les qualités des aciers ordinaires (1). Les aciers spéciaux, qui tendent à être de plus en plus employés dans la

(1) Rappelons que les aciers ordinaires sont ceux qui ne contiennent que du carbone ; les aciers spéciaux sont ceux qui renferment, en outre, des éléments ajoutés pour modifier les propriétés de l'acier (nickel, silicium, chrome, etc.)

L'acier

construction des automobiles, feront l'objet du chapitre suivant.

Emplois de l'acier. — L'acier est, sans aucun doute, le métal le plus employé dans la construction automobile ; presque toutes les pièces sont en acier, le plus souvent forgé. Il peut y avoir aussi, cependant, des pièces d'acier moulé. Les cylindres du moteur, notamment, sont parfois en acier.

FABRICATION DE L'ACIER

L'acier étant un produit intermédiaire entre le fer et la fonte, on dispose de deux moyens fondamentaux pour le produire :

1°) *Affiner incomplètement* (c'est-à-dire décarburer incomplètement) de la fonte [acier puddlé, procédé Bessemer, procédé Martin];

2°) *Carburer du fer* aussi pur que possible [acier de cémentation].

Voyons rapidement le principe et la pratique de chacun de ces procédés.

Toutefois, avant de parler de la fabrication de l'acier, il convient de dire quelques mots de l'affinage de la fonte, c'est-à-dire de la *fabrication du fer*.

Affinage de la fonte. — La fonte employée pour la fabrication du fer est la fonte blanche.

L'opération peut être pratiquée de deux façons :

a) Par affinage au charbon de bois (Procédé comtois);

b) Par affinage au combustible minéral (Pudlage).

a) *Procédé comtois*. — La figure 25 représente le « bas foyer » ou fourneau comtois servant à cette opération.

Le bas foyer proprement dit F est rempli de char-

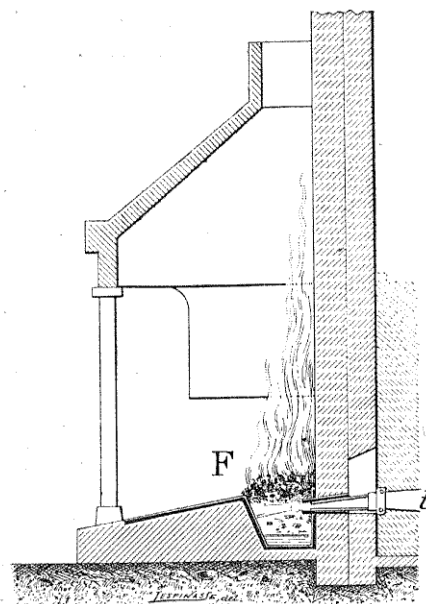


Fig. 26. — Bas foyer comtois.

bon allumé, que l'on soufflé par la tuyère *t*. La gueuse de fonte à affiner est placée sur le charbon; elle fond et coule goutte à goutte en s'oxydant au passage devant la tuyère [période de fusion]: la masse se rassemble au fond du creuset, en devenant pâteuse,

ce qui est déjà un signe d'affinage avancé (la fonte est plus fusible que le fer). La masse métallique est alors soulevée par l'ouvrier au moyen d'un ringard [période de soulèvement], et rassemblée en une

loupe, assez spongieuse. Cette loupe est alors « cinglée », ce qui chasse les scories et fait souder entre elles les diverses petites masses de fer.

La loupe ainsi cinglée est réchauffée et forgée de nouveau.

Ce procédé, dont l'emploi tend d'ailleurs à être abandonné, donne du fer très pur et très bien soudé.

b) *Puddlage*. — Dans le puddlage, l'affinage de

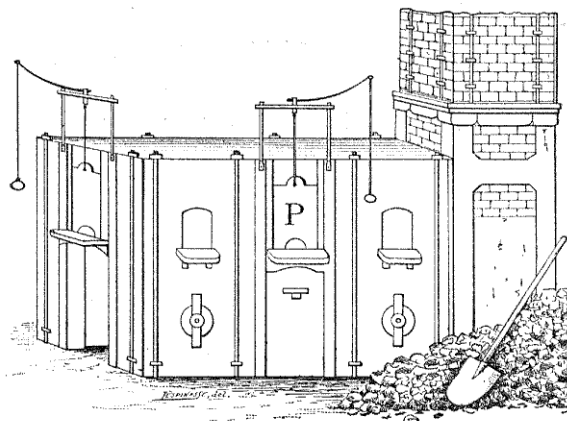


Fig. 27. — Four à puddler ordinaire.

la fonte se fait, à la flamme, sur la sole d'une sorte de four à réverbère dit *four à puddler* (fig. 27).

Le four étant chauffé au rouge blanc, on charge la fonte et on la laisse fondre. A ce moment, on ajoute des battitures (1) (25 à 50 0/0 du poids de

(1) Oxyde noir de fer qui se détache en écailles du fer lorsqu'on le forge.

Guide du constructeur d'automobiles

fonte), dont l'addition, froide, abaisse la température du four, ce qui est une condition nécessaire à la bonne élimination du soufre, du phosphore et du silicium.

Il se dégage alors de l'oxyde de carbone du bain ; pour activer la réaction, l'ouvrier brasse la masse avec un ringard. Il se produit un bouillonnement assez intense et la masse devient de plus en plus pâteuse. Après 30 à 60 minutes de bouillonnement, on voit apparaître à la surface du bain des grains de fer très brillants.

On donne alors un coup de feu pour redonner de la fluidité, et l'ouvrier forme une loupe, que l'on cingle comme dans l'opération précédente.

Ce mode de travail [*puddlage bouillant*] est assez

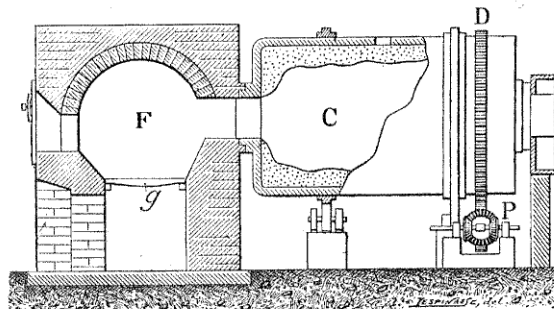


Fig. 28. — Four à puddler tournant, système Danks.

lent, mais donne des produits d'excellente qualité.

Il en existe une variante [*puddlage sec*], plus rapide, dans laquelle on charge la fonte chaude et on ajoute en même temps les battitures.

Le travail de l'ouvrier puddleur est extrêmement

pénible. Aussi a-t-on proposé divers procédés de *puddlage mécanique* (fours Danks, Bouvard, Pernot, etc., etc.).

La figure 28 représente, à titre d'exemple, un four à puddler tournant, du système Danks. La fonte est placée dans le cylindre C, animé d'un mouvement de rotation autour de son axe au moyen de la couronne dentée D commandée par les pignons P. L'appareil est chauffé par un foyer à la houille ordinaire F, g. La rotation du four produit le même effet que le brassage à la main : la fonte roule sur elle-même, et l'on assure de la sorte le renouvellement des surfaces de contact entre la fonte à affiner et les scories.

Voyons maintenant les procédés de production de l'acier que nous avons énumérés.

A. Fabrication de l'acier par affinage. —

Acier puddlé. — L'opération du puddlage, que nous venons de décrire, permet aussi d'obtenir de l'acier; on ajoute moins de battitures et on fait usage de fontes manganésifères. Le produit est très irrégulier et contient des parties trop affinées. Ce procédé est à peu près abandonné aujourd'hui.

Procédé Bessemer. — Ce procédé consiste, en principe, dans l'affinage, par un courant d'air soufflé à travers le métal, d'une masse de fonte fondue.

L'opération se fait dans la cornue ou *convertisseur* Bessemer que représente la figure 29. Cet appareil présente à la partie inférieure une série de

tuyères et il peut pivoter autour de deux tourillons.

La fonte (siliceuse dans le « travail acide », à haute teneur en phosphore [1,8 à 2 0/0] dans le « travail

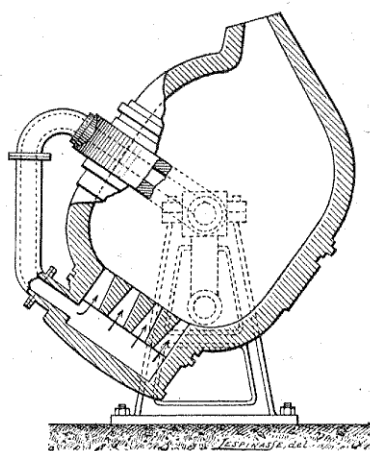


Fig. 29. — Convertisseur Bessemer.

basique » ou procédé Thomas) est introduite dans le convertisseur à l'état liquide, l'appareil étant maintenu horizontal. On le redresse alors et on commence le soufflage : le carbone, le silicium, etc. sont partiellement brûlés, des flammes (oxyde de carbone, etc.) sortent du convertisseur ;

tout à coup, brusquement, la flamme diminue de longueur (fin de la combustion du carbone) ; on couche alors de nouveau le convertisseur et on y ajoute du *spiegel* ou fonte riche en manganèse [addition finale]. Le manganèse réduit l'oxyde de fer qui a pu se former. Enfin, on coule le métal dans une *poche de coulée* portée par une grue. De la poche, l'acier est versé dans des lingotières en fonte d'hématite très pure.

Dans le *procédé Thomas*, le garnissage du convertisseur, au lieu d'être siliceux comme dans le Bessemer proprement dit, est en dolomie cuite. Des

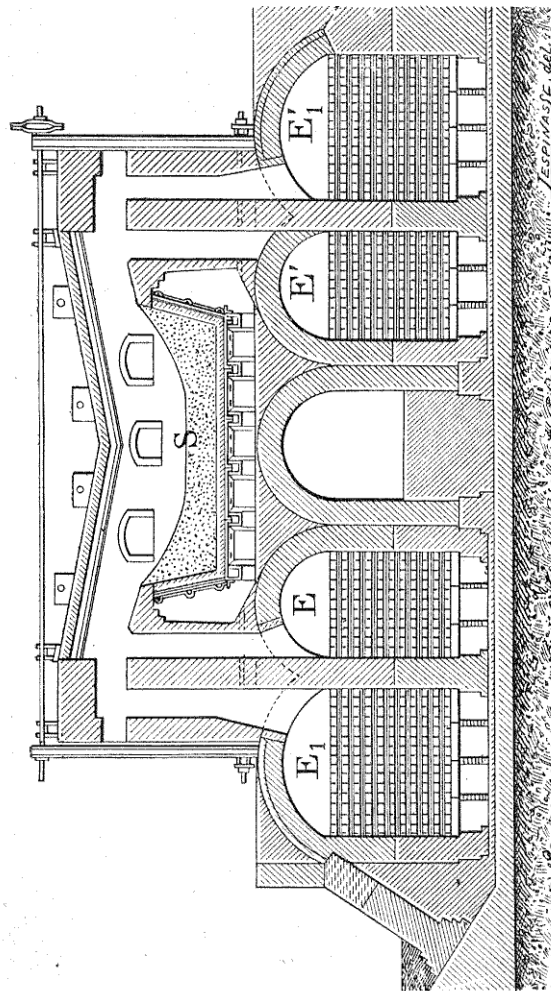


Fig. 30. — Four Siemens-Martin. — Coupe verticale schématique.

additions de chaux vive produisent alors l'élimination du phosphore.

Procédé Martin. — Ce procédé consiste dans l'affinage de la fonte sur la sole d'un four chauffé au gaz d'un générateur avec récupération de chaleur. (*Récupérateurs Siemens.* — Cf. Appareils Cowper des hauts-fourneaux.)

La figure 30 représente, au moyen d'une coupe verticale schématique un four Siemens-Martin. S est la sole sur laquelle s'opère l'affinage de la fonte. E, E₁, E', E'₁ sont les empilages servant au chauffage du gaz et de l'air pour la récupération de chaleur.

Le travail est fait généralement sur sole basique, ce qui permet la déphosphoration.

La fonte est maintenue pendant un temps assez long en fusion sous une couche de scories fusibles, riches en oxyde des battitures, puis l'on fait une addition de minerai ou de riblons de fer.

B. Fabrication de l'acier par cémentation. — Le principe de cette méthode est d'introduire du carbone dans du fer pur. Le procédé est très indirect, puisqu'il faut affiner complètement de la fonte, puis recarburer le fer obtenu, mais il s'impose pour obtenir des produits purs.

On prend donc du fer aussi pur que possible (fers de Suède), en barres plates (pour en augmenter la surface extérieure).

Les barres sont disposées dans des caisses en briques réfractaires, en alternant successivement une couche de barres et une couche de « ciment », com-

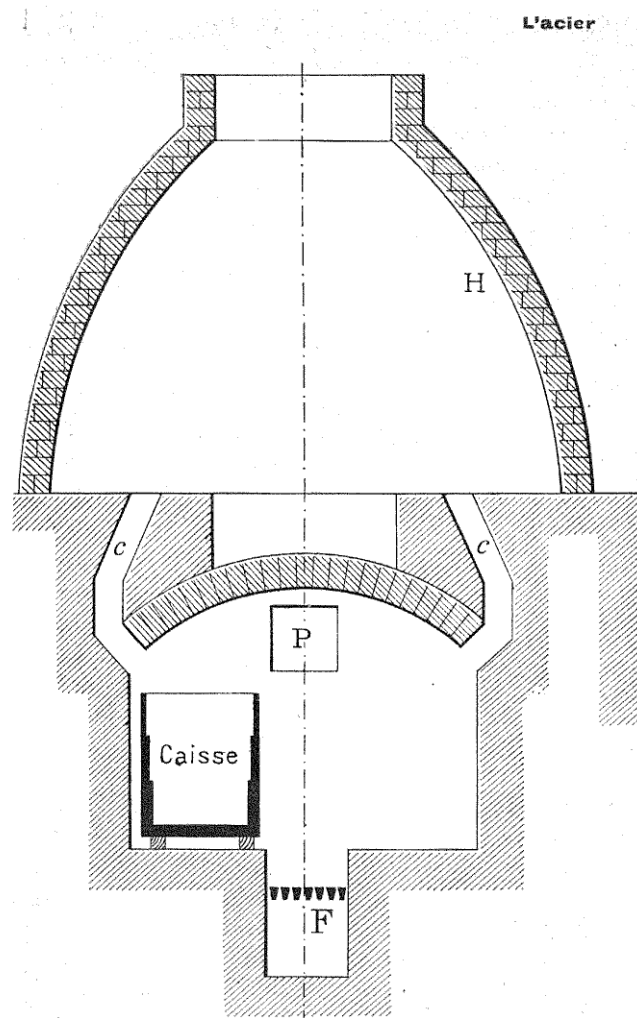


Fig. 31. — Four de cémentation.

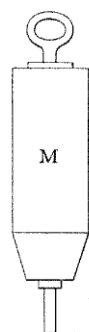
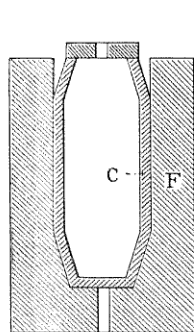
posé de charbon de bois pulvérisé, parfois mêlé à des cendres, des rognures de cuir, etc.

Les caisses sont introduites dans un four de cémentation (fig. 31), chauffé au rouge vif (1050° au plus) pendant six à huit jours. On suit les progrès de l'opération en retirant, de temps en temps, une barre que l'on casse. On laisse alors refroidir une semaine et on retire les barres cémentées.

Celles-ci sont plus carburées à la surface qu'au centre. Pour obtenir un acier de composition homogène, on les fond au creuset.

Le four que représente la figure 31 est du type dit à foyer médian F. Le tirage se fait par des canaux de faible hauteur *c* débouchant sous une sorte de grande hotte H. Les caisses sont en briques réfractaires, elles ont environ $0^m,80$ à $0^m,90$ de largeur,

$1^m,80$ de profondeur et 3 à 5 mètres de largeur.



Fusion de l'acier au creuset. — Les barres d'acier cémenté, coupées en petits fragments, sont fondues dans des creusets sous une cou-

Fig. 32. — Creuset pour la fusion de l'acier au creuset (C); moule pour la fabrication des creusets (F); mandrin pour le même usage (M).

che de charbon.

C'est par ce procédé que sont produits les aciers

les plus purs, ceux employés pour la confection de presque toutes les pièces des automobiles. Nous avons vu (I^{re} partie, chapitre III) que c'est également le mode de fabrication de l'acier à outils de bonne qualité.

Enfin, les aciers spéciaux sont également obtenus par fusion au creuset de barres cémentées avec mélange de produits introduisant du chrome, du tungstène, etc., dans les proportions voulues.

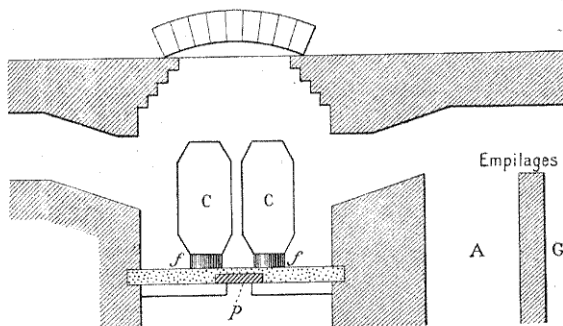


Fig. 33. — Four système Siemens pour la fusion de l'acier au creuset; C, creusets; f, fromages supportant les creusets; p, plaque de fonte empêchant la coulée de l'acier dans le sous-sol, en cas de rupture de creuset; A = air; G = gaz.

Les *creusets* employés ont une forme spéciale (fig. 32); ils sont fabriqués dans l'usine même, le plus souvent, avec une pâte formée d'argile cuite, de débris de vieux creusets, de coke ou de graphite.

Cette fabrication est faite, le plus souvent, à la main. La figure 32 montre le moule en fonte F et le mandrin M servant à cette opération.

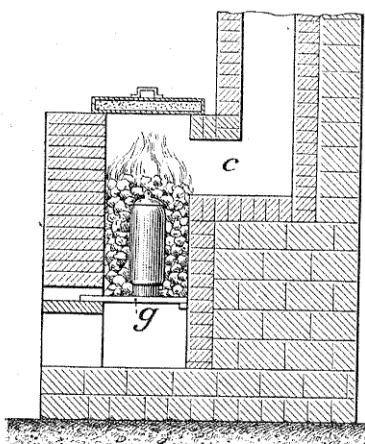
Les creusets ordinaires ne font guère plus de trois ou quatre coulées; les creusets au graphite résistent

à une dizaine d'opérations ; mais ils cèdent un peu de carbone à l'acier.

Les *fours* employés sont généralement aujourd'hui du système Siemens (fig. 33).

Les figures 34 et 35 représentent deux fours plus simples pour la fusion de l'acier au creuset. Le four de la figure 34 est du type le plus simple. Celui de la figure 35 comporte une voûte formée d'éléments mobiles V, et un appareil P pour sortir les creusets du four.

En dehors de la fabrication de l'acier au creuset,



la cémentation est un procédé très employé dans la construction automobile pour acier-rer certaines pièces.

Avec la fabrication de l'acier au creuset, nous terminerons cette rapide revue des procédés de fabrication de l'acier.

Fig. 34. — Four ordinaire pour la fusion de l'acier au creuset ; g, grille ; c, cheminée.

Il nous reste à dire quelques mots des propriétés les plus importantes des aciers et des principales sortes d'acier.

Classification et propriétés des aciers ordi-

naïres. — Les aciers sont divisés en aciers *doux* et *durs*. Chacune de ces deux catégories comprend

elle-même, d'ailleurs, un grand nombre de produits.

On peut admettre que les aciers doux contiennent de 0,135 à 0,5 0/0 de carbone. Leur résistance à la rupture est généralement de 40 à 60 kilogrammes par centimètre carré.

Les aciers durs tiennent de 0,6 à 1,5 0/0 de carbone et offrent une résistance à la rupture supérieure à 60 kilog. par cm.

Dans la construction automobile, on n'emploie généralement que des aciers très purs (c'est-à-dire exempts de soufre et de phosphore).

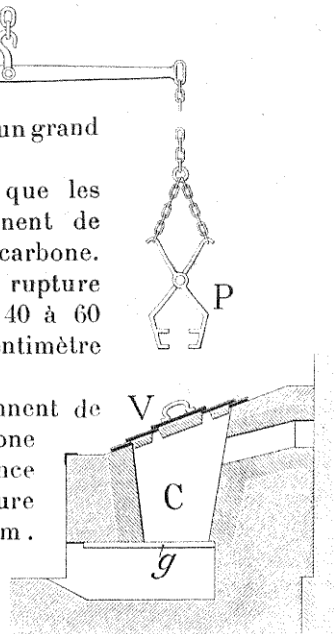


Fig. 35. — Four pour la fusion de l'acier au creuset. C, cuves recevant les creusets; G, grille; V, voûte mobile; P, pince pour sortir les creusets.

Points de transformation de l'acier. — Nous avons vu, en étudiant les propriétés du fer pur (voir page 107), que l'on a reconnu l'existence de trois états allotropiques du fer, le fer α , le fer β et le fer γ .

Des transformations correspondantes existent

pour les aciers, mais, ainsi qu'il est facile de le prévoir, la teneur en carbone intervient et vient influencer sur les points de transformation.

« Supposons, avec M. Osmond, que nous prenions

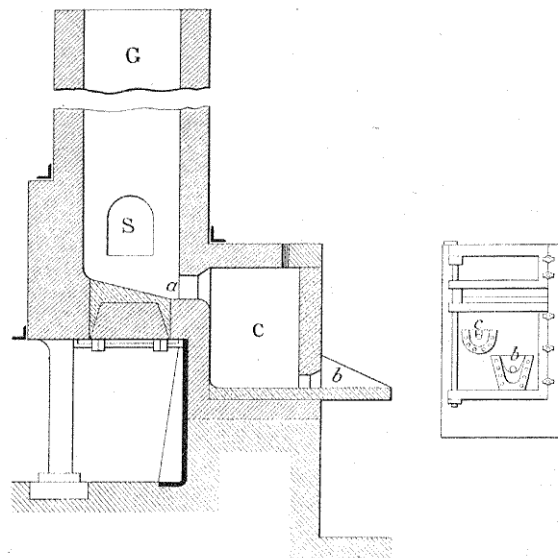


Fig. 36. — Cubilot système Krigar pour la fusion de la fonte (moulages en seconde fusion, etc.); G, gueulard; C, avant creuset; b, trou de sortie des scories; c, trou de coulée du métal; S, arrivée du vent.

des aciers contenant de plus en plus de carbone et que nous en étudions les courbes de refroidissement (figure 37). Pour un acier doux ($C = 0,140$ 0/0), la courbe présentera trois points singuliers indiquant des ralentissements :

A_3 vers 820° ;

A_2 vers 720° ;

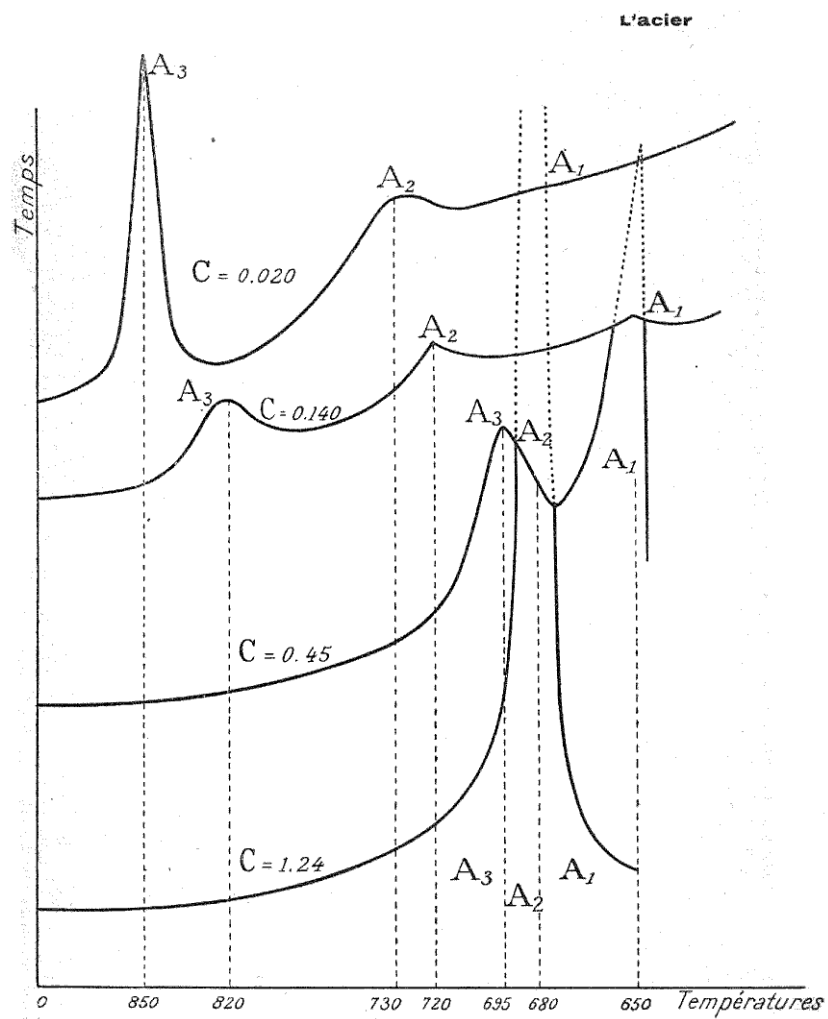


Fig. 37. — Courbes de refroidissement des aciers à différentes teneurs en carbone (d'après M. Osmond).

A_1 vers 650° .

« En outre, nous remarquerons que le ralentissement qui a eu lieu vers 820° n'est plus, comme dans le cas du fer pur (voir page 108), indiqué par un point, mais bien par un palier.

« Pour un acier mi-dur ($C = 0,450$ 0/0), un ralentissement progressif et une station. Le ralentissement progressif a lieu à 695° et comprend les points A_3 et A_2 .

« La station est au point A, vers 650° .

« Pour un acier dur ($C = 1,240$ 0/0) il n'y a plus qu'une longue station A_3, A_2, A_1 , à 680° environ.

« La figure 37 représente quelques courbes types données par M. Osmond.

« Nous notons donc qu'en ajoutant du carbone à du fer pur, nous arrivons à faire disparaître petit à petit le point A_3 et que le point A_2 ne disparaît que si l'on en ajoute beaucoup plus.

« Or, il est entendu que le point A_3 correspond au dégagement de chaleur qui a lieu lorsque le fer passe de l'état γ à l'état β . On voit que, si l'on ajoute du carbone, cette transformation subsiste, mais, d'une part, la température à laquelle se fait cette transformation est plus basse ; d'autre part, l'échauffement est moindre » (1).

Les expériences de M. Osmond ont établi que pour l'acier à 0,350 0/0 de carbone, le point A_3 disparaît complètement ; il en résulte que, à 750° , tous les aciers contenant entre 0 et 0,350 0/0 de carbone sont formés de fer α + fer γ ayant dissous 0,350 0/0 de carbone. En outre, pour les aciers contenant du

(1) L. GUILLET, *loc. cit.*

ter β (lequel ne dissout pas le carbone), la température à laquelle le fer β se transforme en fer α est constante (750°).

Phénomène de la recalcinescence, carbone de fer, cémentite. — « En étudiant les courbes de refroidissement des aciers à différentes teneurs de carbone, nous avons noté un point vers 680° caractérisé par un échauffement important, d'autant plus important que la teneur en carbone est plus élevée.

« Ce point, dans la notation de M. Osmond, est désigné par A_1 .

« Ce phénomène de grand retard au refroidissement pour les aciers est connu depuis fort longtemps ; ce retard au refroidissement s'accuse même par une élévation de température.

« Des observations ont été faites par Gore et Barrett sur un acier dur, qu'ils ont chauffé petit à petit jusqu'au rouge vif. A une certaine température, on a remarqué un ralentissement très brusque dans la dilatation et, d'autre part, l'éclat du métal diminuait subitement. Si, au lieu d'observer ces faits à l'échauffement, on les observe au refroidissement, c'est-à-dire sur une barre qui a été portée à 900° environ et qu'on laisse refroidir lentement, on observe les phénomènes inverses, c'est-à-dire une augmentation subite de la dilatation et de l'éclat. Ces phénomènes sont beaucoup plus sensibles au refroidissement qu'à l'échauffement parce qu'ils sont beaucoup plus brusques (1). Il arrive même que la contraction et la chute de température peuvent être momentanément renversées ; c'est l'augmentation

(1) M. L. GUILLET, *loc. cit.*

d'éclat qui a fait donner à ce phénomène le nom de *recalescence* » (1).

Ce phénomène est fortement accusé dans les courbes (voir figure 37). La température à laquelle se produit la recalescence est de 710° dans l'échelle des températures où le point de fusion de l'or est de 1045° (2).

Or, on est parvenu à établir d'une façon très nette que cette température est celle à laquelle se produit la *dissociation de la cémentite* Fe_3C . Le point A_1 , des courbes (fig. 37) correspond précisément à cette dissociation. Il sera, évidemment, d'autant plus accentué dans la courbe de refroidissement que la cémentite sera en plus grande abondance et, par conséquent, que la teneur en carbone sera plus élevée. La détermination des courbes de refroidissement dans les fers et aciers présente donc un très grand intérêt.

Nous venons de voir que, au moment où se produit le phénomène de la recalescence, on observe, au refroidissement, une augmentation subite de l'éclat et de la *dilatation*.

Un grand nombre de méthodes et d'appareils ont été proposés et sont encore en usage pour l'étude des phénomènes de dilatation. Nous ne pouvons ici les décrire tous et nous devons nous borner, comme exemple, à dire deux mots de la méthode de

(1) M. H. Le Chatelier, *Etat actuel des théories de l'acier* (*Revue générale des Sciences*, 15 janvier 1897).

(2) M. H. Le Chatelier, *idem*.

L'acier

MM. Charpy et Grenet, qui est une modification de celle de M. H. Le Chatelier.

Le principe de cette méthode est la comparaison entre les dilatactions d'une barre du métal étudié et d'une barre étalon (en porcelaine de Sèvres). Ces deux barres sont invariablement liées en un point ; entre ces deux tiges, et à une distance de 10 centimètres de l'arête commune, se trouve coïncé un miroir en silice fondue au four électrique. Lorsqu'on chauffe l'ensemble des deux barres ainsi montées, le miroir s'incline, si l'une des deux tiges se dilate plus que l'autre ; dans le cas contraire, il reste dans la position qu'il occupait d'abord. A une distance d du miroir, on dispose une lunette et une règle graduée, sur laquelle est placée une source lumineuse que l'on peut déplacer.

« Au commencement de l'expérience, le point lumineux est placé à une certaine division de la règle, telle que l'on puisse en voir l'image dans la lunette. On chauffe, le miroir s'incline ; on ne voit plus le point lumineux dans la lunette ; pour l'apercevoir à nouveau, il faut déplacer la source lumineuse d'une certaine longueur l .

« Si le miroir s'est incliné d'un angle α , on a :

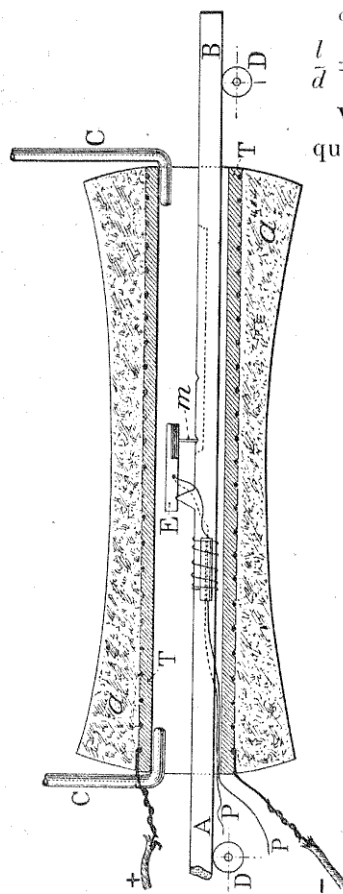
$$\operatorname{tg} 2 \alpha = \frac{l}{d}$$

« D'autre part, l étant la longueur du miroir et d la différence de dilatation qui existe entre les deux tiges, on a :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{d}{l}$$

« On a sensiblement :

$$\operatorname{tg} 2 \alpha = 2 \operatorname{tg} \alpha,$$



F. 38. Four Charpy-Grenet pour l'étude des dilatations (d'après M. Guillet).

« Donc :

$$\frac{l}{d} = \frac{d}{r} \text{ ou } d = \frac{lr}{2d} \quad (1).$$

Voici, maintenant, quelle est la méthode de MM Charpy et Grenet (*Bulletin de la Société d'Encouragement*, 30 avril 1903) : M. Le Chatelier faisait usage pour chauffer les tiges d'un four Mermet et le support de porcelaine reposait sur le tube de terre réfractaire. MM. Charpy et Grenet, craignant que la tige en porcelaine et celle en acier ne fussent pas bien à la même température, la première pouvant être plus chaude, les ont placées symétriquement par rapport à l'axe du four.

(1) L. GUILLET, *loc. cit.*, et voir : *Contribution à l'étude des alliages*, p. 394.

L'acier

La figure 38 représente le four employé par MM. Charpy et Grenet pour ces expériences.

Une longue tige en porcelaine AB, sort du four et s'appuie sur deux galets D, D permettant une libre dilatation. Cette tige sert de support à l'ensemble. De plus, on a cherché à obtenir un four à température extrêmement constante. Pour cela, MM. Charpy et Grenet ont employé un four à chauffage électrique, dans lequel la couche isolante a entourant le tube T est d'épaisseur inégale aux différents points et va en augmentant vers les extrémités du tube. Comme, dans un four ordinaire, la température tend à être plus faible aux extrémités qu'au centre, la disposition adoptée pour l'isolant atténue considérablement cette différence.

La température à laquelle est porté l'échantillon E est évaluée au moyen d'un couple thermo-électrique Le Chatelier, placé dans un trou percé dans l'échantillon de l'acier; pour ne pas nuire aux déplacements des tiges, MM. Charpy et Grenet ont pris des fils de 0^{mm},1 de diamètre (P,P figure 38) pour constituer le couple.

Enfin m est le miroir dont nous avons expliqué le rôle plus haut.

Au moyen de cet appareil, dont la sensibilité est très grande, on constate aisément, au refroidissement, une dilatation accompagnée d'un dégagement de chaleur au point de recalescence.

Des expériences de MM. Charpy et Grenet, il résulte que l'amplitude du phénomène augmente avec la teneur en carbone, atteint un maximum pour la teneur de 85 0/0 environ, et décroît ensuite.

CHAPITRE IV

Les Aciers spéciaux.

La construction des automobiles emploie de plus en plus les aciers spéciaux (aciers au nickel, aciers au chrome, acier au silicium, acier au tungstène, etc.).

La fabrication de ces aciers se fait par fusion au creuset d'acier de cémentation, avec addition du métal que l'on veut incorporer à l'acier. (Voir chapitre III.)

Ces aciers ont fait l'objet d'études très approfondies de la part de MM. Le Chatelier, Léon Guillet, Dumas, Hadfield, etc. Leurs propriétés, fort intéressantes, commencent à être bien connues. Nous allons en résumer les plus caractéristiques (1).

On peut distinguer deux groupes d'aciers spéciaux :

A. Les *aciers ternaires*, formés de fer, de carbone et d'un autre élément ;

B. Les *aciers quaternaires*, alliages de fer, de carbone et de deux autres éléments.

(1.) Voir, notamment, la communication de M. Léon Guillet, faite le 27 septembre 1903, au meeting de l'*Iron and Steel Institute* et l'intéressant travail du même auteur : *Les Aciers spéciaux*, Paris, Dunod, 1904.

A. — ACIERS TERNAIRES.

Aciers au nickel. — Les aciers au nickel sont de trois sortes :

1. Aciers à basse teneur (1 à 6 0/0) ;
2. Aciers à teneur moyenne (10 à 18 0/0) ;
3. Aciers à haute teneur (25 à 36 0/0).

Mais, d'après M. Guillet, il faut établir la classification sur d'autres bases, « car la constitution et les propriétés mécaniques des aciers au nickel dépendent essentiellement de la somme des deux éléments carbone et nickel » ; il distingue donc :

1. Les aciers à basse teneur de nickel (1 à 6 0/0) et très basse teneur de carbone (0,10 à 0,25 0/0) ;
2. Les aciers à basse teneur de nickel (1 à 6 0/0) et à moyenne teneur de carbone (0,25 à 0,40 0/0) ;
3. Les aciers à moyenne teneur de nickel (10 à 18 0/0) et à moyenne teneur de carbone (0,20 à 0,25 0/0) ;
4. Les aciers à haute teneur de nickel (30 à 36 0/0) et à basse teneur de carbone (0,12 à 0,20 0/0) ;
5. Les aciers à haute teneur de nickel (20 à 30 0/0) et à haute teneur de carbone (0,60 à 0,80 0/0).

Les premiers conviennent tout particulièrement pour la cémentation, surtout lorsque la teneur en carbone est inférieure à 0,12 0/0. Pour obtenir de bons résultats (éviter la fragilité des pièces cémentées), M. L. Guillet recommande de cémenter avec le mélange suivant :

Guide du constructeur d'automobiles

Charbon de bois..... 60 parties,
Carbonate de baryum. 40 parties.

Cémenter à une température comprise entre 850 et 1050° ; puis laisser refroidir jusqu'à 600° (au-dessous du point de transformation). Réchauffer la pièce et la tremper à 900°. Refroidir à nouveau à 800° au-dessus du point de transformation, pour rendre la superficie non fragile.

Ces aciers à basse teneur de nickel et de carbone sont très employés dans la construction automobile. [Généralement : 0,10 à 0,15 0/0 de carbone et 1,5 à 2 0/0 de nickel]. Certaines usines préfèrent un acier à 5 ou 6 0/0 de nickel, plus cher, mais aussi à résistance et à limite élastiques plus grandes :

Propriétés mécaniques (1). — Pour les aciers à très faible teneur (1,5 à 2 0/0) de nickel, on a :

R = Résistance de rupture à la traction..... = 26.8 à 30.8
E = Limite élastique..... = 26.8 à 30.8
A = Allongement 0/0..... = 30 à 34 0/0.

Pour ceux à 5 ou 6 0/0 de nickel.

R = 45,5 à 52.

E = 28 à 32 0/0.

Ces aciers, à faible teneur de carbone, présentent souvent des pailles.

Aussi leur préfère-t-on souvent des aciers de 1 à 6 0/0 de nickel, mais à moyenne teneur de carbone (0,25 à 0,40), qui sont plus homogènes, présentent un coefficient de rupture à la traction plus élevé, ainsi

(1) Voir III^e Partie, Chapitre II, *Essais mécaniques*, la définition des termes : résistance à la traction, limite élastique, etc., et les méthodes de mesure.

Les Aciers spéciaux

que la limite élastique, un très grand allongement, une résistance au choc remarquable (20 à 45 kilogrammètres par la méthode de Frémont) et une augmentation notable de la résistance à la traction par la trempe à l'eau.

Les aciers à haute teneur de nickel ont des limites élastiques assez basses.

Usages des aciers au nickel. — Les aciers à faible teneur en nickel et en carbone, après cémentation, s'emploient pour toutes les pièces ayant à subir des frottements, mais sans avoir à supporter des chocs violents.

Les aciers à basse teneur de nickel (1 à 6 0/0) et à moyenne teneur (de 0,25 à 0,40 0/0) de carbone, sont employés pour la fabrication des arbres, des axes, des coussinets.

Les aciers à haute teneur de nickel et de carbone s'emploient parfois pour faire des vilebrequins et surtout des soupapes. Ils ont cependant des inconvénients assez sérieux (basse limite élastique) ; ils subissent au cours des opérations d'écrouissage, recuit et trempe des transformations intermoléculaires très marquées (c'est le cas des soupapes) ; ils coûtent en outre fort cher.

Aciers au chrome. — Ces aciers, contenant 1 à 1,2 0/0 de carbone et 1 à 2,5 0/0 de chrome ; ils doivent subir une double trempe, la première à 800° et à l'huile, la seconde à 830° et à l'eau. On évite ainsi les fissures, tout en obtenant la dureté nécessaire.

Usages. — Ces aciers s'emploient pour les cuvettes.

Aciers au silicium. — Il résulte de l'étude spéciale que M. L. Guillet a fait de ces aciers que seuls les aciers à moins de 5 0/0 de silicium peuvent être utilisés dans la construction automobile. Avec cette restriction, l'usage s'en est beaucoup répandu.

Ces aciers ont une très grande fragilité dans le sens perpendiculaire au plan de laminage. Ils demandent des précautions assez minutieuses pour leur travail (des différences même de 25° dans la température de recuit ont une influence très appréciable).

Après trempe et recuit, la résistance à la traction peut atteindre 100 kilogrammes par millimètre carré de section (pour des aciers à 0,8 à 0,96 de carbone et 0,43 à 2,0 0/0 de silicium).

Usages. — Ces aciers sont surtout employés dans la fabrication des ressorts et des engrenages (à cause de la grande dureté superficielle qu'ils peuvent acquérir).

Aciers au tungstène. — Les aciers au tungstène sont un peu moins fragiles que les aciers au silicium, et offrent une plus grande résistance dans le sens perpendiculaire au laminage. En revanche, ils coûtent fort cher et sont moins résistants que les précédents dans le sens du laminage.

La composition est généralement la suivante :

Carbone	0.47 0/0
Manganèse	0.22 0/0
Tungstène.....	0.60 0/0

Les Aciers spéciaux

Propriétés mécaniques. — Après recuit à 900° et refroidissement lent, on a :

$$R = 82,9;$$

$$E = 61,9;$$

$$A = 140/0.$$

Après trempe à 850° et réchauffage à 850°, le même acier donne :

$$R = 146,3;$$

$$* E = 103,2;$$

$$A = 0 \text{ à } 70/0.$$

Usages. — Ces aciers ont été proposés comme aciers à ressorts, à la place des aciers au silicium, mais l'emploi ne paraît pas devoir s'en généraliser.

D'autres aciers ternaires ont été étudiés. Parmi ces aciers, M. Guillet ne voit guère que l'acier au vanadium « dont l'avenir est plein de promesses ».

B. ACIERS QUATERNAIRES.

Aciers chrome-nickel. — Ces aciers ont une très grande dureté minéralogique après trempe. On les emploie généralement avec faibles teneurs de nickel et de chrome. Ils commencent à être très employés.

Usages. — L'industrie automobile en fait surtout usage pour les pièces exigeant une grande résistance au choc et une grande dureté (axes, engrenages, etc.).

Acier N Y (Commentry-Fourchambault). — Ce métal, fabriqué aux usines d'Imphy par la Société Commentry-Fourchambault, qui en garde la com-

Guide du constructeur d'automobiles

position secrète, présente des propriétés remarquables.

Propriétés mécaniques. — Recuit au rouge cerise à 900°, cet acier donne :

R = 51,6 à 56,8 ;

E = 41,6 à 45,5 ;

A = 25 à 30 0/0.

Après trempe à 900°, sans recuit, on a :

R = 134,1 à 144,6 ;

E = 118,6 à 144,4 0/0 ;

A = 8 à 10 0/0.

Ce métal présente donc « avant trempe toutes les propriétés d'un acier demi-dur ; il se travaille de la même façon. Après trempe à 900°, sans recuit, il possède toutes les propriétés si hautement appréciées des aciers au silicium brusquement refroidis et réchauffés. Il possède sur ces aciers le grand avantage de ne pas exiger de réchauffement et surtout de ne pas avoir de fragilité perpendiculairement au plan de laminage ».

Usages. — L'acier NY est déjà d'un emploi très courant dans la construction automobile ; on l'emploie surtout pour les vilebrequins et les engrenages.

Ce sont là les principaux aciers spéciaux employés dans l'industrie automobile. Ils offrent, comme on le voit, de précieuses qualités, et leurs applications ne peuvent que se généraliser encore davantage.

Voici, en résumé, et comme conclusion pratique,

Les Aciers spéciaux

comment M. Guillet classe les aciers employés en France dans la construction des automobiles :

1. Aciers à basse teneur de carbone et nickel : aciers perlitiques, qui sont utilisés pour les parties exigeant la cémentation et la trempe ;
2. Aciers à teneur moyenne en carbone et à faible teneur de nickel employés après trempe et recuit pour un grand nombre de pièces : *Arbres, engrenages, pignons*, etc. ;
3. Aciers à basse teneur de carbone et à haute teneur de nickel, employés pour les *soupapes* ;
4. Aciers au chrome, à teneur élevée en carbone et à basse teneur en chrome, employés pour les *cuvettes* ;
5. Aciers au silicium utilisés pour les *ressorts* et les *engrenages* ;
6. Aciers chrome-nickel à basses teneurs en nickel et en chrome, employés pour les pièces si nombreuses qui exigent la résistance au choc et un certain degré de dureté ;
7. Un nouvel acier désigné par la marque NY, et dont la composition n'est pas divulguée.

CHAPITRE V

Le Cuivre.

Généralités. — Le cuivre pur est relativement peu employé dans la construction des automobiles : il ne sert guère que pour la tuyauterie, pour certaines pièces de dimensions réduites, enfin pour les réservoirs, dans certaines voitures.

Propriétés physiques du cuivre. — Le cuivre est de couleur rouge pur, caractéristique ; il est susceptible d'un très beau poli ; il possède une odeur désagréable, que développe le frottement.

La cassure est grenue ou finement cristalline, surtout pour le métal fondu, non travaillé. La cassure du métal forgé ou laminé est fibreuse.

Le cuivre est très malléable et très ductile ; tous les autres métaux, sauf l'aluminium, diminuent la malléabilité et la flexibilité du cuivre, mais ils en augmentent la dureté et la résistance à l'écrasement.

Tout travail mécanique prolongé écrouit le cuivre ; le recuit vers 230° (Knab) suffit à lui rendre sa malléabilité et sa ductibilité.

La ténacité du cuivre diminue avec la chaleur.

Il est très bon conducteur de l'électricité (la conductibilité de l'argent étant 100, celle du cuivre est de 93,08).

Le cuivre forme des alliages avec le zinc et l'étain

Le Cuivre

(bronzes et laitons), avec l'aluminium (bronze d'aluminium).

L'oxygène se trouve souvent dans le cuivre à l'état d'oxyde dissous dans le métal en fusion ; il donne de la fragilité au métal.

Le phosphore augmente la dureté du cuivre et sa fusibilité.

La densité du cuivre martelé ou laminé varie de 8,90 à 8,95.

Propriétés chimiques du cuivre. — Le cuivre travaillé ne s'oxyde qu'à l'air humide ; il se produit alors un hydrocarbonate (vert-de-gris).

Chauffé au rouge au contact de l'air, le cuivre se couvre d'une couche d'oxydure.

NOTIONS DE MÉTALLURGIE DU CUIVRE

Minerais de cuivre. — Le cuivre existe dans la nature à l'état natif (au lac Supérieur, au Chili, en Sibérie, en Australie, dans l'Oural).

L'oxyde rouge de cuivre Cu_2O abonde au Chili, en Colombie et surtout en Australie. Ce minerai contient, à l'état pur, 88,78 0/0 de cuivre.

Le carbonate de cuivre CO_3Cu se rencontre surtout dans l'Oural, au Pérou et au Chili.

Les minerais sulfurés sont de beaucoup les plus abondants. Ce sont : la *chalkosine* Cu_2S (abondante seulement dans l'Oural et en Sibérie), et la *chalcoppyrite* $\text{Cu}_2\text{S} + \text{Fe}_2\text{S}_3$, sulfure double de cuivre et de fer. C'est là le véritable minerai de cuivre.

On rencontre la chalcoppyrite dans les gîtes célèbres de Saint-Bel (Rhône), de Rio-Tinto, La Zarza (Espagne), etc., en Cornouaille, etc.

Guide du constructeur d'automobiles

La teneur en cuivre de la chalkopyrite varie de 3 à 10 ou 12 0/0, rarement à 35 0/0.

Nous ne citerons pas les autres minerais de cuivre, car ils ne sauraient guère être considérés comme minerais usuels de cuivre.

Avant d'être soumis au traitement métallurgique proprement dit, les minerais subissent une préparation mécanique généralement assez simple, ayant surtout pour but de séparer les gangues terreuses.

Principe de la métallurgie du cuivre. — Nous ne parlerons ici que du traitement des minerais sulfurés. Si l'on avait affaire à du sulfure de cuivre pur, on pourrait le traiter, très simplement, par grillage et réduction; mais la présence du fer dans le minerai a comme conséquence que l'on ne pourrait réduire le cuivre sans réduire en même temps beaucoup de fer. On ne cherche donc pas à extraire du premier coup le métal.

« On fait un grillage partiel pour diminuer la proportion de soufre : à la suite de ce grillage, le minerai se compose de sulfures, de sulfates et d'oxydes des deux métaux avec une gangue siliceuse. Si l'on fond ensemble ces matières, il se formera une matte contenant tout le soufre, presque tout le cuivre et une partie du fer; le reste du fer passera dans la scorie avec la silice et les autres bases. Ces scories ne retiendront que peu de cuivre, pourvu que leur composition soit convenable.

« La matte pourra être traitée de nouveau comme le minerai par le grillage partiel suivi d'une fonte, avec additions de matières siliceuses; on obtiendra une nouvelle matte plus riche.

Le Cuivre

« On arrivera de la sorte, au bout d'un nombre d'opérations variable avec la nature des minerais, à une matte assez riche en cuivre pour être traitée par rôtissage ou par grillage et réduction. Cette dernière opération donnera du cuivre impur qui devra subir un affinage.

« Les scories de la première fonte seules sont assez pauvres pour être rejetées : toutes les autres sont repassées ; on les ajoute aux minerais ou aux mattes grillées suivant leur teneur.

« Le principe de la méthode est toujours le même, mais les procédés pratiques varient beaucoup » (1).

Nous ne pouvons entrer ici dans les détails de ces diverses opérations et devons nous borner à cet énoncé du principe de la métallurgie du cuivre.

Signalons encore, cependa, l'intéressante méthode imaginée par M. Manhès, pour la *fabrication du cuivre au convertisseur Bessemer* (à tuyères latérales), méthode appliquée à l'usine d'Eguilles, près Sorgues (Vaucluse).

Enfin, pour le traitement des minerais à très faible

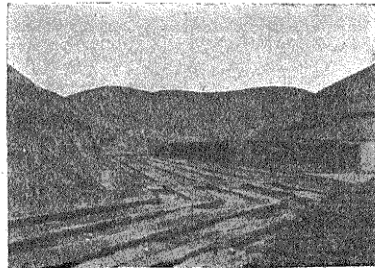


Fig. 39. — Canaux de " cémentation " (métallurgie du cuivre par voie humide), à La Zarza Espagne.

(1) Knab. *Traité de métallurgie*.

teneur en cuivre, on fait usage de *méthodes de voie humide* (dissolution du cuivre à l'état de chlorure ou sulfate, puis précipitation au moyen du fer, sur des gueuses de fonte disposées dans des canaux de « cémentation »).

La figure 39 représente une portion des canaux de précipitation ou de « cémentation » à La Zarza, près Río Tinto.

Les qualités que l'on recherche dans le cuivre sont la ductilité et la ténacité.

On préfère toujours les cuivres ne renfermant ni fer ni plomb, car ces deux métaux ont un effet nuisible sur les propriétés du cuivre.

L'antimoine donne de la fragilité au cuivre (même à la dose de 0,0015).

Le bismuth a un effet analogue : même à la faible proportion de 0,02 0/0, le cuivre devient cassant à chaud ; 0,5 0/0 de bismuth le rendent cassant à froid.

Toutefois, la présence de bismuth et d'antimoine, à la fois, dans un cuivre, a un effet moins fâcheux.

Le nickel lui communique de la dureté.

La teneur en silicium doit être inférieure à 1,6 0/0 car, au delà, le silicium empêche le travail à froid.

Un des défauts les plus fréquents du cuivre, ce sont les soufflures. On doit choisir un métal qui en soit rigoureusement exempt.

On rejette aussi les cuivres contenant de l'arsenic et de l'antimoine, dont l'action est nuisible (ils diminuent, notamment, la conductibilité).

CHAPITRE VI

Les alliages du cuivre.

Alliages divers.

Préparation des alliages. — Tous les alliages usuels sont obtenus par simple fusion au creuset des métaux constituants, en empêchant l'oxydation en recouvrant, le plus souvent, les métaux d'une couche de charbon pulvérisé.

Ces alliages ne sont pas assez importants dans la construction des automobiles pour justifier ici de minutieux détails sur leur fabrication.

Nous nous bornerons donc à quelques rapides indications sur la composition des alliages les plus fréquemment employés.

Laitons. — Le laiton, vulgairement appelé *cuivre jaune*, est un alliage à base de cuivre et de zinc.

Voici quelques analyses de laitons (d'après Hiorns) :

Laiton anglais :

Cuivre.....	70,29
Zinc....	29,26
Etain.....	0,17
Plomb.....	0,28

Laiton de Romilly :

Cuivre.....	70,1
Zinc.....	27,9

Guide du constructeur d'automobiles

Laiton d'Augsbourg :

Cuivre.....	78,89
Zinc.....	27,63
Etain.....	0,85

Laiton en feuilles :

Cuivre.....	84
Zinc.....	16

Fil de laiton :

Cuivre.....	70
Zinc.....	30

Bronzes. — On donne le nom générique de bronzes à des alliages dont les constituants principaux sont le cuivre et l'étain. Ils s'emploient assez fréquemment pour des coussinets et des pièces soumises à de forts frottements.

Voici quelques exemples de composition de bronzes mécaniques :

Pour coussinets ordinaires :

Cuivre.....	84,5
Etain.....	13,3
Zinc.....	2,2

Pour gros coussinets :

Cuivre.....	84,0
Etain.....	12,0
Zinc.....	4,0

Pour coussinets principaux :

Cuivre.....	75,0
Etain.....	4,0
Zinc.....	21,0

Les Alliages du cuivre

Pour robinets et presse-étoupes :

Cuivre	81
Etain.....	3
Zinc.....	13
Plomb.....	3

Le *bronze phosphoreux* est parfois employé pour certains pignons, pour des parties de pompes, etc. Il a alors une composition voisine de la suivante :

Cuivre.....	82,0
Etain.....	7,0
Phosphore.....	0,15 à 0,25

Cet alliage est fort et tenace.

Alliages anti-friction. — Voici, d'après Hiorns, quelques analyses de métaux anti-friction pour coussinets :

Etain.....	14
Cuivre.....	6
Zinc.....	80

Métal pour coussinets :

Etain.....	81
Cuivre.....	5
Plomb.....	14

Métal Magnolia :

Plomb.....	78
Antimoine.....	21
Fer.....	1

(M. Deau.)

Paliers pour hélices :

Etain.....	26
Cuivre.....	5
Zinc.....	69

Guide du constructeur d'automobiles

La composition de ces alliages est, on le voit, extrêmement variable. Tous les métaux anti-friction proposés doivent être suffisamment mous pour s'adapter à la surface de frottement et assez fusibles pour être faciles à couler.

Nous verrons, au chapitre 3, III^e partie, comment sont constitués les alliages anti-friction, d'après la métallographie microscopique.

CHAPITRE VII

L'aluminium et ses alliages.

Généralités. — L'aluminium a été isolé pour la première fois en 1819 par Wohler, mais il n'est devenu industriel que tout récemment, à cause de son prix élevé. Ce n'est en effet que dans ces dernières années que le prix du kilogramme a pu être abaissé à 4 fr. 50 à 5 francs. Or, le kilogramme d'aluminium a coûté : 45 fr. en 1888, 18 fr. en 1889, 12 fr. en 1892.

Aujourd'hui, l'aluminium est devenu d'un emploi tout-à-fait général dans la construction automobile pour toutes les pièces qui n'ont pas à supporter des efforts de torsion notamment, car, ainsi que nous le verrons plus loin, la faible résistance à la torsion est un des défauts les plus nets de l'aluminium. Mais ce métal est précieux, à cause de sa faible densité, pour un très grand nombre de pièces.

L'aluminium est rarement employé pur dans la construction automobile. On lui préfère le plus souvent un de ses alliages dont nous parlerons plus loin.

La consommation de l'aluminium a augmenté tellement depuis quelques années que les usines françaises ne peuvent plus suffire aux demandes de leur clientèle.

Nous allons dire d'abord quelques mots des prin-

Guide du constructeur d'automobiles

cipales propriétés de l'aluminium. Nous passerons ensuite en revue les procédés de fabrication du métal et nous terminerons ce chapitre par une étude rapide des alliages d'aluminium les plus employés.

Propriétés physiques de l'Aluminium. — L'aluminium est un métal blanc, légèrement bleuâtre, de densité 2,56 à 2,67 (quand il a été martelé). Sa dureté et sa ténacité sont voisines de celles de l'argent. Il est bon conducteur de la chaleur et de l'électricité, il est meilleur conducteur de l'électricité que le fer. Il fond à 625 degrés.

L'aluminium est inaltérable à l'air et à l'eau, surtout lorsqu'il est pur : il est arrivé souvent en effet, que, ayant employé de l'aluminium impur à certains usages, l'objet formait une pile au contact d'un liquide et sa destruction se produisait avec une extrême rapidité. Cet inconvénient peut, d'ailleurs, être évité par l'emploi de métal pur ou d'alliages sérieusement étudiés comme tous ceux que l'on trouve aujourd'hui couramment dans le commerce.

Propriétés chimiques de l'aluminium. — L'aluminium est attaqué par les solutions de potasse ou de soude (par suite de la solubilité des aluminates que forme l'alumine avec ces alcalis).

L'acide chlorhydrique dissout l'aluminium à froid.

Les acides sulfurique et azotique ne paraissent pas être attaqués à froid par l'aluminium : cela tient à ce qu'il se forme dès les premiers moments à la surface du métal une mince couche de bulles d'hydrogène avec l'acide sulfurique, ou d'azote et de bioxyde d'azote avec l'acide azotique, qui rendent

L'Aluminium et ses alliages.

très difficile le contact du métal avec le liquide. A la température de l'ébullition, l'attaque se fait mieux, parce que la vapeur d'eau entraîne ces bulles de gaz et les empêche d'intercepter le contact du métal avec le liquide (Troost).

Propriétés mécaniques de l'aluminium. — L'aluminium possède une grande résistance à la compression quand il est fondu. Laminé ou étiré, il présente une résistance très appréciable à la flexion. Il est également très ductile et très malléable. Il se forge et se lamine avec une grande facilité.

En revanche, sa résistance à la torsion est faible.

L'aluminium se polit aussi bien que l'acier, le cuivre ou le nickel.

Son élasticité et sa ténacité sont à peu près les mêmes que celles de l'argent.

L'aluminium se prête extrêmement bien au travail par emboutissage, surtout en le soumettant à plusieurs recuits.

L'aluminium est employé, avec avantage de poids, à la place de l'étain, du zinc, du cuivre dans beaucoup de leurs applications, à la place du fer et de la fonte dans certaines de leurs applications seulement; jamais à la place de l'acier, presque toujours à la place du bois qu'il remplace à poids égal et à résistance bien supérieure (Auscher).

NOTIONS DE MÉTALLURGIE DE L'ALUMINIUM.

Minerais d'aluminium. — Les minerais les plus employés dans la métallurgie de l'aluminium sont :

Guide du constructeur d'automobiles

1° la *cryolithe*, dont le principal gisement connu est à Evigtok (Groënland); c'est un fluorure double d'aluminium et de sodium : 6 Na F , $\text{Al}^3 \text{ F}^6$.

2° la *bauxite*, ou alumine hydratée $\text{Al}^2 \text{ O}^3, 2 \text{ H}^2 \text{ O}$, avec, comme impuretés, un peu de silice et d'oxyde de fer. Le gisement le plus célèbre (qui a donné son nom au minéral), est celui des « Baux » (Bouches-du-Rhône). On l'extrait également d'importants gisements existant aux Etats-Unis.

L'aluminium est préparé par une méthode électrolytique : le procédé le plus employé est le procédé Héroult, qui utilise l'alumine comme matière première.

Voici, d'après la théorie que M. Héroult lui-même a exposée au Congrès des Mines et de la Métallurgie, les réactions qui s'accomplissent dans la métallurgie de l'aluminium par le procédé Héroult.

M. Héroult a démontré que l'alumine est électrolysable en fondant par l'arc et en décomposant l'alumine par le courant.

Si, d'autre part, on fait l'électrolyse de la cryolithe seule, on obtient de l'aluminium, mais il n'apparaît pas de fluor. Le fluor s'est donc fixé pour former, avec le fluorure de sodium en excès (en excès par suite de la disparition de fluorure d'aluminium), un composé fixe à la température considérée. Ce composé peut-être mis en évidence en broyant la masse refroidie et en la faisant digérer dans l'eau : on obtient alors une partie insoluble ayant tous les caractères et la composition de la cryolithe et une partie soluble qui n'est autre chose que le fluorure acide d'aluminium. On constate, en revanche, un dégagement de vapeurs de sodium.

L'Aluminium et ses alliages.

L'électrolyse a donc pour effet de précipiter, sur la cathode, du sodium qui, s'il est à l'état liquide, réduit le fluorure d'aluminium. Dans ce cas, il n'apparaît que ce dernier métal. Si la température est plus haute, le sodium apparaît en vapeur et la réduction du fluorure d'aluminium n'a pas lieu. Le rôle de l'addition d'alumine dont nous parlerons plus loin s'explique ainsi très bien. En effet, d'une part, nous avons un composé liquide contenant du fluor en excès; d'autre part, de l'alumine et du charbon : il est évident que, si les chaleurs de formation de l'alumine et du fluorure sont comparables, nous aurons en faveur de la conversion de l'alumine en fluorure, ce fait que l'oxygène de l'alumine pourra brûler au contact de l'anode.

Préparation des matières premières dans le procédé Héroult. — « Un point important de cette fabrication est l'obtention des matières pures. En effet, de faibles quantités de silice donnent du silicium qui passe dans le métal dont il constitue la principale impureté. On évite cette silice en utilisant comme minéral, non pas la bauxite blanche d'apparence plus pure, quoique renfermant beaucoup de silice, mais la bauxite rouge, dont le fer est plus facile à éliminer.

« On utilise, en France notamment, deux procédés pour extraire l'alumine de la bauxite. Dans le procédé Péchiney, on fond la bauxite au four à réverbère avec du carbonate de soude et du charbon, puis on lessive, en ne poussant pas le lavage à fond : on enlève simplement l'aluminate de sodium en laissant la silice. On chauffe sous pression : la silice entraî-

Guide du constructeur d'automobiles

née est précipitée à l'état de silico-aluminate insoluble. On filtre et on précipite l'alumine par l'anhydride carbonique. On calcine le produit obtenu pour lui enlever ses propriétés hygroscopiques. Il renferme alors de 2 à 3 % de silice.

« Dans le procédé Bayer, l'aluminate obtenu est mélangé avec de l'alumine d'une opération précédente et maintenu en agitation constante : il se produit un entraînement et il se dépose de l'alumine cristallisée, tandis qu'il reste en solution un aluminate très basique $\text{Al}^2\text{O}^3, 6\text{Na}^2\text{O}$, qui peut être concentrée à 45 degrés Baumé dans un appareil à effet multiple et servir au lieu d'alcali pour l'attaque suivante. »

Appareils. — « L'appareil Héroult se compose d'une cuve en tôle d'acier solidement rivée (marmite), dont l'intérieur est brasqué au moyen d'un mélange de coke ou de graphite et de goudron. Cette brasque est tassée sur une épaisseur de 15 à 20 centimètres. Pour faire les parois, l'ouvrier peut, soit élever la pâte peu à peu le long des côtés, soit placer au centre de la cuve des pièces de bois ayant les dimensions de la partie interne du four. Il est facile alors de tasser la brasque autour. On ménage à hauteur du fond une ouverture pour la coulée du métal.

« Lorsque tout est fini, on retire les pièces de bois que l'on remplace par des briques et la cuve est portée dans un four à électrodes. On élève peu à peu la température que l'on porte au rouge blanc et on laisse refroidir lentement. L'opération dure quarante-huit heures.

« Les anodes sont fabriquées avec un soin tout par-

L'Aluminium et ses alliages.

ticulier. Elles participent, en effet, à la réaction, leur usure est considérable et les impuretés qu'elles renferment (fer, silice, etc.) se retrouvent dans l'aluminium. On emploie exclusivement le coke ou le charbon de bois et le goudron. En général, la tête de l'anode est serrée entre des pinces ou simplement à l'aide de plaques de fer. Elle est supportée par une potence et un dispositif spécial permet de l'élever ou de l'abaisser à volonté.

« Les bains sont montés en tension, au nombre d'une vingtaine ; ils demandent de 6 à 7 volts. »

Marche de l'opération. — « On place dans la cuve une certaine quantité du mélange d'alumine et de cryolithe et on détermine un court-circuit ; la cryolithe fond, on écarte peu à peu l'anode et on charge au fur et à mesure avec le mélange. Lorsque le bain a atteint la hauteur voulue, il suffit alors d'alimenter en alumine.

« Pour empêcher le refroidissement, au contact de l'air, de la surface du bain et pour éviter la combustion de l'anode au niveau du liquide, on recouvre le tout de charbon en poudre.

« Pour suivre l'opération, le plus simple est de mettre en dérivation avec le bain une lampe à faible voltage (9 à 10 volts).

« En marche normale, le filament est à peine rouge, la tension n'étant que de 6 à 7 volts. Mais, lorsque, par suite de la diminution de l'alumine, la résistance augmente et, par suite, la tension aux bornes, la lampe se met à briller de plus en plus. Comme il y a tout intérêt à ajouter au bain de l'alumine déjà chauffée, l'ouvrier, qui a à côté de lui sa provision pour la journée, en met une certaine quantité à la

surface du bain. Grâce à la couche de charbon, l'alumine s'échauffe peu à peu, mais sans être en contact avec le liquide. Lorsque le moment est venu d'en ajouter, l'ouvrier brasse la masse avec un ringard, l'alumine se dissout et le charbon non mouillé remonte à la surface. On le recouvre alors d'une nouvelle couche d'alumine. Un four bien conduit fonctionne sans arrêt de trois mois à un an.

« L'ouvrier doit également surveiller l'usure des anodes. Lorsque l'opération est régulièrement conduite, le charbon ne s'use que dans le bain si sa surface est bien couverte. Cette usure a lieu par suite de l'action de l'oxygène. Elle est donc proportionnelle à la quantité d'aluminium fabriqué, d'après la réaction :



c'est-à-dire que, pour une tonne d'aluminium, il faut compter 700 kilog. d'anode.

« Quant à la cathode, elle est formée par l'aluminium lui-même, fondu au bas de la cuve.

« La coulée du métal a lieu toutes les vingt-quatre heures pour les fours de petite dimension, toutes les douze heures et même toutes les deux heures pour les fours grand modèle.

« Le trou de coulée ménagé à la partie inférieure est fermé par un tampon de fer entouré de pâte à anode non cuite.

« Le métal coule : il est reçu dans une poche en fer. Il est très brillant. Lorsque tout le métal est recueilli, l'électrolyte apparaît transparent et plus rougeâtre.

L'Aluminium et ses alliages.

« Le métal obtenu est très pur : il renferme seulement des traces de fer et de silicium. (1)

ALLIAGES D'ALUMINIUM

L'aluminium est assez rarement employé à l'état pur. Il s'allie facilement avec la plupart des métaux et les alliages qu'il donne sont, le plus souvent, d'un emploi industriel plus facile que le métal lui-même, par suite des propriétés de ces alliages.

On peut les diviser, avec M. Minet, auteur de tant de travaux remarquables sur l'aluminium, en :

- 1°. — Alliages légers;
- 2°. — Alliages de densité moyenne;
- 3°. — Alliages lourds.

Nous allons passer en revue les plus employés parmi ces alliages.

1°. — **Alliages légers.** — On réunit dans cette catégorie les alliages dont la densité est voisine de celle de l'aluminium lui-même. On comprend donc parmi ces alliages légers l'aluminium du commerce, l'aluminium au cuivre, au nickel, etc., les alliages au plomb, au zinc, à l'étain, utilisés surtout pour la soudure de l'aluminium, le silicium-aluminium, et quelques alliages spéciaux, tels que le *partinium*, etc.

a) *Cuivre-Aluminium.* — Les alliages légers au cuivre-aluminium sont surtout employés à la fabri-

(1) André Brochet. *Electrochimie et électrometallurgie*. Paris, Dunod, 1902.

cation de tôles destinées à supporter de grands efforts. On comprend dans ce groupe les alliages contenant moins de 6 % de cuivre. De nombreux travaux ont été faits sur les propriétés de ces alliages. Nous ne pouvons pas entrer dans le détail de ces expériences, car cela nous entraînerait trop loin. Nous nous bornerons à reproduire quelques-uns des résultats obtenus par les expérimentateurs (1).

RÉSISTANCE DES TOLES EN ALUMINIUM A 6 % DE CUIVRE

Sens du laminage	Épaisseur des tôles	Limite élastiq.	Résistance	Along. $\frac{1}{100}$ sur 250 $\frac{1}{100}$
	millim.	kg	kg	
Longueur.....	2,75	22,0	25,0	3,7
Travers.....	2,75	23,0	26,0	3,0
Travers (recuit)	2,75	6,0	18,0	20,9

(Expérience de M. Yarrow.)

M. Charpentier Page a fait de nombreux essais sur la conductibilité électrique de ces alliages. Ces expériences ont montré que l'aluminium à 1 à 6 % de cuivre est assez mauvais conducteur, par rapport au cuivre (de 49,99 % du cuivre pour des fils de 2 millimètres de diamètre, en aluminium de 3 % de cuivre), à 43,44 % du cuivre (pour des fils en aluminium à 6 % de cuivre).

b) *Nickel-aluminium*. — D'après Tissier, un alliage à 3 % de nickel et 97 % d'aluminium se travaille

(1) Voir, notamment Ad. Minet, *L'Aluminium*, 2^e partie. Paris. Bernard Tignol, et P. Moissonier, *L'Aluminium*, Paris, Gauthier-Villars, 1903.

L'Aluminium et ses alliages.

aisément, mais il a une faible résistance à la rupture et un faible allongement.

Les expériences de M. Hunt, ingénieur-directeur de la Pittsburg C^o, ont montré que ces alliages sont parfaitement élastiques.

c) *Silicium-aluminium*. — Les alliages silicium-aluminium contenant de 1 à 12 % de silicium présentent une grande résistance. On obtient ainsi des alliages ayant 23 à 25 kilogrammes de résistance par centimètre carré, avec 10 % d'allongement. Mais ces alliages ont le grave défaut de s'altérer rapidement à l'air. En revanche, ils ont l'avantage de coûter moins cher que l'aluminium pur, le silicium étant précisément une des impuretés qu'il faut éliminer dans la métallurgie de l'aluminium.

d) *Partinium*. — Le partinium, créé par M. G. H. Partin, peut être forgé, étiré, laminé, réduit en feuilles, fils, etc. Il s'obtient de la façon suivante (A. Minet) :

On commence par produire un premier composé de 78 parties de cuivre, 20 parties d'étain, 2 parties d'arséniate de potasse.

L'alliage qui en résulte est pulvérisé et mélangé avec une partie de tungstène, 3 parties d'antimoine.

Ces trois métaux sont fondus ensemble à la façon ordinaire, après avoir été pulvérisés au préalable et mélangés soigneusement.

Ce mélange est ensuite placé dans un linge que l'on a auparavant enduit d'une couche de terre à four délayée dans de l'eau, de l'épaisseur d'un centimètre environ, afin d'empêcher la volatilisation et l'oxydation.

Le tout est ensuite mis dans un creuset brasqué et chauffé au rouge vif, pendant une demi-heure environ.

L'alliage est de nouveau pulvérisé et ajouté directement à l'aluminium en fusion dans la proportion de 4 à 10 %.

On peut supprimer le tungstène et l'antimoine et les remplacer par une charge égale de magnésium en poudre, quand on veut augmenter la ténacité du métal sans modifier son poids spécifique.

2°. — **Alliages de densité moyenne.** — Nous ne citerons ces alliages que pour mémoire, car ils ne sont employés que comme soudure en général ou comme réactif dans la métallurgie (alliage ferro-silicium-aluminium).

3°. — **Alliages lourds.** — Les alliages lourds d'aluminium sont les *bronzes et laitons d'aluminium*. Ils sont employés depuis longtemps, à cause de leurs qualités mécaniques. Ils sont susceptibles d'acquérir un très beau poli et offrent une grande résistance aux agents atmosphériques (Minet).

Les bronzes d'aluminium les plus employés renferment environ 3,5 %, 5 %, ou 10 % d'aluminium.

Le bronze d'aluminium à 10 % d'aluminium présente à poids égal 3 fois et demi plus de résistance à la traction que le cuivre.

Autres alliages d'aluminium. — M. Cothias a étudié la composition d'alliages spéciaux donnant avec un mode de moulage particulier d'excellents résultats.

La Société des *alliages Cothias* fabrique un certain

L'Aluminium et ses alliages.

nombre d'objets complètement finis de fonte, tels que des carters de moteurs, des plaques d'avance à l'allumage, des pièces de pompes, des carburateurs, etc.

Ces résultats sont obtenus au moyen de moules métalliques très bien étudiés dans lesquels on coule des alliages spéciaux composés de cuivre, étain, zinc, aluminium, plomb, et en petite quantité de phosphures de métaux rares, tels que le tungstène, le titane, le manganèse, etc.

La densité de ces compositions varie de 5,4 à 7,4 et leur résistance à la traction est de 12 à 25 ou 30 kg. par millimètre carré de section. Si l'on considère que le cuivre jaune ou laiton n'a que 11 kg. et le bronze 24, on voit que ces alliages, dont le prix de revient est environ moitié moindre, présentent un réel intérêt.

Pour les pièces légères et résistantes à la fois on emploie les proportions suivantes :

Aluminium	400
Cuivre	40
Étain	200
Zinc	360

Pour les pièces ordinaires remplaçant le laiton et la fonte :

Cuivre	160
Étain	50
Zinc	750
Plomb	40

Enfin pour celles qui demandent une grande légèreté et beaucoup de résistance :

Aluminium	880
Cuivre	40
Étain	80

Ce dernier alliage se travaille sans encrasser les

Guide du constructeur d'automobiles

outils et peut se souder à l'étain. Il y a du reste dans la fabrication des tours de mains qui assurent une composition très homogène, tel, par exemple, que l'addition de 1 0/0 de chlorhydrate d'ammoniaque et d'une petite quantité de phosphures métalliques destinés à donner de la fluidité.

TROISIÈME PARTIE

CHAPITRE PREMIER

Essais mécaniques.

Ainsi que nous avons eu déjà l'occasion de le dire, avant d'être employés à la construction des organes d'une voiture automobile, les métaux doivent être soumis à divers essais permettant d'en contrôler la bonne qualité. Nous allons passer en revue les méthodes donnant les indications les plus précises, méthodes mises en pratique, pour cette raison, par toutes les usines soucieuses de ne livrer à leur clientèle que des voitures de construction irréprochable.

Les essais pratiqués généralement aujourd'hui sont de trois sortes :

1° Les *essais mécaniques*, dont l'importance est évidente : il est, en effet, logique de soumettre à de tels essais les métaux qui vont être employés à la fabrication de pièces ayant à supporter des efforts mécaniques. Ces essais visent précisément à placer les métaux essayés dans des conditions analogues à celles dans lesquelles se trouveront placées les pièces fabriquées avec ces métaux.

Nous étudierons les méthodes d'essais mécaniques au cours de ce chapitre.

2° Les *essais chimiques* permettant de vérifier si tel ou tel métal présente le degré de pureté requis, si la teneur en éléments utiles est convenable, et si, en revanche, celle en éléments nuisibles est inférieure au maximum qui peut être toléré pour le métal et pour l'usage considérés.

Les principales méthodes d'analyse chimique des métaux employés dans la construction des automobiles feront l'objet du chapitre II.

3° Les *essais micrographiques*. Nous verrons au chapitre III que la métallographie microscopique constitue aujourd'hui une méthode d'essai donnant avec une grande facilité des indications nettes et précises sur les propriétés des métaux.

Nous commencerons l'étude des méthodes d'essais par les essais mécaniques.

Généralités sur les essais mécaniques. — Les essais mécaniques auxquels sont soumis le plus souvent les métaux employés dans la construction mécanique sont les suivants :

- Essais à la traction ;
- Essais au choc ;
- Essais de dureté ;
- Essais de flexion ;
- Essais de pliage ;
- Essais à la compression.

Dans quelques cas particuliers, on pratique aussi des essais à la torsion, des essais de façonnage à froid, des essais d'élargissement au mandrin, des essais d'aplatissement et d'écrasement, des essais d'emboutissage (pour les tôles), etc.

Essais mécaniques.

Les plus employées parmi ces méthodes d'essais mécaniques sont les quatre premières.

L'essai à la traction, considéré pendant longtemps comme la meilleure méthode et la plus sûre, tend à être abandonné aujourd'hui; les indications que donne cet essai ne sont pas suffisantes; la preuve en est dans le grand nombre d'autres essais (allongement, pliage, essai au choc, etc., etc.), que les cahiers des charges imposent à côté des essais de traction. La multiplicité et la rigueur de ces autres essais sont un indice qu'aucun d'eux ne peut donner d'indications correctes et qu'ils ne sont là que pour aider l'appréciation du contrôleur (M. Guillery).

Quelles sont donc les conditions que doit remplir une méthode d'essais mécaniques pour donner des bonnes indications?

D'après M. Guillery, pour qu'un essai soit bon, il doit réunir trois conditions :

1° Donner des indications précises sur les qualités du métal;

2° Chiffrer indiscutablement ces indications sans rien laisser à l'appréciation de l'expérimentateur;

3° L'essai, ou mieux l'ensemble des épreuves, doit être d'un emploi commode, rapide, sûr et peu coûteux.

Les deux premières conditions définissent les méthodes.

La troisième reste à l'appréciation du constructeur ou du contrôleur; c'est le choix d'une méthode (1).

(1) Guillery, *Note sur une nouvelle méthode d'essais mécaniques des métaux*, *Revue de Métallurgie*, août 1904, p. 405.

Guide du constructeur d'automobiles

M. Guillery préconise un ensemble d'épreuves simples, paraissant réunir tous les desiderata.

Il résulte de ses expériences que deux caractéristiques sont nécessaires et presque toujours suffisantes dans les métaux usuels ; ce sont la *dureté* et la *fragilité*.

La *limite élastique* (voir plus loin) reste pour certains cas assez intéressante, plus particulièrement pour les aciers spéciaux.

Les appareils présentés par M. Guillery pour la mise en pratique de sa méthode d'essai sont basés :

1° Pour la *résistance*, sur la pénétration de billes soumises à une pression constante (procédé indiqué par M. Brinell) ;

2° Pour la *limite élastique*, sur l'écrasement d'un solide poli (procédé indiqué par M. Frémont) ;

3° Pour la *fragilité*, sur la flexion par choc sur barreaux entaillés.

Nous étudierons plus loin ces divers appareils.

Malgré les défauts qu'il présente, et malgré l'insuffisance des indications qu'il donne, l'*essai de traction* continue à être employé dans beaucoup d'usines ; il est donc intéressant d'en dire quelques mots et c'est par lui que nous commencerons l'étude des méthodes d'essais mécaniques.

*
* *

Essais de traction

Avant d'exposer la pratique des essais à la traction et de décrire les machines employées, il convient de définir certaines expressions couramment employées :

Définitions. — Les essais à la traction permettent de déterminer la charge de rupture, la limite élastique, l'allongement total pour cent et la striction.

1° *Charge de rupture.* — La charge de rupture désignée généralement par la lettre R, est la charge maximum que le métal peut supporter avant de se rompre. Cette charge est rapportée au millimètre carré de la section primitive de l'éprouvette.

2° *Limite élastique.* — La limite élastique E est la charge maxima exprimée en kilogrammes par millimètre carré de la section primitive que peut supporter l'éprouvette du métal avant d'éprouver de déformation permanente ;

3° *Allongement total pour cent.* — Les allongements totaux pour cent, A 0/0, sont les allongements éprouvés par l'éprouvette après rupture et rapportés à 100 millimètres de longueur primitive (M. L. Guillet).

4° *Striction.* — Ainsi que nous allons le montrer, avant de se rompre, une éprouvette soumise à l'essai de traction présente en un point une réduction de diamètre, un étranglement qui atteint sa valeur maximum au moment de la rupture. Si S est la section primitive de l'éprouvette et s la section de rupture, la *striction* Σ est définie par l'expression :

$$\Sigma = \frac{S - s}{S}$$

Lorsque l'on soumet une éprouvette à l'essai de traction, sa longueur augmente ; si on abandonne l'éprouvette à elle-même, elle revient à sa longueur

primitive ; mais il arrive un moment où la déformation devient permanente, où l'éprouvette (si on cesse de la soumettre à l'effort de traction) ne revient pas à sa longueur primitive : la *limite élastique* est alors dépassée.

Éprouvettes d'essai. — Les barreaux de métal servant à faire des essais de traction sont désignés sous le nom d'*éprouvettes*.

On leur donne le plus souvent la forme d'une barre cylindrique, avec deux têtes cylindriques ou coniques ; parfois les têtes sont reliées au corps proprement dit de l'éprouvette par des portées destinées à centrer l'éprouvette dans les attaches de la machine d'essai (L. Gages).

La figure 40 représente des éprouvettes pour essais à la traction.

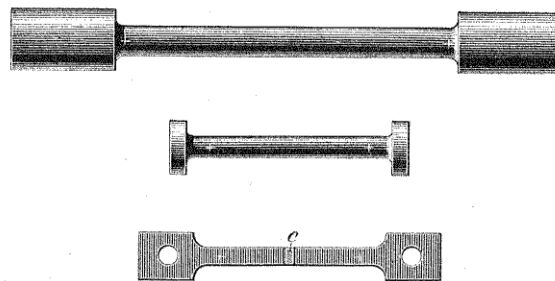


Fig. 40. — Éprouvettes pour essais à la traction.

Les deux éprouvettes du haut de la figure ont la forme adoptée le plus souvent ; elles ont une section cylindrique.

La figure inférieure montre une éprouvette pour

l'essai des tôles ; pour cela, on découpe dans la tôle une éprouvette ayant l'épaisseur même de la tôle et une largeur déterminée ; les têtes sont, comme le montre la figure, généralement percées d'un trou, pour le passage du boulon au moyen duquel s'exerce l'effort de traction dans la machine à essayer (voir figure 42).

Au moyen de deux coups de pointeau, on détermine sur l'éprouvette la longueur utile à laquelle seront rapportées les différentes caractéristiques fournies par la machine. Ces coups de pointeau sont représentés par de petites croix blanches sur les éprouvettes de la figure 40.

Mode d'attache des éprouvettes sur la machine. — Le mode d'attache des éprouvettes aux organes de

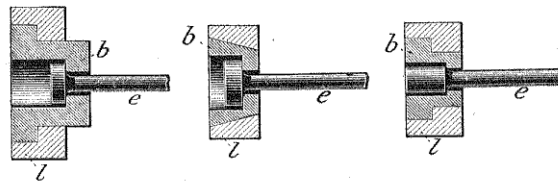


Fig. 41. — Mode d'attache des éprouvettes ordinaires à tête cylindrique (d'après Gages).

serrage de la machine d'essai, varie suivant les machines ; la figure 41 en montre plusieurs variantes pour les éprouvettes ordinaires à tête cylindrique.

Dans ces trois systèmes, *e* est l'éprouvette essayée, *b* est une bague ou coquille en deux pièces ; *l* est une lanterne solidaire des attaches de la machine d'essai.

La bague *b* forme parfois extérieurement, une vis à filets carrés que l'on introduit dans un écrou constitué par les attaches mêmes de la machine.

La figure 42 montre le mode d'attache des éprouvettes pour essai de tôles : *e* est l'éprouvette décou-

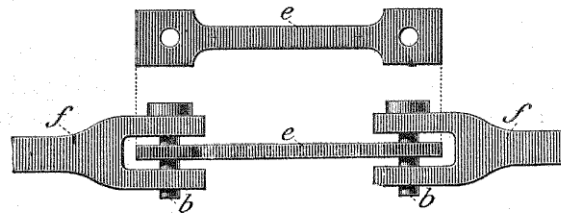


Fig. 42. — Mode d'attache des éprouvettes pour tôles.

pée dans une feuille de tôle ; *ff* sont des fourchettes reliées à la machine d'essai ; *bb* sont des boulons de fixation, traversant à la fois les fourchettes *f* et les trous des têtes de l'éprouvette *e*.

Quel que soit le mode d'attache adopté, il doit permettre à l'éprouvette de s'orienter toujours librement dans la direction de l'effort de traction, sous peine de faire intervenir des efforts de flexion ou autres, faussant évidemment les résultats de l'essai qu'on a en vue.

L'utilisation d'une sorte de suspension à la Cardan, constituée par l'ensemble des attaches de l'éprouvette et des pièces les reliant aux leviers de la machine, paraît, *a priori*, très avantageuse ; mais un tel dispositif, assez compliqué d'ailleurs, se rencontre rarement.

On préfère, en général, remédier à l'inconvénient précité, en donnant à l'éprouvette un jeu convenable

Essais mécaniques.

dans ses attaches, en vue de la laisser *s'orienter à la demande* de l'effort de traction (1).

Machines employées dans les essais à la traction. — Il existe deux types principaux de machines pour les essais de traction ; ce sont :

- 1° Les machines à leviers ou machines romaines ;
- 2° Les machines à manomètre, dites parfois machines à mercure.

Nous décrirons quelques exemples de machines de chacun de ces deux types.

1° Machines à leviers. — Il était naturel, dit M. L. Gages (2), de penser à utiliser les engins habituels de pesage, pour *peser* l'effort exercé sur le barreau d'épreuve ; de là, l'emploi des machines à leviers des types les plus divers.

On pèse, en général, par l'un des deux moyens suivants, savoir :

Ou bien l'on ajoute en quantité variable, sur un plateau approprié, des poids dont la position est constante par rapport aux leviers ;

Ou bien, l'on fait mouvoir des poids constants sur un ou plusieurs leviers, en faisant occuper à ces poids des positions variables, suivant le principe de la romaine.

Machine à levier simple, à plateau. — La machine la plus simple est constituée par un grand levier

(1) L. Gages. *Essai des métaux. Machines et appareils*, Paris, Gauthier-Villars.

(2) L. Gages, *loc. cit.*, p. 26.


Guide du constructeur d'automobiles

pivotant autour d'un axe situé à l'une de ses extrémités et portant, à l'autre extrémité, un plateau sur lequel on place des poids. L'éprouvette à essayer est prise entre deux mâchoires reliées, l'une à un point fixe, l'autre à un point du levier situé à une faible distance de l'axe, entre cet axe et le plateau.

Pour faire l'essai, il suffit de placer sur le plateau, un à un, des poids de 20 à 50 kilogrammes jusqu'à rupture de l'éprouvette. On doit prendre la précaution de maintenir le levier horizontal pendant toute la durée de l'essai; pour cela il suffit d'abaisser l'axe autour duquel pivote le levier au moyen d'un volant de manœuvre *ad hoc*.

Une telle machine a l'avantage d'être robuste, très simple et indérégable. En revanche, l'effort auquel se trouve soumise l'éprouvette ne s'exerce pas de façon continue, comme il convient, puisqu'il varie brusquement, à chaque addition d'un nouveau poids sur le plateau.

Machines romaines simples. — La machine imaginée par l'ingénieur anglais Kirkaldy est une des plus connues parmi les machines romaines simples. Elle comporte un levier coudé à un des bras duquel est reliée une des attaches de l'éprouvette (l'autre attache étant réunie à un point fixe); l'autre bras du levier coudé est relié à une romaine simple sur laquelle on fait courir le poids mobile. Le levier de la romaine porte des graduations; on peut donc (en lisant la graduation sur laquelle était arrivé le poids mobile, au moment de la rupture de l'éprouvette), déterminer le rapport des bras de levier de la romaine et, par suite, calculer la charge de rupture.

Si l'on accélère un peu trop le mouvement de glissement du poids constant lorsqu'on approche de la rupture de l'éprouvette, on s'expose à obtenir un nombre trop fort pour la valeur de la résistance à la rupture que l'on veut déterminer (L. Gages, *loc. cit.*). 

Machines romaines à leviers multiples. — Ces machines sont très employées ;

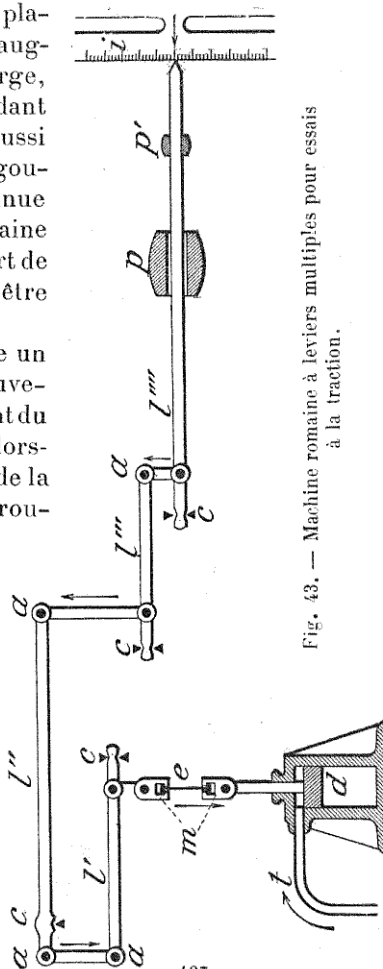


Fig. 43. — Machine romaine à leviers multiples pour essais à la traction.

elles permettent de soumettre l'éprouvette essayée à des efforts considérables.

La figure 45 représente schématiquement une de ces machines. Elle est formée d'un certain nombre de leviers l' , l'' , l''' , l'''' reliés les uns aux autres par des articulations a et prenant appui sur des couteaux c .

L'éprouvette figurée en e est saisie par ses deux têtes entre les mâchoires m . L'une de ces mâchoires (la mâchoire inférieure) est reliée au piston d d'un corps de pompe dont la face supérieure reçoit de l'eau envoyée par un compresseur et amenée par le tuyau t . L'autre mâchoire est reliée à un point du levier l' (1), p est le poids mobile le long du levier l'''' ; p' est un poids additionnel, également mobile, i est un index.

Voici quel est le fonctionnement de la machine, d'après M. L. Gages (*loc. cit.*)

L'eau envoyée par le compresseur agit sur le piston d de haut en bas, en exerçant sur l'éprouvette e un effort de traction qui croît d'une manière continue. L'extrémité du dernier levier l'''' disposé comme une romaine tendant à se soulever en raison de l'effort transmis par le barreau d'essai, l'opérateur fait glisser le poids principal p ou le poids additionnel p' de manière à maintenir constamment horizontal le levier l'''' , ce qu'on constate en observant le déplacement de l'extrémité de ce levier, par rapport à l'index i , marqué sur la règle graduée placée à proximité.

(1) Par suite d'une erreur de dessin, la barre réunissant la mâchoire supérieure au levier l' est figurée par un simple trait.

Essais mécaniques.

Les poids p et p' étant déplacés à la main, il est nécessaire que l'opérateur soit bien exercé, surtout pour déterminer la limite élastique.

Les rapports des bras de leviers successifs dans la romaine à leviers multiples dite *machine des chemins de fer*, sont les suivants :

$\frac{1}{5}, \frac{1}{10}, \frac{1}{4}, \frac{1}{8}$.

Il en résulte que la valeur de l'effort exercé sur l'éprouvette peut être égale à 1,600 fois celle de p .

Dans certains modèles de machines pour essais de traction, il existe une combinaison du système à plateau et de la romaine ; le système à plateau sert pour la mesure de grandes charges, tandis que la romaine n'est utilisée que pour les petites divisions de la charge.

2° Machines à manomètre ou machines à mercure. — Les systèmes à leviers sont relativement simples, mais ne sont pas dépourvus d'inconvénients ; aussi a-t-on cherché à éviter les défauts des leviers en en diminuant le nombre ou même en les supprimant ; « l'emploi de la presse hydraulique, permettant d'exercer un effort considérable avec une course limitée, est tout indiqué dans ce but.

« Pour transformer la compression réalisée par la presse en traction, deux agencements sont utilisés :

« Ou bien le piston se prolonge par une tige de plus faible diamètre passant par le fond du pot de presse ;

« Ou bien, la tête du piston se termine par un sommier où sont fixées deux ou quatre bielles qui entourent le pot de presse et se réunissent sur un second sommier.

« Les machines d'essais à presse hydraulique les plus répandues présentent la première de ces dispositions ; telles sont les machines Thomasset et Maillard, que nous allons décrire. » (L. Gages, *loc. cit.*)

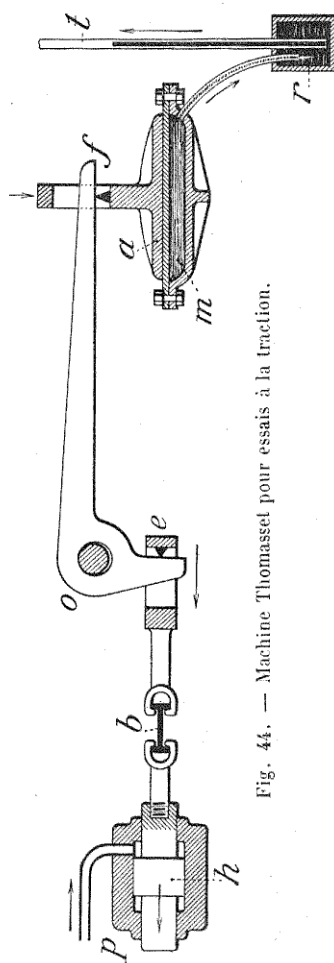


Fig. 44. — Machine Thomasset pour essais à la traction.

Machine Thomasset. — La figure 44 représente cette machine schématiquement. Elle est construite de la façon suivante :

p est un corps de pompe dans lequel se déplace un piston *h* dont la tige porte, à droite, une des mâchoires servant à saisir l'une des têtes de l'éprouvette *b* soumise à l'essai. L'autre mâchoire fait corps avec une sorte d'étrier prenant appui (par un couteau que montre la figure) sur le levier coudé *e o f*. Ce levier pivote

Essais mécaniques.

autour de l'axe-couteau o qui fait partie du bâti de la machine. L'extrémité du bras le plus long de ce levier coudé (à droite sur la figure) vient appuyer sur un couteau f , fixé sur la tige verticale qui surmonte le plateau a d'un appareil dit *multiplificateur*. Ce plateau a repose sur une large membrane de caoutchouc qui ferme le multiplicateur à la partie supérieure. La cuvette m de cet appareil est pleine d'eau et communique avec le réservoir r plein de mercure d'un manomètre à air libre t .

Le fonctionnement de la machine est facile à comprendre : la pression de l'eau agissant sur le piston h exerce sur l'éprouvette b l'effort de traction. Cet effort est transmis par l'étrier e au levier coudé eof , lequel, à son tour, le transmet par le couteau f au plateau a , dans un rapport donné. A son tour le plateau a , par l'intermédiaire de la membrane de caoutchouc, communique la pression de l'eau qui remplit la cuvette m du multiplicateur au réservoir r ; le manomètre t donne l'indication de la pression.

On en déduit aisément l'effort supporté par l'éprouvette.

En effet, si P est l'effort supporté par l'éprouvette, k le rapport des deux bras du levier coudé, p la pression exercée sur le plateau du multiplicateur, p' la pression par unité de surface dans la cuvette et S la surface du multiplicateur, on a :

$$P = \frac{of}{oe} \cdot p = kp = kp' S.$$

La hauteur n du mercure dans le tube t déter-

Guide du constructeur d'automobiles

mine la valeur de la pression p' ; si n est exprimé en décimètres, on a :

$$p' = n \times 13^{\text{ks}},6$$

par décimètre carré, et l'effort supporté par l'éprouvette est, en kilogrammes :

$$P = n (k S \times 13,6),$$

S étant exprimé en décimètres carrés.

« Les déplacements du plateau multiplicateur ou de l'extrémité f du levier coudé seront égaux aux déplacements du niveau du mercure dans le tube, divisés par le rapport de la surface S à la section du tube et, par conséquent, très petits, à la condition que la cuvette, le manomètre et le tube de communication soient bien remplis de liquide purgé d'air. »

Voici quels sont, d'après M. Gages, les *avantages et les inconvénients de cette machine* : L'avantage de l'emploi de cette machine est l'automaticité, en ce sens que l'appareil manométrique fait équilibre à chaque instant à l'effort supporté par l'éprouvette, sans l'intervention d'un opérateur. Ce n'est pas que l'opérateur ne doive pas apporter une très grande attention à l'essai, car les indications du manomètre sont fugitives et ne laissent aucune trace, notamment au moment de la rupture du barreau.

Son principal inconvénient consiste dans l'incertitude de l'évaluation de l'effort. La hauteur du mercure peut être mesurée exactement sans doute, mais la section du plateau, ou de la surface pressante, ne peut pas l'être, parce qu'on ignore quelle est l'importance de la section annulaire qui est intéressée par la pression. D'ailleurs, cette section peut

varier dans le cours d'une même expérience, suivant la pression qui déforme le caoutchouc.

Nous ajouterons, à titre de renseignement, que, dans la plupart des machines de ce modèle, le rapport de la surface de la membrane à celle du tube manométrique est de 3,000.

Dans ces conditions, étant donnée la légère incertitude qu'on vient de signaler concernant l'effort supporté par l'éprouvette en fonction de la pression manométrique, on adjoint quelquefois à l'appareil un dispositif qui permet de vérifier ses indications, au moyen d'un poids comprimant le plateau, soit directement, soit par l'intermédiaire de leviers.

Machine du colonel Maillard. — Dans cette machine, que la figure 45 montre en coupe verticale et en plan, il n'y a pas de leviers ; aucun dispositif de multiplication des efforts n'est prévu.

Nous en donnerons la description d'après l'ouvrage déjà cité de M. Gages.

Les deux têtes de l'éprouvette *b* sont saisies entre des mâchoires placées à l'extrémité des tiges des deux pistons *h* et *k*. Le premier supporte la pression de l'eau introduite dans le corps de pompe *p* et exerce l'effort de traction sur l'éprouvette *b* qui transmet cet effort au piston *k*. Ce dernier comprime alors le liquide placé dans son corps de pompe *p'*, soit directement, soit en pressant sur une feuille obturatrice de caoutchouc, et le refoule sur le piston du manomètre multiplicateur *m* système Galy-Cazalat.

Le piston métallique de ce manomètre est formé de deux cylindres raccordés par un tronc de cône,

les surfaces terminales de ces cylindres prenant appui sur des feuilles obstructives.

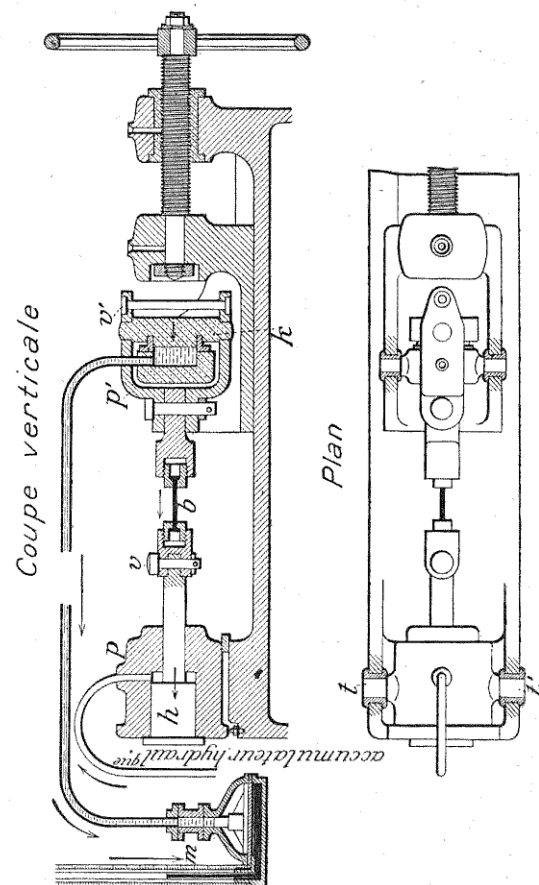


Fig. 43. — Machine du Colonel Maillard.

Une sorte de suspension à la Cardan est destinée à

assurer la traction du barreau d'épreuve exactement suivant son axe. A cet effet, les corps de pompe sont supportés par des tourillons horizontaux $t\ t'$ (voir le plan fig. 45) et les mâchoires par des tourillons verticaux $v\ v'$. L'ensemble peut donc théoriquement se déplacer de manière à permettre à chaque tête de l'éprouvette de prendre une position quelconque dans l'espace.

Dès que l'action du piston h commence à s'exercer, les deux têtes se placent naturellement, de manière que l'effort se produise suivant l'axe de l'éprouvette : les tractions ou compressions s'exercent suivant le sens des flèches de la figure 45.

Dans les machines Maillard, telles qu'elles sont construites généralement aujourd'hui, les pistons ont été disposés de manière à tourner librement autour de l'axe, en vue d'empêcher toute torsion du barreau.

Les mâchoires ont été organisées pour pouvoir mettre l'éprouvette en place très rapidement.

Le corps de pompe a été aménagé de telle sorte qu'il soit possible de rapprocher rapidement et automatiquement les mâchoires après la rupture d'un barreau.

Pour éviter les coups de bélier qui se produiraient, au moment de la rupture de l'éprouvette, dans le tuyau qui relie le deuxième corps de pompe au manomètre, on a constitué ce tuyau en plusieurs parties articulées.

Enfin, on a eu l'idée de rendre la machine reversible en donnant aux deux corps de pompe la même organisation, soit celle du premier corps de pompe p . De plus, les joints ont été l'objet de dispositifs

Guide du constructeur d'automobiles

particuliers : ils doivent, en effet, être constitués avec le plus grand soin en vue d'assurer à la machine un fonctionnement régulier.

En conservant les mêmes notations que pour la machine Thomasset, on a, pour les conditions d'équilibre de la machine Maillard :

$$p'S = n \times 13^{ks,6} \times S;$$

La pression exercée sur la petite base s de ce piston est la même, soit :

$$ps = p'S = n \times 13^{ks,6} \times S,$$

ou, par unité de surface :

$$p = p' \frac{S}{s} = n \times 13^{ks,6} \times \frac{S}{s}.$$

La pression p est transmise au liquide du deuxième corps de pompe, et l'équation générale d'équilibre est :

$$P = pS_1 = p' \times \frac{SS_1}{s} = n \left(13^{ks,6} = \frac{SS_1}{s} \right),$$

P étant l'effort supporté par l'éprouvette et S_1 la surface du piston du deuxième corps de pompe sur lequel s'exerce la pression p .

La section S de la cuvette des réservoirs étant beaucoup plus grande que celle du tube du manomètre, les déplacements du piston tronconique seront très petits; ceux du piston du deuxième corps de pompe seront encore plus faibles, car S_1 est plus grand que s .

Ces conditions étant remplies, les feuilles obtura-

trices de caoutchouc fonctionneront d'une manière très satisfaisante.

Les *avantages et les inconvénients* de cette machine sont les mêmes que ceux de la machine Thomasset, sauf ceux inhérents à l'emploi des leviers (1).

Mesure des charges de rupture et des limites élastiques. — Dans les machines à leviers ou machines romaines, la *charge de rupture totale* R_t correspond à la charge indiquée par le curseur ou poids mobile au moment de la rupture de l'éprouvette; la *limite élastique totale* E_t est indiquée par une baisse subite du levier, qui se relève ensuite.

On a donc, si S est la section primitive de l'éprouvette, pour la charge de rupture R :

$$R = \frac{R_t}{S},$$

et pour la limite élastique E :

$$E = \frac{E_t}{S}.$$

Dans les machines à manomètre, la charge de rupture totale R_t est indiquée par la hauteur maxima à laquelle s'élève le mercure dans le tube du manomètre, maximum qui est atteint au moment de la rupture; la limite élastique totale est marquée par un arrêt plus ou moins net dans la montée de la colonne de mercure.

(1) L. Gages, *loc. cit.*

Guide du constructeur d'automobiles

Mesure de l'allongement total pour cent. — Cette mesure est indépendante de la machine employée pour l'essai. Il suffit de rapprocher les deux extrémités de l'éprouvette et de mesurer au compas la distance qui sépare les deux coups de pointeau donnés avant l'essai et placés à une distance connue l'un de l'autre.

Mesure de la striction. — De même que la précédente, cette mesure se fait indépendamment de la machine d'essai : il n'y a qu'à mesurer au palmer la



Fig. 46. — Epreuve montrant l'étranglement précédant la rupture, et éprouvette après rupture.

section minima que présente l'éprouvette après rupture (fig. 46) et appliquer ensuite la formule définissant la striction.

Appareils enregistreurs. — La plupart des machines d'essai à la traction sont aujourd'hui munies d'appareils enregistreurs inscrivant la courbe de traction, établies le plus souvent en portant en abscisses les allongements et en ordonnées les efforts.

La charge de rupture totale est donnée par l'ordonnée la plus grande.

Méthode de M. Frémont pour la mesure rigoureuse de la limite élastique. — La limite élastique totale adoptée le plus souvent est la charge correspondant au moment où les allongements ne sont plus proportionnels aux charges. Lorsque la machine d'essai est munie d'un appareil enregistreur, la limite élastique totale est donnée par le point où la courbe de traction qui commence par être une droite (*période d'élasticité* ou *période élastique*, pendant laquelle les déformations de l'éprouvette sont réversibles) devient une courbe. Ce point est souvent très net, comme dans les aciers à palier; mais il arrive fréquemment que cette délimitation n'est pas bien visible; la limite élastique est donc souvent difficile à déterminer par les méthodes ordinaires.

C'est pour remédier à ce grave inconvénient que M. Frémont a cherché une méthode permettant de définir d'une façon suffisamment précise la limite élastique. Nous allons en indiquer le principe :

Supposons que nous exercions un effort à la traction sur une éprouvette présentant deux troncs de cône se raccordant par leurs sommets. Il est bien évident que, à moins de défaut, la rupture aura lieu à la plus petite section. Mais comme l'éprouvette a la forme d'un tronc de cône, les sections voisines auront pu supporter un effort supérieur à la limite élastique du métal, et l'on conçoit aisément qu'il y ait une section de l'éprouvette pour laquelle l'effort subi ait juste atteint la limite élastique.

Nous aurons, d'un côté de cette section, un métal dont la limite élastique a été dépassée, de l'autre côté un métal qui n'a pas subi de déformation permanente.

Guide du constructeur d'automobiles

Si on opère sur une éprouvette parfaitement polie (et ce poli s'obtient par les mêmes méthodes que celles employées en métallographie microscopique), toute la partie dont la limite élastique aura été dépassée, sera dépolie ; l'autre, au contraire, aura conservé tout son brillant.

Il suffira d'examiner l'éprouvette au microscope pour déterminer la section qui est sur la limite ; on en mesurera le diamètre ; on en déduira la surface S . Connaissant l'effort R auquel aura été soumise l'éprouvette, la limite élastique est définie par l'équation :

$$E = \frac{R}{S}.$$

Il arrive souvent que le passage de la partie dépolie à celle polie est extrêmement net. Dans ce cas, il n'y a aucune hésitation : la limite élastique est définie d'une façon précise.

Mais il existe souvent une zone de passage très difficile à définir. Toutefois, le microscope, avec des grossissements forts et un polissage assez parfait, permet d'effectuer ces déterminations avec une précision qui ne saurait être comparée aux méthodes ordinairement utilisées (1).

Méthode de M. Guillery pour la détermination de la limite élastique. — Dans le numéro de juin 1906 de la *Revue de Métallurgie*, M. Guillery a exposé une nouvelle méthode de mesure de la limite élastique des métaux.

(1) L. Guillet, *Etude théorique des alliages métalliques*, Paris, Dunod, 1904.

Essais mécaniques.

Cette méthode a pour but d'enregistrer graphiquement, pendant l'essai de traction, par un procédé électrique, les variations de la résistance électrique de la barrette.

Un courant de quelques volts, avec une intensité de 25 à 30 ampères par centimètre carré de section de l'éprouvette, traverse celle-ci et une résistance de compensation.

L'éprouvette est prise dans des mâchoires rapportées, isolées par des plaques d'ébonite ou de fibre. Une dérivation prise par soudures ou bons contacts aux têtes de l'éprouvette, est envoyée à un galvanomètre balistique de Carpentier. Une autre dérivation prise sur la résistance de compensation, est envoyée en sens inverse, dans le galvanomètre, et comme cette dernière est réglable, on peut annuler la déviation due à la première et mettre ainsi, au début de l'expérience, le rayon réfléchi du miroir du galvanomètre en équilibre et à zéro.

On fait alors l'essai, et les déviations du galvanomètre accusent les variations de résistance électrique de l'éprouvette.

On enregistre les déviations du galvanomètre soit par photographie, au moyen du rayon lumineux réfléchi par le miroir du galvanomètre, soit en recevant ce rayon sur du papier ou de la toile à calquer disposés contre une feuille de verre; l'opérateur suit, par transparence, le rayon lumineux du galvanomètre, à l'aide d'un curseur à vis, sur lequel est fixé le crayon ou la plume (2).

(2) Voir l'article cité, pour plus de détails, et pour des exemples de diagrammes enregistrés.

Guide du constructeur d'automobiles

Lorsque l'éprouvette commence à s'allonger, il se produit une diminution de section sans qu'il y ait commencement de striction; il en résulte une augmentation de résistance qu'enregistre l'appareil.

Avec une sensibilité convenable, on peut obtenir des déviations sensibles du galvanomètre pour des allongements infiniment petits. Aussi cette méthode permet-elle d'analyser la déformation élastique avec une précision qu'il serait difficile d'obtenir par la mesure directe des allongements, mesure inévitablement faussée par la multiplication des erreurs relatives.

M. Guillery a établi l'équation donnant la corrélation entre le diagramme enregistré par cette méthode et les diverses phases de l'essai. Ces équations permettent de déterminer de la façon la plus exacte les allongements et les limites élastiques.

* *

Essais au choc

Les essais au choc ont pour but de mettre en évidence la *fragilité* du métal examiné. Ils mettent en jeu la qualité spéciale de résistance qui est l'inverse de la fragilité et que l'on désigne communément sous le nom de *ténacité*.

Ces essais jouent aujourd'hui un très grand rôle dans les épreuves auxquelles on soumet un métal destiné à la fabrication de pièces mécaniques.

La caractéristique *allongement* qui figure dans tous les cahiers des charges, écrit M. Guillery (1), n'a

(1) *Revue de métallurgie*, n° 8, août 1904.

plus qu'un intérêt secondaire, si l'on est fixé sur la fragilité, attendu qu'en cas de rupture accidentelle d'une pièce, on n'observe jamais une déformation comparable à celle dont serait susceptible le plus mauvais de tous les métaux au point de vue de l'allongement ; la rupture a toujours lieu, soit par fragilité, soit parce que la limite élastique a été dépassée dans des déformations alternatives.

La justification de l'importance qu'on lui a attribuée est qu'en effet, un métal qui a un mauvais allongement est toujours fragile, par suite, à refuser. Mais, en s'en tenant là, on est exposé à laisser passer comme bons les métaux qui, ayant un bon allongement, sont cependant très fragiles, et par suite, d'un emploi éminemment dangereux.

Maintenant qu'on sait mesurer la fragilité, il convient donc d'abandonner l'essai de traction. Cet abandon est d'autant plus nécessaire qu'en attribuant une importance par trop exclusive à cette notion, on a été conduit souvent à des pratiques néfastes, telles que les recuits prolongés à haute température.

La limite élastique n'a qu'une importance secondaire quand on connaît la résistance du métal, parce que pour les aciers au carbone, la limite élastique est, à peu de chose près, une fonction connue de la résistance. On se borne à mesurer la résistance, ce qui est plus facile.

Mais, quand il s'agit de constructions délicates dans lesquelles on emploie des métaux spéciaux (1), il n'en est plus du tout ainsi et on peut arriver à

(1) Et c'est le cas pour la construction automobile

réaliser des métaux très peu fragiles quoique donnant lieu fréquemment à des ruptures, parce que leur limite élastique est très basse et conséquemment dépassée, surtout dans le cas des efforts alternatifs.

On peut donc affirmer, en résumé, que, dans tous les cas, la caractéristique allongement est inutile, si l'on est exactement fixé sur la dureté et sur la fragilité, et qu'enfin la limite élastique n'est nécessaire que pour des emplois spéciaux et en dehors des fournitures ordinaires de l'industrie, dans lesquelles entrent seuls les aciers au carbone.

La mesure de la fragilité par rupture par choc à grande vitesse d'impact de barrettes entaillées est incontestablement le procédé le plus parfait.

Eprouvettes. — Pendant longtemps, on a fait



Fig. 47. — Barreau de choc.

usage, pour les essais au choc, de barrettes prismatiques à section carrée (fig. 47), de 4 centimètres de

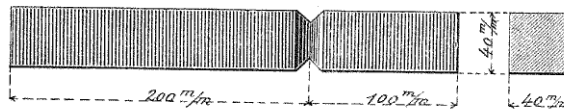


Fig. 48. — Barreau de choc, pour la fonte, avec sa masselotte.

côté pour la fonte, et de 3 centimètres pour les autres métaux.

Essais mécaniques.

Pour la fonte, on coule généralement l'éprouvette dans un moule en sable surmonté d'une masselotte (fig. 48), destinée à récupérer les crasses ou impuretés qui tendent à surnager. Une gorge venant d'un cordon pratiqué dans le moule permet aisément de séparer par un coup de marteau la masselotte du barreau après le démoulage.

Le barreau ainsi obtenu est, s'il y a lieu, rectifié à l'aide d'un rabotage effectué sur ses faces, ses arêtes sont adoucies à la lime, etc.

En général, les conditions de moulage et de coulée du barreau d'épreuve doivent se rapprocher le plus possible de celles qui seront réalisées lors de la coulée principale (L. Gages).

Aujourd'hui, pour les essais dont nous allons parler maintenant, on opère sur *barreaux entaillés* et on fait usage surtout, soit de barrettes à section carrée de 10 millimètres de côté, avec une entaille arrondie de 2 millimètres de profondeur (type du laboratoire des Ponts-et-Chaussées), soit de barrettes à section rectangulaire de 8 millimètres sur 10 millimètres, avec entaille carrée de 1 millimètre (type Frémont).

Appareils pour les essais au choc. — Les appareils servant à faire les essais au choc sont connus sous le nom générique de *moutons*.

Le type le plus simple de mouton est constitué par une masse métallique (dont le poids varie généralement entre 12 et 50 kilogrammes), que l'on laisse tomber d'une certaine hauteur, variable à volonté, sur l'éprouvette. Celle-ci est placée sur deux cousteaux faisant corps avec une *chabotte* de poids élevé.

La partie du mouton qui vient frapper l'éprouvette ou « panne de frappe » doit être constituée par un métal très dur (acier dur trempé); il faut en effet que la panne soit indéformable pour obtenir des actions comparables sur le barreau d'épreuve (Gages).

Méthodes pour les essais au choc. — Les méthodes qui ont été préconisées pour les essais au choc sont fort nombreuses. Avant l'adoption, à peu près générale aujourd'hui, de la méthode dite des barreaux entaillés, sur laquelle nous nous étendrons tout à l'heure, on opérait surtout de la façon suivante :

« On pratiquait l'essai au mouton par *coups successifs* sur éprouvette déterminée. On admettait que le nombre de coups donnés par le mouton, tombant tous de la même hauteur, pour obtenir la rupture, était en relation directe avec la fragilité.

« On a proposé ensuite de donner à l'éprouvette un certain coup de mouton (hauteur de chute, poids, etc., déterminés), la condition de réception étant que l'éprouvette résistât à ce coup de mouton.

« M. Frémont a montré dans un premier travail (1) que l'essai au choc doit être effectué d'un seul coup de mouton produisant la rupture.

« On a créé différentes méthodes répondant à cette condition. C'est ainsi que l'on a préconisé l'emploi d'une barre sur laquelle on fait une série d'entailles équidistantes. La barre est placée dans l'étau de manière que l'entaille soit juste à fleur de l'étau ;

(1) *Académie des Sciences*, 22 février 1897.

on laisse tomber le mouton d'une hauteur déterminée. Si l'éprouvette n'est pas brisée, on opère sur la seconde en donnant à la chute du mouton une hauteur plus importante, et ainsi de suite jusqu'à ce que l'on soit parvenu à en rompre une. On a alors deux limites (le coup qui a causé la rupture et le coup le plus voisin, qui ne l'a pas occasionnée) entre lesquelles est censée se trouver la résistance au choc du métal.

« Si l'éprouvette s'est rompue du premier coup de mouton, on cherche à déterminer le coup le plus voisin sous lequel une autre éprouvette ne se rompra pas.

« Comme l'a fait remarquer M. Frémont (1), ce procédé a plusieurs inconvénients; il est long, il nécessite une quantité importante de métal; de plus, il suppose le métal homogène; et enfin, il ne décèle pas sûrement la fragilité du métal, la vitesse du marteau au moment du choc, c'est-à-dire la *vitesse d'impact*, n'étant pas toujours suffisante. » (2)

Méthode des barrettes entaillées. — La méthode des barrettes entaillées, employée presque universellement aujourd'hui, ne présente pas ces inconvénients. Voici quel en est le principe, d'après M. Guillet :

Le métal est amené sous une forme définie et est entaillé d'une façon mathématiquement déterminée

(1) *Bulletin de la Société d'Encouragement pour l'Industrie nationale*, septembre 1901.

(2) L. Guillet. *Etude théorique des alliages métalliques*.

pour créer une zone fragile. Avec un appareil qui peut varier, on détermine d'un seul coup la rupture de l'éprouvette et l'on mesure la force vive que possède encore le mouton après la rupture. Connaissant le travail total qu'il pouvait fournir, ayant déterminé le travail résiduel, on peut en déduire le travail consommé par l'éprouvette pour se rompre.

Parmi les divers appareils employés dans les laboratoires pour faire ces essais, on peut citer les moutons Charpy (mouton de chute ou mouton-pendule), Russell (mouton-pendule), Ast (mouton de chute), Barba et Leblanc, Frémont, Guillery, etc., etc. (1).

Nous donnerons la description des deux derniers.

Mouton Frémont. — La figure 49 représente le mouton de M. Frémont, très apprécié dans les laboratoires.

Il est essentiellement constitué par un marteau pesant 10 ou 15 kilogrammes et tombant d'une hauteur de 4 mètres : il porte à sa partie inférieure un couteau de longueur telle qu'il vienne frapper l'éprouvette avant que la face inférieure du marteau proprement dit porte sur la plate-forme.

L'éprouvette est placée au-dessus d'une cavité ménagée dans la chabotte. Celle-ci, du poids de 700 kilogrammes, porte deux logements où viennent reposer deux ressorts à boudin en acier trempé

(1) Pour plus de détails sur toutes ces méthodes d'essai, on consultera notamment, avec fruit, outre les travaux cités, l'ouvrage très complet du professeur A. Martens, traduit par M. Pierre Breuil : *Traité des essais des matériaux destinés à la construction des machines*, Paris, Gauthier-Villars, 1904.

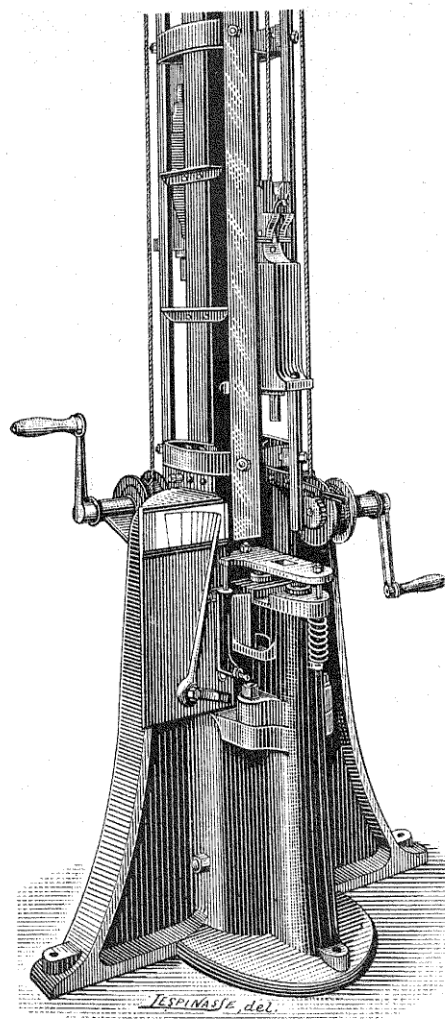


Fig. 49. — Mouton Frémont.
219

(voir la figure) ; sur ces ressorts vient s'appuyer une plate-forme en acier dur.

Pour faire une expérience, on opère de la façon suivante :

L'éprouvette est une barrette de 30 millimètres de longueur, 10 de largeur, et 8 de hauteur ; elle porte une entaille de 1 millimètre de largeur et 1 millimètre de profondeur, à fond rond, et on dispose l'éprouvette de façon que l'entaille soit placée dans le sens du couteau, mais en dessous (tournée vers la chabotte).

Le marteau étant amené à la hauteur de 4 mètres, on le laisse tomber sur l'éprouvette, qui casse ou se plie ; à ce moment, le marteau ne possède plus que l'énergie non consommée par l'éprouvette pour se briser ou se plier ; il vient en contact avec la plate-forme dont nous avons parlé plus haut et comprime les ressorts d'une certaine hauteur.

Au moyen d'un coulisseau à frottement doux qui butte contre les plates-formes, on mesure cette hauteur.

On peut en déduire l'énergie qui reste disponible dans le mouton après la rupture de l'éprouvette.

Cette méthode est très rapide et très simple, elle consomme une quantité très faible de métal ; pour cette raison même, elle fournit des données précieuses sur l'homogénéité du métal essayé, car on peut prélever plusieurs éprouvettes sur une même pièce de métal.

Mouton Guillery. — Dans sa « Note sur une nouvelle méthode d'essais mécaniques des métaux », M. Guillery a donné la description du mouton rota-

Essais mécaniques.

tif qu'il a imaginé. Laissons-lui donc la parole pour parler de cet ingénieux appareil que représente

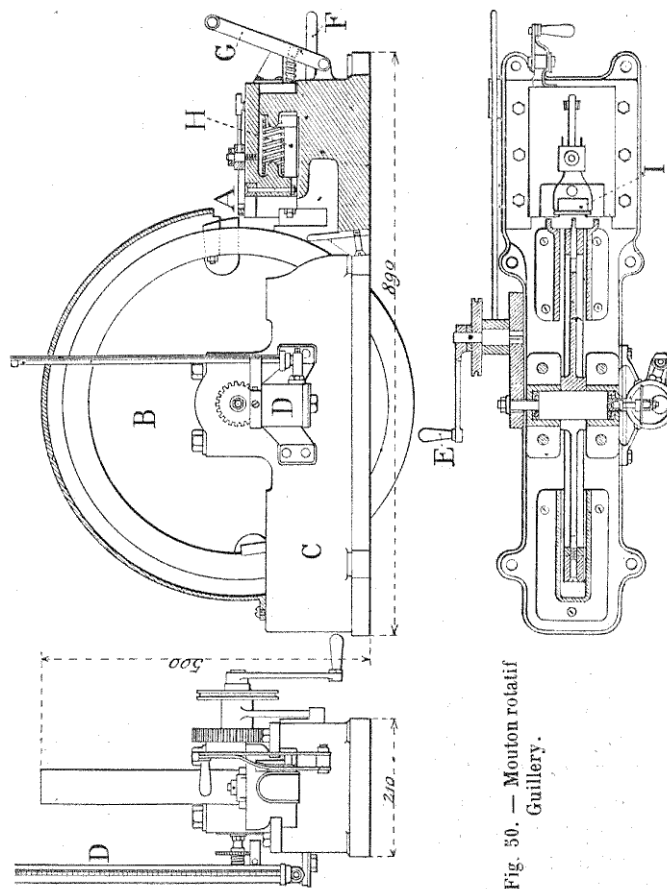


Fig. 50. — Mouton rotatif
Guillery.

la figure 50 en élévation, en plan et en vue en bout.

Guide du constructeur d'automobiles

L'appareil est constitué, en principe, par un volant-mouton qui, lancé à une vitesse convenable, provoque la rupture de la barrette. La variation de force vive en résultant est accusée par la réduction de vitesse et donnée par une simple lecture.

Un volant-mouton en acier B, de dimensions convenables, parfaitement équilibré, porte sur sa jante le couteau A, qui doit rompre les éprouvettes.

Le volant repose, par son axe, sur deux paliers aménagés pour roulement sur billes en temps ordinaire et par contact de surfaces suffisantes au moment du choc.

Les paliers sont fixés à un bâti en fonte C, de masse suffisante pour ne rien craindre du choc et des réactions que ce dernier provoque.

Le volant est amené, soit mécaniquement, soit à la main, à une vitesse telle que :

1° Le travail accumulé dans la masse soit supérieur à celui qui, dans tous les cas, sera nécessaire à la rupture de la barrette;

2° La vitesse d'impact soit égale à celle adoptée jusqu'à présent pour les essais de fragilité, c'est-à-dire celle qui correspond à la chute libre de 4 mètres de hauteur.

La commande s'obtient par un embrayage cylindrique, dont l'élément mobile est monté sur un levier F. Ce levier s'accroche au bâti lors du débrayage; quand il est décroché, un ressort le sollicite pour l'embrayage, et c'est alors que le volant se met à tourner progressivement jusqu'à la vitesse de régime, soit par l'action de la main sur la manivelle E, soit par la puissance de la transmission à câble

Essais mécaniques.

qui attaque la poulie à gorge (visible sur la figure, en plan, calée sur le même arbre que la manivelle E).

La barrette entaillée I est placée entre des griffes légères sur une enclume mobile H.

Cette enclume, en acier moulé, porte, au droit de la frappe, une plaque encastrée en acier fondu et trempé. Un ressort à boudin assez puissant tend toujours à pousser l'enclume vers le volant, c'est-à-dire dans la position où doit avoir lieu le choc.

C'est cette enclume qui porte le mécanisme essentiel, ayant pour objet d'amener en temps opportun la barrette sur le couteau.

Ce mécanisme est constitué par une came d'enclenchement de l'enclume, montée sur une tige qui la commande en rotation, mais la traverse librement dans le sens de l'axe.

La tige est terminée par un loquet et sollicitée par un ressort qui tend toujours à enclencher la came et à ramener la tige vers l'opérateur.

Lorsqu'à l'aide du levier G, placé à l'avant de l'appareil, on rappelle l'enclume, le ressort par torsion enclanche la came et le loquet devient horizontal.

Lorsqu'on pousse sur le même levier, la tige se déplace et le loquet vient recevoir un coup de couteau qui déclanche la came, et abandonne l'enclume à l'influence du ressort.

Ce déclanchement est instantané, et lorsque le couteau a fait un tour complet, il vient frapper en plein sur l'éprouvette.

Le tachymètre D est une petite pompe centrifuge, à axe vertical, qui, par un niveau d'eau gradué D', donne par simple lecture les vitesses à tous les instants et le travail absorbé.

Guide du constructeur d'automobiles

Un dispositif de sécurité fait qu'il est impossible de placer l'éprouvette ou même de déplacer les griffes lorsque l'enclume est déclanchée.

En outre, le volant est protégé par un capot en fonte qui garantit de toute projection.

Les *calculs d'établissement* sont très simples :

Lorsque *a priori* on s'est fixé la vitesse d'impact V et le diamètre d'impact d , on en déduit le nombre de tours par minute n :

$$n = \frac{V \times 60}{\pi d},$$

et par suite, la vitesse angulaire ω est :

$$= \frac{2V}{d}.$$

Comme, d'ailleurs, pour les barrettes à came, on est fixé sur le travail maximum nécessaire à la rupture, on se donne ce maximum T qui doit correspondre à la vitesse ω .

Il suffit alors de tracer le volant pour que son moment d'inertie polaire I_0 , soit égal à :

$$I_0 = \frac{2T}{\omega}.$$

On sait, en effet, que l'expression du travail accumulé dans la masse d'une pièce animée d'un mouvement giratoire est :

$$T = \frac{\omega^2}{2} I_0.$$

Lorsque le volant est exécuté, on en relève les dimensions et le poids avec une grande précision. On

Essais mécaniques.

trouve ainsi la correction à faire subir au I_0 théorique. On en déduit ω et n .

Dans l'appareil Guillery, tel qu'il est construit généralement (cotes de la figure 50), on a :

Travail accumulé : — $T = 60$ kilogrammètres ;

Nombre de tours par minute : $n = 293$;

Vitesse d'impact : — $V = 8^m800$;

$$\omega = 30^m683.$$

M. Guillery a utilisé comme tachymètre la pompe centrifuge parce que, les hauteurs d'eau étant proportionnelles au carré des vitesses de même que les travaux, la graduation indiquant le travail absorbé est une échelle régulière.

Si l'on examine les *chances d'erreurs* dans les résultats, il est une objection qui vient immédiatement : Quelle est la part du frottement au moment du choc et quelle est l'influence des vibrations ?

La forme trapue à masse concentrée de l'appareil ne semble pas devoir laisser de crainte au sujet des vibrations.

En ce qui concerne les frottements, il est facile de démontrer qu'ils sont quantité négligeable. Si nous analysons ce qui se passe sur le couteau au moment du choc, nous voyons que le travail absorbé par la déformation a pour éléments :

1° Un effort progressif nécessaire à la déformation élastique de la barrette, suivi d'un effort variable jusqu'à la rupture ou ployage complet de l'éprouvette ;

2° Le chemin parcouru par le couteau pendant l'action.

Le produit des deux représente le travail absorbé.

Guide du constructeur d'automobiles

Il se produit une réaction sur les portées du mou-
ton, réaction égale, parallèle et de sens contraire,
qui agit en frottement.

Les efforts sont multipliés par le coefficient de
frottement et les chemins parcourus par le rapport
des rayons d'action.

Nous avons un frottement acier trempé sur acier
trempé, les surfaces parfaitement polies et lubri-
fiées ; le coefficient de frottement est inférieur à
0,02.

Le rapport des chemins parcourus est inférieur
à 0,1.

Le travail absorbé par le frottement est inférieur
à 0,002 du travail absorbé par la barrette. Il n'y a
pas lieu de s'en préoccuper.

Pour terminer, signalons différentes particulari-
tés de cet appareil :

1° *Sa constance*. Il reste toujours égal à lui-même :
si un accident, un frottement anormal venaient à
se produire, le tachymètre le dirait de suite ;

2° *Son encombrement* est restreint, sa forme ne
semble pas désagréable. C'est un meuble de labora-
toire, dit M. Guillery, qu'à la rigueur, un ingénieur
peut garder à son bureau, si, pour sa tranquillité,
il veut souvent et *de visu* juger de la fragilité des
métaux qu'il fabrique ou qu'il emploie ;

3° *Son poids* est faible et conséquemment son
déplacement s'opère facilement ;

4° *La production* en barrettes cassées est très
grande, le temps nécessaire pour effectuer un essai
étant très court ; indépendamment de ce que la ma-
nœuvre de mise en place est facile, il n'est pas

Essais mécaniques

nécessaire de rendre à chaque opération la totalité du travail ; il n'y a qu'à rendre ce qu'a pris l'opération précédente ;

3° *La sécurité de l'opérateur* est complète ; il ne peut y avoir projection et cette fonction aide encore à la rapidité du maniement, donc à la production.

Nous avons insisté un peu longuement sur les essais au choc parce que c'est une méthode donnant des indications précieuses sur les qualités d'un métal ; ainsi que nous l'avons déjà dit, de l'avis de MM. Le Chatelier, Frémont, Considère, Barba, Charpy, etc., cette méthode, combinée avec les essais de dureté dont nous allons parler maintenant, donne tous les renseignements utiles à connaître sur les propriétés d'un métal dont on veut faire usage en construction.

Nous avons décrit en détail l'appareil de M. Guillery et nous nous sommes étendu quelque peu sur sa méthode parce que l'un et l'autre constituent une solution particulièrement élégante du problème des essais de choc, et parce qu'ils sont certainement appelés à des applications chaque jour plus nombreuses.

*
* *

Essais de dureté

Diverses méthodes ont été indiquées pour effectuer les essais à la dureté ; la plupart de ces méthodes, sur lesquelles nous ne étendrons pas, nécessitent une préparation assez longue des éprouvettes ;

Guide du constructeur d'automobiles

de plus, les résultats qu'elles donnent sont d'une comparaison assez malaisée.

La méthode employée presque toujours aujourd'hui est celle qu'a proposée M. Brinell (1). Nous allons en exposer le principe et nous donnerons ensuite la description de l'appareil très simple et très ingénieux que M. Guillery a imaginé pour appliquer cette méthode.

Méthode Brinell. — Le principe de cette méthode est le suivant :

Au moyen d'une presse hydraulique, on agit sur le métal que l'on veut essayer par l'intermédiaire d'une bille en acier très dur trempé, de diamètre connu (semblable à celles que l'on emploie dans les roulements à billes), et cela sous une pression déterminée. On obtient ainsi dans le métal essayé une empreinte qui est d'autant plus importante que le métal possède une dureté plus faible. On mesure d'une façon précise le diamètre de cette empreinte, avec un microscope à déplacement, par exemple.

On déduit de ce diamètre d la surface a de la calotte sphérique décrite dans le métal. Si p est la pression à laquelle on a soumis l'ensemble, le *chiffre de dureté de Brinell* ou *chiffre de Brinell* Δ est donné par l'équation de définition :

$$\Delta = \frac{p}{a}$$

M. Brinell a publié, dans le travail cité, des tables

(1) Congrès international des méthodes d'essais des matériaux de construction, juillet 1900.

Essais mécaniques

donnant Δ en fonction des pressions employées et des diamètres d obtenus ; on évite ainsi le calcul de la formule ci-dessus dans le cas de chaque essai.

Cette méthode est extrêmement rapide et simple ; l'essai peut être exécuté par n'importe quel ouvrier sur une presse hydraulique quelconque.

Elle n'exige aucun préparatif d'éprouvettes ; elle utilise comme intermédiaire un objet toujours facile à se procurer identique à lui-même, qui ne se déforme pas et qui est peu coûteux.

Elle permet même d'essayer des pièces complètement achevées, sans que pour cela la pièce ne puisse pas être utilisée.

Les essais de dureté ont une très grande importance : c'est en effet la dureté au sens minéralogique du mot qui intervient dans les organes soumis au frottement, la dureté a également une importance considérable au point de vue du travail des métaux et par conséquent du rendement des machines-outils (1).

Appareil Guillery pour l'essai Brinell. — Le principe de cet appareil consiste à enfoncer la bille dans le métal au moyen de la pression donnée par des rondelles Belleville sous une flèche déterminée. On supprime ainsi la presse hydraulique et l'essai peut être fait en n'importe quel endroit et à tout moment.

M. Guillery a établi deux types de son appareil.

L'appareil portatif, insuffisant pour un véritable contrôle, permet de reconnaître rapidement des

(1) L. Guillet, *loc. cit.*

erreurs grossières, par exemple dans le cas où l'on se serait trompé de lingot au laminage. Nous n'en parlerons que pour mémoire.

L'appareil fixe, que nous allons décrire, est un

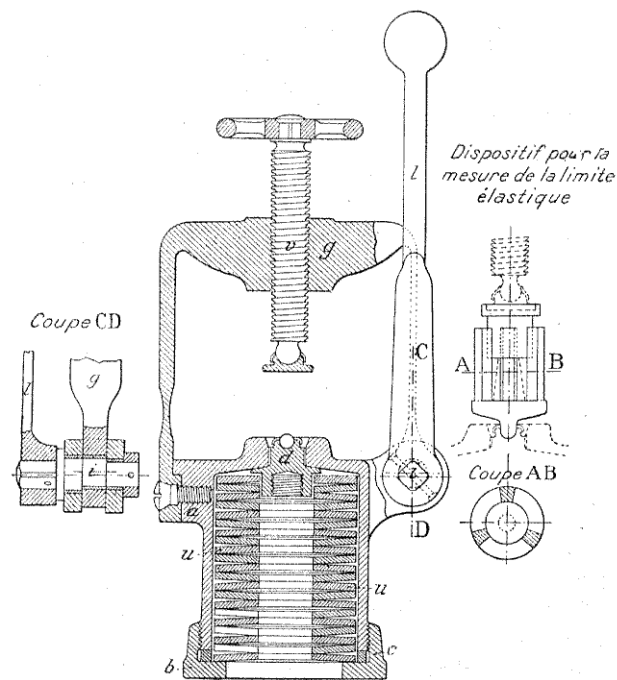


Fig. 51. — Appareil Guillery pour l'essai Brinell.

appareil de précision qui convient à toutes les réceptions et aux recherches sur les aciers. La figure 51 représente cet appareil en coupe verticale.

Il est disposé pour agir par une pression statique.

Il se compose d'une boîte cylindrique en acier *a* vissée sur un fond socle *b* et contenant les rondelles Belleville *u* et une cale de réglage *c*. La pression des rondelles est transmise à la bille (représentée sur la figure par un petit cercle blanc au-dessus de la lettre *d*) au moyen d'un support *d*. Cet ensemble constitue l'appareil de mesure.

Au-dessus se trouve une presse à levier servant à comprimer l'échantillon sur la bille jusqu'au moment où, la charge étant suffisante, les rondelles s'aplatissent et la bille s'éclipse.

Cette presse est constituée par un étrier *g* muni d'une vis de calage *v*, qui sert à transmettre l'effort, mais non à exercer une pression. Dès qu'il y a contact, le frottement empêche de continuer à serrer.

Une des extrémités de l'étrier *g* est articulée à un axe excentrique *i* mû par un levier *l*. L'excentricité étant de 1 millimètre 5, il en résulte que par une rotation du levier de 180°, on abaisse l'échantillon de cette quantité. En recommençant au besoin jusqu'à ce que la bille ne s'enfonce pas, on est certain que l'empreinte a été obtenue à la pression correspondant

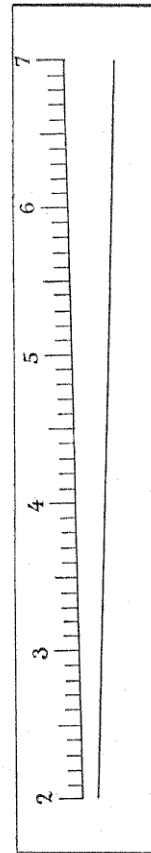


Fig. 52. — Réglette de M. H. Le Chatelier.

Guide du constructeur d'automobiles

à une flèche des rondelles, supérieure de $1\text{ m/m } 1/2$ à la flèche au repos, c'est-à-dire sur une pression rigoureusement constante.

Il serait assez malaisé de régler cet appareil pour réaliser une charge donnée *a priori*.

On fait un tarage comme pour les machines de traction.

Ce tarage peut se faire en prenant un métal de résistance connue et en mesurant le diamètre de l'empreinte.

Le métal qui peut offrir le plus de garanties de régularité, est le bronze de la Monnaie destiné aux médailles.

L'appareil à billes de 10 millimètres est réglé de manière à fournir une empreinte de 7 millimètres dans ces rondelles.

La mesure du diamètre des empreintes s'effectue à l'aide de la réglette en verre de M. H. Le Châtelier que représente la figure 52. Il suffit de mettre cette réglette sur l'éprouvette en la déplaçant de façon à comprendre exactement l'empreinte entre les deux traits divergents. Cette réglette permet d'apprécier sûrement le $1/10$ de millimètre à l'œil nu. (1)

Le procédé Brinell est d'une application particulièrement commode : il n'exige pas d'autre préparation d'éprouvette qu'un polissage assez grossier d'un élément de surface de quelques centimètres carrés. Les éprouvettes ont généralement le forme de petits cylindres de faible hauteur.

(1) Guillery, *loc. cit.*

Essais mécaniques

L'appareil Guillery se prête, en outre, à la *mesure de la limite élastique* sans modification.

Il suffit de serrer dans une chapelle disposée sous la vis *v* de l'appareil (voir fig. 51), les troncs de pyramides ou de cônes polis, en les soumettant à la charge maxima constante.

Après avoir relevé la section limitant la déformation et en la rapportant à la charge, on en déduit la limite élastique.

Les méthodes d'essais mécaniques que nous venons d'étudier sont, de beaucoup, les plus importantes et les plus employées ; nous passerons donc très rapidement sur les autres méthodes.

*
* *

Essais à la flexion

Les essais de flexion mesurent la ductilité du métal ; on les applique surtout à des pièces finies, telles que des essieux, des ressorts, etc. Ces essais se font pourtant parfois sur éprouvettes.

Dans le cas des aciers, les essais de flexion deviennent, en quelque sorte, des *essais de pliage*.

Quel que soit le procédé mis en œuvre pour l'épreuve, le pliage proprement dit a pour objet de limiter essentiellement la déformation à la charnière du pli formé en mettant surtout en jeu l'allongement de striction en ce point. On mesure l'angle des deux parties de l'éprouvette (angle intérieur d'ouverture des branches rapprochées et non pas le supplément de cet angle à 180°). De cette définition, il résulte que le métal éprouvé est d'autant plus duc-

Guide du constructeur d'automobiles

tile que l'angle de pliage mesuré comme il est indiqué est plus faible (Gages).

L'essai de flexion se pratique au moyen de machines spéciales, fondées généralement sur le principe des romaines.

On peut également utiliser les machines pour essais de traction, avec une légère modification.

Ces essais doivent être faits en développant un effort progressif et sans chocs.

Dans le cas particulier des ressorts, au lieu de provoquer des déformations *permanentes*, il convient de pouvoir effectuer des flexions sur éprouvettes sans dépasser la *limite élastique de flexion*.

Il existe, enfin, des machines spéciales à essayer les ressorts finis, mais nous ne les citerons que pour mémoire.

*
* * *

Essais de compression

Ces essais sont rarement pratiqués ; on se contente généralement, à ce point de vue, des indications données par les essais à la traction. Ils se font, d'ailleurs, avec les machines à la traction par l'intermédiaire d'un appareil qu'on appelle *inverseur* ou mordaches croisées (Guillet, *loc. cit.*).

*
* * *

Autres essais mécaniques

Enfin, dans certains cas particuliers, on pratique des essais de cisailage, poinçonnage, etc. Mais ces

Essais mécaniques

essais ne sont pas d'application assez générale pour justifier ici une étude détaillée des méthodes et des appareils employés. On trouvera dans les ouvrages spéciaux, et notamment dans ceux du professeur Martens et de M. Gages des détails sur ces essais particuliers.

En résumé, dans l'état actuel de nos connaissances, les *essais de choc*, sur barrettes entaillées et les *essais de dureté*, par la méthode Brinell sont ceux qui paraissent fournir les indications les plus utiles et les plus précieuses sur les propriétés des métaux employés dans la construction.

Aussi ces méthodes tendent-elles à se généraliser de plus en plus ; les appareils de M. Guillery, notamment, en ont rendu l'application particulièrement facile et rapide. Beaucoup de laboratoires industriels en font un usage exclusif et il semble hors de doute que l'emploi s'en généralisera encore.

CHAPITRE II

Analyse chimique des métaux et alliages.

Sous peine de donner à ce chapitre une extension incompatible avec les dimensions du volume lui-même, nous devons nous borner dans ce qui va suivre, à ne décrire que les méthodes principales, d'emploi fréquent dans les laboratoires pour la détermination des principaux éléments constituant les métaux ou leurs alliages.

Nous envisagerons, dans ce qui va suivre, l'analyse des métaux ayant le plus d'intérêt et d'applications dans la construction automobile : les fontes et aciers, les bronzes, l'aluminium et quelques alliages particuliers.

Toutes ces méthodes ont été exposées avec une telle netteté par M. le professeur Carnot dans ses ouvrages que nous ne pouvons faire mieux que de lui emprunter la plupart de ses descriptions (1.)

Prise d'essai pour l'analyse. — Il importe, tout d'abord, d'opérer la prise d'essai sur une assez grande

(1) Nous mettrons à contribution, notamment, le mémoire : *Méthodes d'analyse des fontes, des fers et des aciers*, par M. Ad. Carnot, inspecteur général des Mines, membre de l'Institut. (*Annales des Mines*, octobre-novembre 1895.)

Analyse chimique des métaux et alliages.

épaisseur de métal, ou de la prélever partie à la surface, partie au centre de la barre métallique : il y a, en effet, parfois des différences de composition appréciables, notamment dans les fontes.

Il convient de réduire en menus fragments le métal à analyser. On dispose pour cela de plusieurs procédés :

1. *Le foret.* — Percer la pièce dans toute son épaisseur en s'efforçant de faire des tournures fines et égales.

2. *Le marteau.* — Les fontes dures et cassantes (fontes blanches, etc.), notamment, peuvent être réduites en fragments au marteau, puis pulvérisées dans un mortier à surface intérieure trempée au moyen d'un pilon également trempé à son extrémité.

3. *La lime.* — Les fontes grises ne peuvent pas être pulvérisées de cette façon ; on réduira l'échantillon à analyser en limaille au moyen d'une lime dure ; la même méthode est applicable au fer et aux aciers doux, mais on lui préférera la machine à percer ou à raboter toutes les fois qu'on le pourra.

Pour les aciers très durs, on s'efforcera de réduire l'échantillon en poudre ou en copeaux au moyen d'outils en aciers spéciaux, de grande dureté.

Lorsqu'on a à analyser un acier trempé, on peut le recuire pour l'adoucir, mais à la condition d'éviter soigneusement pendant le chauffage le contact de l'air qui pourrait diminuer la teneur en carbone (chauffage dans un creuset fermé). Il ne faut pas perdre de vue, d'ailleurs, que cette opération modifie l'état chimique du carbone (voir plus loin).

En possession de notre prise d'essai, convenablement choisie, et réduite, autant que possible, à l'état

de poudre, de limaille ou de menus copeaux, nous pouvons passer au dosage des principaux éléments contenus dans le métal analysé et dont la teneur est intéressante à connaître.

Nous considérerons tout d'abord l'analyse des fontes et des aciers.

*
* *

I. Analyse des fontes et des aciers.

Les corps que l'on a à doser le plus souvent dans les fontes ou les aciers sont :

- Le carbone,
- Le soufre,
- Le phosphore,
- Le silicium,
- Le manganèse,
- Le nickel,
- Le chrome,
- Le tungstène,
- L'aluminium.

Nous allons étudier successivement les procédés de dosage de ces divers corps.

1. Dosage du carbone. — Nous verrons au chapitre III que la métallographie microscopique a permis de déceler l'existence, dans les aciers de cinq constituants principaux distincts.

Au point de vue de l'analyse, l'important est surtout la distinction entre les quatre états du carbone :

1. Graphite,
2. Carbone graphitique de recuit,

Analyse chimique des métaux et alliages.

3. Carbone du carbure normal ou carbone de la cémentite,

4. Carbone de trempe.

Le premier est facile à isoler : il ne se trouve que dans les fontes grises ou truitées ; en traitant la fonte par l'acide chlorhydrique bouillant, le graphite reste insoluble, en paillettes cristallines.

Le carbone graphitique de recuit se rencontre dans la fonte malléable, les moulages de fonte et parfois dans des pièces d'acier dur refroidies lentement. De même que le graphite, cette forme de carbone reste inattaquable par l'acide chlorhydrique bouillant, mais elle se présente sous la forme d'une poudre amorphe, noir foncé, terne, ce qui le distingue du graphite, qui est feuilleté et d'éclat métalloïde.

Le carbone du carbure normal se trouve dans presque tous les fers carburés : il donne lieu à la production de carbures d'hydrogène lorsque l'on dissout le métal dans l'acide chlorhydrique concentré, surtout à chaud. — En dissolvant le métal dans l'acide sulfurique très étendu (à 10 0/0), froid, à l'abri de l'air, le carbure (Fe^3C) reste inattaqué.

Le carbone de trempe se rencontre surtout, comme son nom l'indique, dans les aciers trempés. Dans un même acier, la proportion en est d'autant plus grande que le refroidissement a été plus rapide. Ce carbone se transforme en carbures d'hydrogène lorsque l'on traite le métal par l'acide sulfurique ou par l'acide chlorhydrique étendu, à froid.

Dans la pratique industrielle, on se préoccupe de doser le *carbone total*. Parfois, il y a intérêt à con-

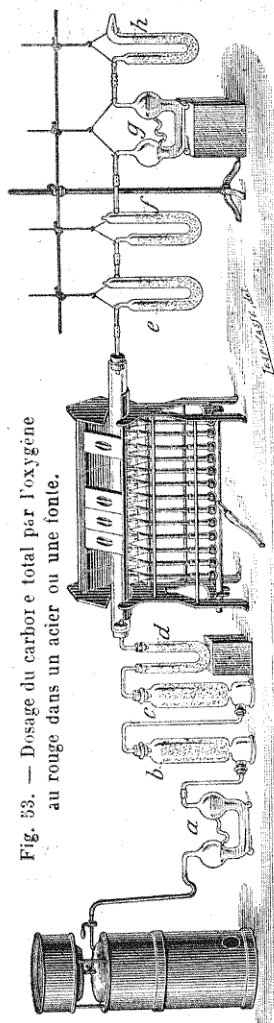


Fig. 53. — Dosage du carbone total par l'oxygène au rouge dans un acier ou une fonte.

naître la teneur en *graphite* et en *carbone amorphe*. (On comprend sous le nom de *graphite* tout le carbone restant insoluble sous les actions successives de l'acide chlorhydrique et de l'acide azotique, et sous le nom de *carbone amorphe* tout le carbone qui disparaît sous l'action de ces deux acides.)

A. Dosage du carbone total. — Le dosage du carbone total peut se faire par voie sèche ou par voie humide.

I. Dosage par voie sèche.

a) *Oxydation par l'oxygène au rouge.* — On fait usage d'un appareil analogue à celui employé dans les analyses organiques (fig. 53). Le métal à analyser doit être réduit en poudre aussi fine que possible.

Analyse chimique des métaux et alliages.

Peser 1 ou 2 grammes de métal en poudre suivant la nature du métal analysé, verser dans une nacelle de platine assez longue pour que la matière y forme une couche de faible épaisseur. Déposer la nacelle dans un tube de porcelaine de 20 millimètres environ de diamètre et 70 centimètres de longueur. On facilite l'oxydation en obligeant le courant d'oxygène à s'infléchir vers le fond de la nacelle et adoptant, à cet effet, la disposition suivante, indiquée par Blair (*Chemical News*, vol. LXIV, p. 66.) : La nacelle est recouverte par une feuille de platine ayant à peu près même longueur et même largeur (fig. 54), sur

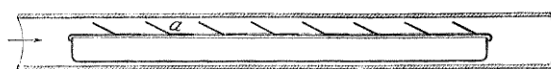


Fig. 54. — Nacelle de platine disposée dans le tube de porcelaine.

laquelle on a pratiqué à l'avance, de distance en distance, des fentes demi-circulaires et formé ainsi de petites ailettes (*a*, fig. 54) de métal, que l'on soulève sous un angle de 40 à 45 degrés et que l'on dirige vers le côté d'où doit venir le courant gazeux.

Disposer le tube de porcelaine sur une gouttière en fer dans un fourneau à gaz permettant le chauffage au rouge clair du tube et de son contenu. A la suite de la nacelle, placer un tampon d'amiante calciné aux trois cinquièmes ou aux deux tiers à peu près de la longueur du tube, puis une colonne d'oxyde de cuivre en gros grains mêlé de tournure de cuivre oxydée, pour peroxyder au rouge les traces d'oxyde de carbone qui auraient pu se former. La colonne d'oxyde de cuivre est maintenue par un

second tampon d'amiante calciné, placé à quelques centimètres de l'extrémité du tube.

Le tube sera fermé par des bouchons de liège ou de caoutchouc placés assez loin du four.

L'oxygène est fourni par un gazomètre ou par un tube d'oxygène comprimé que l'on trouve aujourd'hui couramment dans le commerce (dans ce cas, faire passer le gaz, avant de l'envoyer sur le métal analysé, dans un tube de porcelaine réfractaire contenant de l'oxyde de cuivre granulé, chauffé au rouge dans un fourneau dit « fourneau de chauffe préalable » ; à la sortie de ce tube, l'oxygène vient barboter dans un tube à boules *a* contenant de la potasse caustique, qui absorbe l'acide carbonique que pouvait renfermer l'oxygène et celui qui pourrait provenir de la combustion des vapeurs carburées introduites dans le gaz par les traces de corps gras provenant des pompes de compression). En outre, pour achever sa purification, le gaz passera sur de la ponce sèche, de la potasse solide, du chlorure de calcium (tubes *b*, *c*, *d*, fig. 53) (1).

À la suite du tube de porcelaine renfermant, dans la nacelle de platine, le métal analysé, on dispose divers tubes purificateurs (ponce chromique (tube *e*, fig. 53), chlorure de calcium desséché (tube *f*), puis un tube à boules (M. Carnot recommande celui de

(1) Il ne nous est pas possible de décrire en détail toutes ces opérations. Les indications que nous donnons seront suffisantes, nous l'espérons, pour les chimistes habitués à ces manipulations. Nous ne pouvons que renvoyer le lecteur, pour de plus amples explications, au lumineux rapport de M. le professeur Carnot, cité plus haut.

Analyse chimique des métaux et alliages.

Schlœsing modifié par Mahler) contenant une solution de potasse à 20 0/0 (tube *g*).

Enfin, après le tube à potasse, on dispose un tube à chlorure de calcium (tube *h*).

On commence par porter au rouge, sur 0 m. 15 environ de longueur, le tube à oxyde de cuivre (servant à l'épuration de l'oxygène). — Pendant ce temps, on pèse ensemble le tube à potasse (*g*) et le tube à chlorure de calcium (*h*) terminant l'appareil ; on les remet en place et on règle le courant d'oxygène, de manière à dégager d'abord 30 et plus tard 60 bulles de gaz environ par minute à travers la première solution de potasse.

On chauffe alors graduellement jusqu'au rouge la partie du tube qui contient l'oxyde de cuivre, et lentement, on fait avancer le feu jusqu'à la nacelle qu'on maintient au rouge pendant deux ou trois heures ; il ne faut pas aller trop vite, pour ne pas risquer d'agglomérer la poudre métallique au début.

Lorsque l'oxydation est supposée terminée, on éteint le feu et, en même temps, on ralentit le courant d'oxygène, puis on l'arrête tout-à-fait. Peser alors les tubes à potasse et à chlorure de calcium dans les mêmes conditions qu'au début de l'opération. P étant l'augmentation de poids notée, on a, pour la teneur en carbone :

$$l = P \times \frac{C}{CO^2} = P \times 0,27273$$

L'appareil étant monté une fois pour toutes, cette méthode est rapide et précise.

Si l'on a lieu de croire que la teneur en carbone

Guide du constructeur d'automobiles

est très faible, et que, par suite, l'augmentation de poids des tubes soit faible, on peut remplacer la solution de potasse caustique par une solution saturée d'hydrate de baryte, dans laquelle on a fait dissoudre 20 0/0 de potasse (et qu'on a ensuite filtrée et conservée à l'abri de l'air). Après le passage du courant, on verse le contenu du tube et les eaux de lavage dans un demi-litre d'eau distillée bouillante, on y ajoute une solution de chlorure de baryum à 20 0/0 en léger excès : il se produit un précipité de carbonate de baryte facile à filtrer et laver à l'eau bouillante. On le redissout dans de l'eau acidulée d'acide chlorhydrique et on précipite la baryte à l'état de sulfate de baryte, que l'on filtre, lave, sèche, calcine et pèse.

Le poids du sulfate de baryum trouvé étant P, la teneur en carbone correspondante est :

$$t = P \times \frac{C}{SO_4Ba} = P \times 0,05150.$$

Cette méthode est évidemment plus longue que la précédente, mais aussi beaucoup plus précise et plus sensible.

b) Oxydation par le bisulfate de potasse au rouge.

— Cette méthode est surtout utile à connaître pour le dosage du carbone dans les *aciers spéciaux* (au chrome, au tungstène, au titane, etc.) qui ne s'oxydent qu'incomplètement par l'oxygène au rouge.

Opérer sur 1 à 2 grammes de métal en poudre très fine. Mélanger avec un poids trente fois égal de bisulfate de potasse préalablement fondu et pulvérisé. Le mélange est placé dans une nacelle de platine dis-

Analyse chimique des métaux et alliages.

posée elle-même dans un tube de porcelaine, comme dans la méthode précédente.

De même que dans la méthode *a*, un courant lent d'oxygène (après passage dans un fourneau de chauffe, puis dans deux tubes à boules contenant : le premier une solution de potasse, le second de l'acide sulfurique concentré) traverse le tube à combustion renfermant le métal analysé.

Le courant gazeux sortant de ce tube passe dans plusieurs tubes d'épuration (solution sulfurique d'acide chromique, ponce chromique, ponce sulfurique) puis dans l'appareil d'absorption de l'acide carbonique. Celui-ci est constitué par un tube à absorption rempli de potasse à 20 0/0 et par un tube en U garni de chaux sodée dans la première branche et de ponce sulfurique dans l'autre. Cet appareil est pesé avant et après l'opération; on détermine ainsi le poids de l'acide carbonique formé et, par suite, celui du carbone (voir plus haut).

Rien ne s'oppose d'ailleurs au perfectionnement de cette méthode par le dosage au sulfate de baryte (voir page 243).

II. Dosage par voie humide.

Les méthodes de dosage du carbone par voie humide sont assez nombreuses. Nous n'en décrirons qu'une, l'attaque directe du métal par l'acide sulfurique et l'acide chromique, que M. Carnot recommande comme procédé applicable dans la plupart des cas.

Le principe de toutes ces méthodes est la dissolution complète du métal : le carbone peut être recueilli

Guide du constructeur d'automobiles

et ensuite pesé directement ou transformé en acide carbonique. Il peut aussi, comme dans la méthode que nous allons décrire, être directement converti en acide carbonique pendant l'opération même de la dissolution.

Pour dissoudre le métal, on a proposé l'eau de chlore, le brome, l'iode, le bichlorure de cuivre, le sulfate de cuivre avec chlorure de sodium, le chlorure double de cuivre et d'ammonium, le bichlorure de mercure, etc., etc.

Dosage du carbone par attaque directe et simultanée au moyen d'acide sulfurique et d'acide chro-

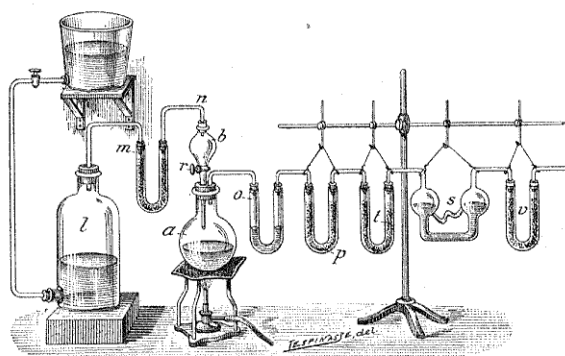


Fig. 55. — Dosage du carbone par voie humide (Méthode Brunner modifiée par Jüptner et Gmelin).

mique. — (Méthode Brunner, modifiée par Jüptner et Gmelin).

La figure 55 représente l'appareil employé pour ce dosage.

Introduire le métal réduit en poudre ou en copeaux.

Analyse chimique des métaux et alliages.

très fins dans le ballon *a* ; le recouvrir d'une solution saturée d'acide chromique (8 à 10 grammes d'acide chromique cristallisé par gramme de métal). Verser ensuite 200 cm³ d'acide sulfurique à la densité de 1,65 préalablement saturé d'acide chromique par digestion avec des cristaux. « Ce liquide, arrivant au contact de la solution chromique, lui enlève son eau et fait déposer sur la poudre métallique une sorte de croûte protectrice ressemblant à du cuir. » Sans agiter le ballon, faire couler lentement de la boule *b*, par le tube terminé en pointe à la surface même de la solution, environ 50 centimètres cubes d'acide sulfurique étendu (densité 1,10) qui reste à la surface et ne se mêle que très lentement à l'acide concentré, en sorte qu'il n'y a aucune attaque du métal et aucune perte avant que l'appareil soit prêt pour l'opération. Le mélange ne se fera que lorsqu'on chauffera le ballon.

« Au moyen de l'aspirateur, après avoir fermé le robinet *r*, on s'assure de l'étanchéité de toutes les parties de l'appareil, que l'on fait ensuite traverser par un courant d'air venant de *l*, privé d'acide carbonique par son passage à travers le tube en U (*m*) ; on retire ensuite les tubes à potasse, que l'on pèse, tandis que le courant gazeux est maintenu dans le reste de l'appareil. On ferme le robinet *r*, on remet en place les tubes pesés et on commence à chauffer le ballon *a* au moyen d'un bec Bunsen.

« Au bout de quelques instants, on voit commencer le dégagement de l'acide carbonique, qui se continue doucement et régulièrement jusqu'à la fin, tandis que la liqueur sulfurique se maintient en ébullition.

La fin de la réaction est marquée par la cessation du dégagement de fines bulles de gaz au travers du liquide; en même temps, on cesse de voir des paillettes noires de graphite rejetées sur les bords et ramenées par l'acide condensé le long des parois, comme il s'en produit toujours avec la fonte grise ou truitée; on n'aperçoit plus que la silice incolore et le liquide ne se recouvre plus que de grosses bulles.

A ce moment, la combustion du carbone est complète. Rétablir le courant d'air et baisser graduellement, jusqu'à extinction, la flamme du bec Bunsen. Le chauffage a généralement duré de une heure à une heure et demie.

Faire passer du flacon *l* l'air très lentement d'abord, puis un peu plus vite, pendant trois quarts d'heure environ.

L'acide carbonique contenu dans le ballon *a* passe avec l'air dans le tube à potasse *s*, où il est retenu. Il suffit de peser ce tube avant et après pour avoir, par l'augmentation de poids, la quantité d'acide carbonique fixé.

Särnström a remarqué qu'une partie du carbone se dégage, dans cette opération, à l'état d'hydrogène carboné, qui échapperait au dosage. En plaçant, aussitôt après le ballon *a*, un tube de verre rempli d'oxyde de cuivre en fragments, chauffé sur une rampe à gaz, on décompose cet hydrogène carboné en eau et acide carbonique qui sera retenu par la potasse.

Le tube *o* contient de l'acide sulfurique dans sa partie inférieure, *p* de la ponce sèche, *t* de la ponce sulfurique, ainsi que le tube *v*.

Analyse chimique des métaux et alliages.

On peut encore faire usage du dosage par le sulfate de baryum déjà indiqué.

L'acide carbonique peut encore être déterminé *en volume* et non plus en poids, en appliquant, par exemple, la méthode de J. Wiborgh, consistant, en principe, dans l'attaque de l'acier par le sulfate de cuivre, puis dans la dissolution du résidu dans un mélange d'acide chromique et d'acide sulfurique. L'acide carbonique se dégage avec les autres gaz produits. Le volume total est mesuré, puis l'acide carbonique est absorbé seul par la potasse. Le volume restant est de nouveau mesuré. La différence permet, avec les corrections de température et de pression, de déduire le poids du carbone.

B. Dosage du graphite et du carbone graphique. — Prendre 2 grammes de fonte grise, ou 3 grammes de fonte truitée, ou 4, 5 et même 10 grammes de fonte blanche, d'acier ou de fer, en poudre ou copeaux aussi fins que possible.

Traiter par un poids dix fois égal d'acide chlorhydrique, à 1,10 de densité, et chauffer entre 60 et 80° jusqu'à dissolution complète du métal. Le carbure amorphe est dégagé à l'état de carbure d'hydrogène. Maintenir pendant une demi-heure à une température voisine de l'ébullition.

Ajouter de l'eau bouillante — jeter sur un filtre d'amiant (calciné et pesé à l'avance) le résidu insoluble (silice gélatineuse et graphite). — Laver à l'eau chlorhydrique bouillante, puis à l'eau pure et trois ou quatre fois avec une solution de potasse chaude de densité 1,10, pour enlever toute la silice hydratée.

Guide du constructeur d'automobiles

Laver encore à l'eau chaude, puis à l'alcool et à l'éther.

Sécher à 120° et peser.

Pour plus de sûreté, brûler le graphite en chauffant au rouge très vif, et peser à nouveau.

C. Dosage du carbone combiné ou dissous (carbone du carbure et carbone de trempe).

On peut, tout d'abord, en faire l'estimation par différence si l'on a dosé, d'une part, le carbone total (**A**), et, d'autre part, le carbone graphite (**B**).

Mais on peut aussi obtenir directement une évaluation approximative de la teneur en carbone combiné ou dissous, grâce à la méthode colorimétrique suivante :

Procédé Eggertz. — Prendre le métal en poudre aussi fine que possible. En peser 0 gr. 10 que l'on verse dans un tube d'essai. Dissoudre dans l'acide azotique de densité 1,20 (bien exempt d'acide chlorhydrique). La quantité d'acide peut être un peu forte sans aucun inconvénient. Elle ne doit pas être trop faible, afin de ne pas donner avec l'eau une teinte trop sombre, qui ferait estimer trop haut la teneur en carbone.

Les quantités adoptées sont :

2^{cm}3,5 d'acide pour 0^{gr}10 d'acier à moins de 0,30 0/0 de carbone.

3	—	—	0,25	à 0,30	—
4	—	—	0,30	à 0,50	—
5	—	—	0,50	à 0,80	—
6	—	—	0,80	à 1,00	—
7	—	—	plus de	1,00	—

Ou pour 0^{gr}05 de fonte blanche.

Analyse chimique des métaux et alliages.

« On traite en même temps, et de la même façon, 0 gr. 10 d'un métal type de nature peu différente, et dont la teneur en carbone a été déterminée aussi exactement que possible par l'une des méthodes précédentes.

Mesurer rapidement l'acide azotique dans un vase gradué et le verser en quantité égale dans les deux tubes. L'attaque est rapide; s'il se produit des flocons bruns ou noirs, les dissoudre par agitation. Placer les deux tubes dans un bain-marie et les y maintenir à 100° pendant une demi-heure ou trois quarts d'heure jusqu'à complète dissolution.

Refroidir rapidement les deux tubes dans l'eau froide, à l'abri de la lumière (qui atténue la teinte). S'il y a un dépôt noir de graphite, le séparer en faisant passer la solution sur un petit filtre d'amianté qu'on lave ensuite avec quelques centimètres cubes d'eau. D'ailleurs, il doit y avoir toujours au moins autant d'eau que d'acide pour que l'on n'ait pas à craindre la coloration due à l'azotate de fer concentré.

Verser les deux solutions dans deux tubes en verre bien blanc, de même calibre et de même épaisseur, de 30 cm³ de capacité, gradués par dixièmes de centimètre cube.

La comparaison se fait devant une glace dépolie dans une chambre obscure.

Étendre la dissolution de l'acier normal jusqu'à ce que 1 centimètre cube contienne 0 mgr. 1 de carbone (ou, pour l'essai de produits très carburés, à 0 mgr. 5 de carbone), puis étendre la solution de l'acier à essayer, par addition répétée de petites quantités d'eau distillée et mélange des liquides jusqu'à ce que

Guide du constructeur d'automobiles

la teinte brune paraisse identique à celle de la solution normale. Le volume de la seconde fait immédiatement connaître le nombre de dixièmes de milligramme de carbone contenus dans 0 gr. 10 d'acier ou, en d'autres termes, la teneur en centièmes pour cent.

Exemple. — Si l'acier normal tient 0,42 0/0 de carbone, après l'attaque de 0 gr. 10 de métal, on étendra d'eau jusqu'à avoir 4 cm³ 2. Si l'acier à essayer, traité de même, donne une teinte identique lorsque la solution occupe un volume de 5 cm³ 6, on en conclura que sa teneur en carbone est de 0,56 0/0.

Il est à recommander de faire aussi exactement que possible le dosage du carbone dans l'acier type et de choisir comme acier type un métal à teneur en carbone aussi voisine que possible de celle du métal essayé.

*
* *

2. Dosage du soufre. — On distingue trois procédés principaux :

A. — Oxydation directe et dissolution simultanée du soufre et du fer.

B. — Dissolution du métal seul et mise en liberté du soufre ou du sulfure demeuré insoluble.

C. — Dégagement du soufre à l'état de combinaison volatile.

A. — La première méthode est d'application assez rapide, mais ne convient pas pour des analyses très exactes.

Analyse chimique des métaux et alliages.

Attaquer le métal par un réactif oxydant (eau régale, acide chlorhydrique bromé ou additionné de chlorate de potasse, etc.) Précipiter ensuite par le chlorure de baryum l'acide sulfurique formé.

Causes d'erreur. — Mais, en présence de la grande quantité de sels de fer contenus dans la solution, même si l'on a soin de chasser par l'ébullition la plus grande partie des acides, d'étendre de beaucoup d'eau, et de faire bouillir longtemps avec le chlorure de baryum, la précipitation du sulfate de baryum est incomplète.

De plus, le précipité est toujours coloré par de l'oxyde de fer, que l'on ne peut éliminer sans une opération spéciale.

B. — En traitant 5 à 10 grammes de métal par du chlorure double de cuivre et de potassium ou de sodium, on peut dissoudre le fer sans oxyder ni dissoudre le soufre.

Prendre par gramme de métal environ 12 grammes de chlorure double de cuivre et de potassium cristallisé ($\text{Cu K}^2 \text{Cl}^4, 2 \text{H}^2\text{O}$) avec 40 centimètres cubes d'eau distillée et 5 centimètres cubes d'acide chlorhydrique. Remuer continuellement avec un agitateur, le métal s'attaque peu à peu, avec formation d'un dépôt de cuivre qui se dissout ensuite dans la liqueur contenant le sel double. L'attaque est souvent terminée en vingt à trente minutes; laisser encore un quart d'heure entre 50° et 60° avant de filtrer.

Le sulfure et le phosphore de fer restent insolubles avec le carbone et une partie de la silice.

Guide du constructeur d'automobiles

Recevoir ce résidu dans un petit filtre ; laver à l'eau chaude, sécher à température très douce, séparer du filtre qu'on nettoie avant de le brûler ; réunir les cendres et le résidu séparé et les mêler à un poids égal de nitre et cinq fois autant de carbonate de soude. Faire fondre dans un creuset de platine jusqu'à ce qu'il ne se dégage plus de gaz, dissoudre dans l'eau, filtrer pour séparer l'oxyde de fer et les autres substances insolubles, évaporer à sec pour séparer la silice, humecter d'acide chlorhydrique, redissoudre par l'eau chaude et précipiter par le chlorure de baryum en chauffant quelque temps à l'ébullition. On en déduit le soufre.

$$S = 13,74 \frac{P}{n}$$

(n représente le nombre de grammes de métal mis en expérience et P le poids trouvé de sulfate de baryum).

C. — Au moyen des acides non oxydants, on peut obtenir la volatilisation du soufre sans entraînement de fer ; le soufre se dégage à l'état d'hydrogène sulfuré (**a**). On peut aussi employer l'hydrogène et l'acide carbonique au rouge (procédé Rollet) (**b**). Enfin, on peut encore faire usage du chlore gazeux (méthode Schlöesing) (**c**).

a. — Boussingault recommande d'attaquer le métal par l'acide sulfurique étendu de cinq fois son volume d'eau et de recevoir l'hydrogène sulfuré dégagé dans une solution légèrement acide d'azotate d'argent.

Analyse chimique des métaux et alliages.

Ce procédé donne lieu à diverses erreurs.

Il est préférable d'attaquer à l'acide chlorhydrique et de recevoir les gaz, soit dans une solution ammoniacale de sulfate ou d'azotate de cadmium, de manière à former du sulfure que l'on pèse, sur filtre taré, après dessiccation à 100° :

$$S = 22,22 \frac{P}{n}$$

(n étant le nombre de grammes du métal), soit dans une solution ammoniacale de cuivre (Rivot) ou dans une dissolution d'acétate de plomb dans la potasse (Frésenius), le sulfure obtenu ne devant pas être pesé, mais transformé lui-même par voie humide ou par voie sèche, avec le résidu insoluble de l'attaque, en sulfate de baryte.

On peut enfin faire passer les gaz dégagés dans une solution oxydante afin de transformer directement l'hydrogène sulfuré en acide sulfurique. A cet effet, on emploie soit une dissolution de permanganate de potasse (Drown), soit de l'acide chlorhydrique bromé (Johnston), soit de l'eau oxygénée (Classen et Bauer).

b. — Le procédé Rollet, employé notamment dans le laboratoire des usines Schneider, au Creusot, est fondé sur la transformation totale du soufre combiné au fer en hydrogène sulfuré par l'action d'un mélange gazeux d'hydrogène (3/4) et d'acide carbonique (1/4) sur le métal porté au rouge vif dans un tube de porcelaine.

L'hydrogène est préparé au moyen de zinc assez

pur et d'acide sulfurique étendu ; il se purifie en passant dans trois flacons laveurs f^1 f^2 f^3 (fig. 56) remplis de solution acide d'azotate d'argent (25 grammes d'argent, 60 cm³ d'acide azotique, eau jusqu'à 1 litre) et dans un quatrième flacon f^4 avec de l'eau pure destinée à retirer les gaz ou gouttelettes, acide provenant des autres flacons. On peut aussi remplacer les deux premiers flacons par des tubes de Pélégot (tube en U avec boules) contenant l'un de la potasse et l'autre du permanganate.

L'acide carbonique est fourni par un appareil où l'on fait agir de l'acide chlorydrique étendu sur du carbonate de chaux exempt de sulfures autant que possible ; néanmoins, par précaution, on fait arriver le gaz dans le fond du troisième flacon f^3 , afin de le dépouiller de toute trace de soufre par l'azotate d'argent.

C'est donc dans ce flacon f^3 que se fait le mélange des deux gaz, hydrogène et anhydride carbonique. Le mélange des deux gaz passe encore dans une éprouvette E contenant des matières desséchantes, puis ce mélange est conduit par des tubes en verre à un tube de porcelaine T de 25 millimètres environ de diamètre intérieur, dans lequel on a étalé le métal à l'état de poudre ou de copeaux, en se servant d'une longue cuiller de fer, en forme de nacelle, que l'on fait tourner sur son axe ; le tube est fermé à ses deux extrémités par deux bouchons de caoutchouc désulfurés, traversés par des tubes de verre.

Le tube de porcelaine est placé dans un four constitué par deux briques taillées et est chauffé par un chalumeau Schlœsing à gaz d'éclairage et vent soufflé.

(La figure représente une rampe à gaz ordinaire

comme moyen de chauffage du tube T, mais il est préférable de faire usage d'un four établi comme nous venons de le dire.)

« Les gaz qui sortent du tube, entraînant l'hydrogène sulfuré, arrivent dans une série de boules *b* disposées de telle sorte que le dôme de chacune d'elles soit relié au fond de la suivante (fig. 56). Un bouchon de caoutchouc ferme hermétiquement le col de chacune d'elles. Dans chaque boule on a versé une même quantité connue d'une solution titrée d'azotate d'argent. L'hydrogène sulfuré est totalement absorbé par la première boule, tant que celle-ci renferme la moindre quantité d'argent dissous ; dès que tout l'argent est précipité, l'hy-

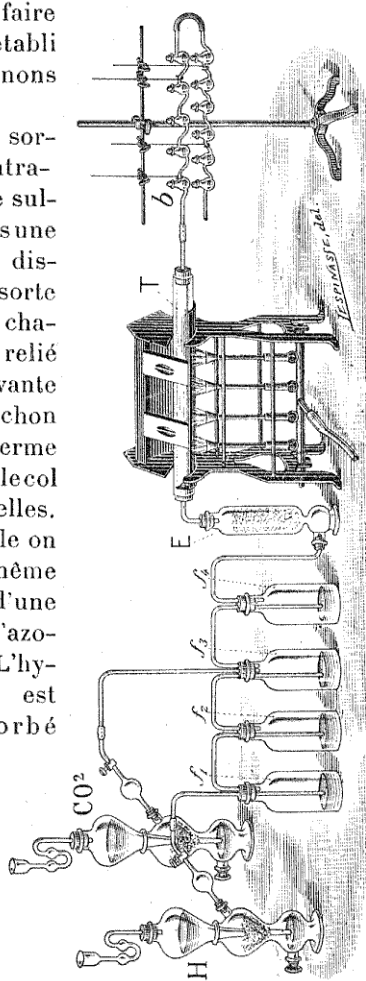


Fig 56.1 — Dosage du soufre par le procédé Rollet.

drogène sulfuré commence à parvenir à la boule suivante et à en colorer le liquide, tandis que le sulfure d'argent de la première s'agrège presque aussitôt. Il en est de même entre la deuxième et la troisième, ainsi de suite. Il suffit donc, lorsque l'opération est terminée, de compter le nombre de boules qui contiennent un précipité pour connaître le nombre de dix millièmes de soufre. La coloration de la dernière boule, où le précipité ne s'est pas déposé, peut être prise comme correspondant à un demi-dix millième ou 0,005 0/0. L'approximation dépend de la quantité d'argent que renferme une boule, l'erreur étant évidemment toujours moindre que la moitié de cette quantité.

« On peut rendre l'estimation plus précise encore en ajoutant après coup, dans la dernière boule dont le liquide s'est coloré, une goutte d'acide chlorhydrique et appréciant à la vue le précipité qui se forme.

« La solution titrée d'azotate d'argent se prépare en dissolvant 2 gr. 250 d'argent fin, obtenus par réduction du chlorure, dans 12 centimètres cubes d'acide azotique à 36° B et ajoutant de l'eau jusqu'à 1 litre. Chaque centimètre cube de cette dissolution correspond à 0 mgr. 33 de soufre ou, par conséquent, à 0,033 0/0 sur une prise d'essai de 1 gramme. On en verse dans chaque boule exactement 3 cm³, au moyen d'une burette graduée en dixièmes de centimètre cube. Chaque boule doit donc retenir exactement 1 milligramme de soufre ou 0,10 0/0. »

c. — La méthode Schlœsing emploie un courant de chlore bien sec produisant la volatilisation complète du soufre sous forme de chlorure qui, dans

Analyse chimique des métaux et alliages.

l'eau, se condense complètement à l'état d'acide sulfurique. Le chlorure de fer est retenu par une colonne de chlorure de potassium, le soufre est donc dosé aisément et avec exactitude à l'état de sulfate de baryte.

Cette méthode est longue et délicate, mais, outre qu'elle est très précise, elle conduit, en même temps, à la détermination de divers éléments (phosphore, arsenic, laitier).

Aussi mériterait-elle, dit M. Carnot, d'être pratiquée plus souvent qu'elle ne l'est, en effet, si l'on ne préférerait exécuter pour chaque élément une opération spéciale sur un poids de métal approprié au dosage que l'on a en vue.

Méthodes colorimétriques. — De même que pour le dosage du carbone, diverses méthodes colorimétriques ont été proposées pour le dosage du soufre.

Elles sont presque toutes fondées sur le dégagement du soufre à l'état d'hydrogène sulfuré par lequel on fait noircir des papiers réactifs à l'acétate de plomb ou de la toile au cadmium; on compare ensuite la teinte obtenue à celle produite simultanément, dans la même opération, par un métal type, à teneur connue.

* * *

3. Dosage du phosphore. — Diverses expériences ont démontré qu'il faut éliminer, pour l'attaque des fontes et fers phosphoreux, l'acide chlorhydrique et l'eau régale. On fait donc usage d'acide azotique seul. Après l'attaque, on peut brûler la matière organique dissoute provenant du carbone; la précipi-

tation du phosphomolybdate se fait bien en liqueur azotique ou sulfurique. Le dosage est plus précis sous forme de phosphomolybdate desséché (coefficient = 0,0163) que sous celle de pyrophosphate de magnésie (coefficient = 0,2793), au moins quand la teneur en phosphore est faible.

A. — Dosage à l'état de phosphomolybdate.
(Méthode employée notamment à l'usine Schneider, au Creusot). — Attaquer par l'acide azotique de densité 1,20, soit 1 gramme de métal, soit 0 gr. 500, 0 gr. 200 ou 0 gr. 100 suivant la teneur supposée en phosphore. Lorsque l'attaque est terminée, ajouter 5 centimètres cubes d'acide chlorhydrique, évaporer à sec (pour rendre la silice insoluble), reprendre par l'eau régale (3 centimètres cubes d'acide azotique + 3 centimètres cubes d'acide chlorhydrique). Chauffer à l'ébullition, en couvrant le vase d'un verre de montre; ajouter 8 à 10 centimètres cubes d'eau, et après dissolution, filtrer sur un filtre sans plis. Recevoir la liqueur dans une solution azotique de molybdate d'ammoniaque préparée à l'avance. Laver le filtre une ou deux fois avec de l'eau acidulée à 1/200 d'acide azotique, de manière que le volume de la liqueur ne dépasse pas 25 centimètres cubes.

Chauffer trois heures au bain-marie vers 42° à 45°. Le précipité de phosphomolybdate est recueilli sur un filtre double, desséché préalablement et exactement taré. Laver le précipité trois fois avec de l'eau à 20/0 d'acide azotique. Sécher à l'étuve à 100°. Quand le filtre commence à prendre une teinte bleuâtre,

Analyse chimique des métaux et alliages.

peser et multiplier par $\frac{1,63}{n}$ pour avoir la teneur en phosphore.

Cette méthode est très simple, mais donne lieu à des erreurs notables. Aussi, lui préfère-t-on souvent la suivante :

B. — Dosage à l'état de pyrophosphate de magnésie. — Attaquer comme dans (A) par l'acide azotique et l'acide chlorhydrique. Evaporer à sec, reprendre par l'eau régale pour laisser la silice insoluble.

Saturer la liqueur par l'ammoniaque. Porter à l'ébullition. Le volumineux précipité d'hydrate ferrique entraîne tout l'acide phosphorique. Recueillir le précipité, le sécher et calciner avec du sulfate de soude pendant dix minutes à la température du soufflet d'émailleur, avec une quantité de sulfate de soude suffisante pour imprégner toute la masse. L'acide phosphorique, dans ces conditions, passe tout entier à l'état d'orthophosphate de soude.

Dissoudre les sels alcalins dans la plus petite quantité d'eau possible. Filtrer et précipiter l'acide phosphorique à l'état de phosphate ammoniaco-magnésien. Recueillir, calciner, peser le précipité. On a la teneur en centièmes en multipliant par 27,93.

L'opération ne donne pas une bien grande précision pour l'estimation de faibles quantités de phosphore.

Méthode de M. Ad. Carnot (1). — « On opère

(1) *Annales des Mines*, 2^e vol. de 1893, p. 5.

Guide du constructeur d'automobiles

sur une prise d'essai de 5 grammes pour les fers, les aciers ou les fontes pures ; il suffit de 1 gramme ou même 0 gr. 500 pour les fontes phosphoreuses.

« Le métal est attaqué par 40 centimètres cubes d'acide nitrique pur dans une capsule de porcelaine ou une capsule de platine suffisamment grande, qu'on recouvre aussitôt d'un entonnoir renversé, afin d'éviter les projections de gouttelettes liquides. Quand l'effervescence s'arrête, on chauffe doucement pour compléter l'attaque et on lave l'entonnoir avec un peu d'eau, qu'on reçoit dans la capsule.

« On y verse, tout en agitant le liquide avec une baguette de verre, 10 centimètres cubes d'acide sulfurique concentré (2 centimètres cubes par gramme de métal). Il se produit un magma volumineux qui se redissout par l'agitation et la chaleur. On évapore doucement, soit sur un petit brûleur à couronne, en remuant constamment pendant un quart d'heure, soit au bain de sable en laissant chauffer pendant un temps plus long ; la masse devient bientôt pâteuse, puis se dessèche et se réduit en grumeaux faciles à écraser avec la baguette.

« On porte à l'étuve et on maintient à une température de 120 à 125 degrés pendant deux heures, de manière à chasser entièrement l'acide azotique et à rendre la silice bien insoluble dans toute la masse.

« On redissout ensuite par 50 centimètres cubes environ d'eau bouillante et on lave avec une égale quantité d'eau sur un filtre, en recevant les liquides dans une fiole d'un demi-litre.

« La silice reste sur le filtre ; elle est habituellement

Analyse chimique des métaux et alliages.

colorée en noir ou en gris par le graphite et peut être mêlée de peroxyde de manganèse.

« On dissout ce dernier, au-dessus d'une autre fiole, par un peu d'acide chlorhydrique concentré (ou par quelques centimètres cubes d'un mélange d'acide azotique et d'eau oxygénée) et on lave à l'eau chaude. On calcine, pour brûler le graphite, et on pèse la silice, qui est devenue blanche. Ce poids multiplié par le coefficient 0,4667, fournit un bon dosage du *silicium*, comme dans la méthode de Drown et Shimer, en observant les précautions suivantes :

« Si l'on a employé une capsule de porcelaine, il convient de retrancher 1 millig. $1/2$ du poids trouvé pour la silice. Si l'on s'est servi d'un vase de platine, il faut, après calcination et pesée, traiter le résidu par un peu d'acide fluorhydrique pur, évaporer, calciner et peser de nouveau ; la différence des deux pesées donne le poids de la silice $Si O^2$.

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

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

« On ajoute à la liqueur, réduite à 40 centimètres cubes environ, 4 grammes de sulfate d'ammoniaque, puis on y verse 50 centimètres cubes de la solution

molybdique à 5 0/0 environ, préparée comme de coutume (1), et on maintient à 100 degrés pendant une heure au moins, temps nécessaire pour que la précipitation soit bien complète. On laisse reposer et refroidir, afin de ne pas risquer d'introduire de matière organique dans la liqueur par l'action de l'acide azotique chaud sur le papier, puis on décante le liquide sur un filtre et on lave le dépôt dans la fiole avec de l'eau tiède additionnée d'un vingtième de son volume de la solution molybdique, jusqu'à ce que le liquide versé sur le filtre ne se colore plus que très faiblement en rose par le sulfocyanure d'ammonium, c'est-à-dire ne contienne plus que des traces négligeables de fer.

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

« On dissout alors le précipité dans la fiole par la moindre quantité possible, 15 centimètres cubes par exemple, d'ammoniaque étendue de son volume d'eau chaude, et plaçant sur un petit matras de 150 centimètres cubes l'entonnoir avec le filtre sur lequel on avait décanté la liqueur acide, on y fait passer la solution ammoniacale, on lave la fiole et le filtre avec 50 centimètres cubes d'eau bouillante, un peu ammoniacale, en s'aidant de la trompe.

« Le filtre a pu retenir de petites quantités d'hydrate et de phosphate ferrique; on les redissoudra plus

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

Analyse chimique des métaux et alliages.

tard par quelques gouttes d'acide nitrique étendu et chaud, que l'on ajoutera à la liqueur acide.

« La solution ammoniacale, filtrée et refroidie, est peu à peu neutralisée par l'acide azotique, en évitant que la température s'élève au-dessus de 40 degrés ; lorsqu'il commence à se former un précipité jaune, que l'agitation ne redissout pas, on ajoute, en surplus, 2 centimètres cubes d'acide nitrique pur et la petite quantité d'acide dilué qui a servi à laver le filtre. On abandonne deux heures à la température de 40 degrés environ pour la précipitation du phosphomolybdate d'ammoniaque.

« Le liquide est alors décanté sur un filtre taré et remplacé par de l'eau acidulée avec 1 0/0 d'acide azotique. On y ajoute un peu de solution molybdique et on laisse pendant une heure, pour s'assurer qu'il ne se fait pas de dépôt.

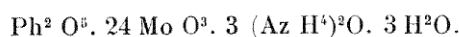
« Après deux ou trois lavages, on fait passer le précipité sur le filtre, on le lave à la trompe avec un peu d'eau distillée, on le sèche à l'étuve à 100 degrés et on le pèse dans un petit flacon spécial à large ouverture où le filtre, bien que devenu un peu cassant, puisse entrer sans se briser.

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

« Le poids du phosphore contenu s'obtient en mul-

Guide du constructeur d'automobiles

Multipliant le poids du précipité desséché par le coefficient 0,01628, la formule de composition du précipité étant, d'après les expériences de M. Carnot :



La teneur, pour 100, en phosphore est donc :

$$\text{Ph} = 1,628 \frac{p}{n}$$

Dosage volumétrique. — Lorsqu'on a suivi la méthode précédente jusqu'à la seconde précipitation du phosphomolybdate, on peut remplacer le dosage pondéral par un dosage volumétrique basé sur la réduction de l'acide molybdique à un état inférieur d'oxydation par l'emploi du zinc et de l'acide sulfurique, suivi d'une oxydation nouvelle effectuée à l'aide d'une solution de permanganate de potasse titré.

*
* * *

4. Dosage du silicium. — Pour réussir le dosage du silicium, il est de toute nécessité d'oxyder entièrement le silicium et de rendre la silice insoluble.

Le dosage peut se faire par voie sèche ou par voie humide.

I. Dosage par voie sèche. — Le métal, en limaille fine, est d'abord oxydé par simple chauffage au rouge dans une nacelle de platine, au moufle; le silicium s'oxyde en même temps.

Après deux ou trois heures, on place la nacelle dans un tube de porcelaine chauffé et traversé par un courant d'acide chlorhydrique pur et sec. Le fer est

Analyse chimique des métaux et alliages.

transformé en chlorure de fer volatil qui est entraîné, et la silice reste dans la nacelle, où on peut la peser.

II. Dosage par voie humide. — On attaque le métal, aussi divisé que possible, par l'acide azotique (de densité = 1,20) ajouté peu à peu dans une capsule de platine (1) [1 gramme de fonte grise, 2 ou 3 grammes d'acier + 20 cm³ d'acide par gramme de métal].

Chauffer à l'ébullition au bain de sable. Laisser refroidir, verser de l'acide sulfurique pur (5 cm³ d'acide concentré par gramme de métal + 3 volumes d'eau). Chauffer au bain de sable jusqu'à expulsion complète de l'acide azotique.

Laisser refroidir, reprendre par l'eau et chauffer pour obtenir la dissolution du sulfate; décantier la liqueur chaude sur un filtre en papier pur (lavé à l'acide fluorhydrique et à l'acide chlorhydrique afin d'enlever la silice et la chaux), laver le résidu avec 25 à 30 cm³ d'acide chlorhydrique pur ($d = 1,20$), puis à l'eau pure et bien chaude. Calciner, peser la silice. Si celle-ci paraît impure, la traiter par quelques gouttes d'acide fluorhydrique pur; calciner le résidu et peser de nouveau. La différence est la silice pure. On a le silicium en multipliant par 0,4667. (Th. Drown et P. Shimer.)

* * *

5. Dosage du manganèse. — Les méthodes diffèrent suivant qu'il s'agit d'un métal riche en man-

(1) De préférence à la porcelaine, qui est une cause d'erreur et charge le poids de silice.

Guide du constructeur d'automobiles

ganèse (ferro-manganèse, spiegel, etc.) ou d'un acier au manganèse, à faible teneur.

Ce deuxième cas nous intéresse seul.

Lorsque la teneur d'un fer ou d'un acier en manganèse est inférieure à 2 0/0, on se sert, de préférence, des méthodes fondées sur la production de combinaisons suroxygénées de manganèse, formant des solutions colorées en rose (Carnot).

Nous ne décrivons que la méthode colorimétrique par les *métaphosphates manganiques* (méthode d'Osmond, modifiée par M. Carnot).

Ces sels forment des solutions pourpres, moins colorées que celles de permanganate, mais plus stables en présence d'acide azotique, pouvant être filtrées au papier et susceptibles de se conserver plusieurs jours sans altération de teinte, ce qui est précieux.

Attaquer 0 gr. 250 de métal en copeaux ou en poudre par une faible quantité d'acide chlorhydrique. Evaporer doucement à sec. Redissoudre dans 3 ou 4 cm³ d'acide azotique ($d = 1,20$) et verser *d'un seul coup* 30 cm³ d'une solution à 12 0/0 de métaphosphate de soude. Agiter la liqueur (qui est incolore) et y ajouter, par petites portions, 2 ou 3 grammes en tout de bioxyde de plomb, en remuant chaque fois, jusqu'à ce que l'on sente une faible odeur de chlore. Etendre à 50 cm³ dans une éprouvette jaugée et filtrer sur filtre double, placé au-dessus du vase où l'on veut recueillir le liquide. (Il faut éviter le contact prolongé entre la liqueur et le bioxyde de plomb après le moment où s'est fait sentir l'odeur de chlore.)

Analyse chimique des métaux et alliages.

La liqueur type est préparée de même avec du manganèse exempt de fer. [Solution de métaphosphate manganique à 0 mgr. 10 de manganèse par cm^3 , préparée avec 69 millig. 4 d'oxyde salin Mn^2O^3 , dans 500 cm^3 de solution, par la même opération que ci-dessus.] On prépare, alors, avec cette liqueur type ou liqueur mère, une série de types à 0,1; 0,2; 0,3 0/0, etc., de manganèse.

Il ne reste qu'à faire la comparaison entre la liqueur obtenue par l'attaque du métal analysé et les divers types.

* * *

6. Dosage du nickel. — *Séparation du fer de divers autres métaux par l'éther.* — Pour doser les divers métaux qui peuvent se rencontrer dans les fontes, fers ou aciers, il y a souvent intérêt à les isoler de la majeure partie du fer. Cette séparation est facile à réaliser, grâce à la méthode indiquée par J. Rothe, premier chimiste du laboratoire de recherches techniques de Berlin.

Nous n'indiquerons que le principe de cette méthode (1) :

« On peut enlever par l'éther, à une solution chlorhydrique aqueuse, la majeure partie du fer qu'elle contient, pourvu qu'il soit à l'état de perchlorure, sans lui enlever les autres chlorures métalliques. Le fait a été expliqué par la formation d'une combinaison spéciale de l'éther avec une molécule de Fe^2Cl^6 et deux molécules de HCl . »

En faisant l'opération dans un tube vertical à

(1) V. Carnot, *loc. cit.*, p. 123.

robinet à la partie inférieure (fig. 57), il est facile, par décantation, de séparer la liqueur d'éther (contenant le chlorure de fer), qui surnage, de la solution aqueuse des autres chlorures métalliques.

Pour le dosage du nickel, en particulier, cette méthode est extrêmement précieuse, car elle supprime la difficulté du dosage du nickel en présence d'un excès considérable de fer.

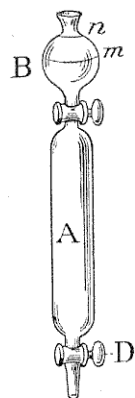


Fig. 57.

Attaquer 5 grammes d'acier par 40 cm³ environ d'acide chlorhydrique. Evaporer à sec, chauffer le résidu à 120° (pour insolubiliser la silice). Reprendre par 20 cm³ environ d'acide chlorhydrique concentré, chauffer, ajouter 2 à 3 volumes d'eau ; filtrer. Peroxyder par 2 à 3 cm³ d'acide azotique ($d = 1,40$), goutte à goutte, à la température de l'ébullition. Lorsque la liqueur est rouge, évaporer doucement jusqu'à ce

qu'on n'ait plus que 10 à 15 cm³ de liquide sirupeux.

Appliquer alors le traitement de Rothe, par l'éther. La solution aqueuse renferme la totalité du nickel à l'état de chlorure, avec les autres métaux et 10/0 au plus de Fe³ Cl⁶ (les 99 0/0 sont passés dans la solution éthérée).

Faire bouillir la liqueur aqueuse, ajouter de l'eau, puis 2 à 3 cm³ d'eau oxygénée et un excès d'ammoniaque. On précipite la totalité du manganèse (et du fer, s'il y en a), sous forme de Mn⁶ O¹¹ (et Fe² O³). Ces oxydes retiennent un peu de nickel : on les

Analyse chimique des métaux et alliages.

reprend (acide chlorhydrique, eau, eau oxygénée, ammoniacale, ébullition).

[Dans le précipité, on peut doser le manganèse par une méthode volumétrique.]

La solution ammoniacale contient le nickel. Ajouter de l'acétate et du sulfhydrate d'ammoniacale, décomposer par un excès notable d'acide acétique et porter à l'ébullition. Recevoir sur filtre sans cendres le sulfure de nickel mêlé de soufre. Sécher, griller le filtre avec le précipité, puis traiter les cendres par l'acide azotique. Évaporer et calciner dans un petit creuset taré. On pèse le résidu qui est l'oxyde de nickel Ni O. On a, en centièmes :

$$\text{Ni} = 78,67 \frac{\text{P}}{n}$$

Ainsi que nous l'avons vu antérieurement (II^e partie, chapitre V), les aciers au nickel sont de plus en plus employés dans l'industrie automobile. Les procédés de dosage du nickel ont donc un très grand intérêt.

* * *

7. Dosage du chrome. — Nous ne considérerons ici que les aciers à faible teneur en chrome, les seuls qui nous intéressent : les ferro-chromes à plus de 50 0/0 de chrome sont des produits du domaine de la métallurgie.

Les aciers chromés à faible teneur sont entièrement attaquables par les acides.

Attaquer 1 à 3 grammes (suivant la teneur présumée) par l'acide chlorhydrique dans une capsule de platine. Évaporer à siccité; ajouter trois ou quatre

parties de carbonate de potasse pur et sec et chauffer. Maintenir en pleine fusion pendant un quart d'heure en projetant à plusieurs reprises un peu de nître pulvérisé et remuant avec la spatule de platine.

Laisser refroidir; reprendre par l'eau bouillante, qui dissout entièrement le chromate avec d'autres sels alcalins (manganate, silicate, carbonate, chlorure, etc.).

La masse d'oxyde de fer reste insoluble. La laver par décantation sur un filtre.

La liqueur est acidifiée par l'acide azotique. Évaporer à sec, maintenir quelque temps à 100° pour rendre la silice insoluble. Reprendre par l'acide azotique étendu qui dissout tout le chromate, tandis que la presque totalité du manganèse reste à l'état de bioxyde avec la silice.

Reste à doser le chrome dans la liqueur. On peut le faire par dosage pondéral ou par dosage volumétrique. Nous ne parlerons que du deuxième procédé, beaucoup plus rapide et d'ailleurs très précis.

Le dosage volumétrique repose toujours sur une réduction opérée en liqueur acide.

Dosage volumétrique du chrome par l'eau oxygénée (méthode de M. Ad. Carnot). — La méthode est fondée sur l'observation suivante : « dans une solution de chromate, faiblement acidifiée par l'acide chlorhydrique ou l'acide sulfurique, l'addition d'un peu d'eau oxygénée produit une coloration bleue (réaction de Barreswill), due à une combinaison d'acide perchromique et d'eau oxygénée. » Après quelques secondes, la coloration disparaît, mais une nouvelle addition d'eau oxygénée la fait reparaitre, et ainsi

Analyse chimique des métaux et alliages.

de suite, tant qu'il reste de l'acide chromique dans la liqueur.

La quantité d'acide chromique réduit est exactement proportionnelle à la quantité d'eau oxygénée introduite. Il suffit donc de titrer celle-ci au moyen d'une solution titrée de bichromate de potasse, et, à chaque dosage, de mesurer le volume d'eau oxygénée employé.

Pour titrer l'eau oxygénée, on fait une solution de 2 gr. 812 de bichromate de potasse fondu dans 1 litre d'eau (correspondant à 1 milligramme de chrome par centimètre cube).

On fait usage d'eau oxygénée étendue (eau oxygénée à 10 volumes étendue de 10 fois son volume d'eau pure). Placer alors dans un vase à fond plat 10 ou 20 cm³ de solution de bichromate + 40 ou 30 cm³ d'eau pure (pour former toujours à peu près le même volume total). Ajouter 1 cm³ d'acide chlorhydrique ou d'acide sulfurique pur étendu de 3 volumes d'eau, et faire couler l'eau oxygénée contenue dans une burette graduée à robinet de verre.

Agiter sans cesse le vase contenant le bichromate, et arrêter l'opération lorsque la dernière goutte a cessé de produire une tache bleue dans la solution. Soit V le volume d'eau oxygénée employé.

Opérer de même sur la solution de bichromate à doser. Soit V' le volume d'eau oxygénée.

Si l'on a opéré sur 10 cm³ de solution titrée de bichromate, on a :

$$\text{Cr} = 10 \text{ milligr.} \times \frac{V'}{V}$$

pour le poids du chrome qui se trouvait à l'état de

chromate dans la solution provenant de la prise d'essai (1).

* * *

8. Dosage du tungstène. — Attaquer par l'eau régale 1 à 5 grammes d'acier (suivant la teneur présumée) en copeaux très fins, dans une capsule de porcelaine. Après attaque complète, évaporer à sec, maintenir quelque temps entre 100 et 110°. Redissoudre l'oxyde de fer et les autres oxydes par l'acide chlorhydrique, en chauffant à 100°. Décanter, laver à l'eau chlorhydrique.

Le résidu est de l'acide tungstique, de la silice, du graphite et souvent de petites parties de métal non attaqué. Calciner pour brûler le graphite. Mélanger dans un creuset de platine avec cinq parties de bisulfate de potasse, fondre au rouge pour parfaire l'attaque.

Laisser refroidir. Reprendre la matière par l'eau froide d'abord, puis par l'eau bouillante (ce qui enlève les sels de fer et de potasse et l'acide titanique, s'il y en avait). Reprendre le résidu par le sulfhydrate d'ammoniaque, qui dissout tout le tungstène et laisse la silice. Évaporer à sec la dissolution. Calciner légèrement le résidu (pour brûler le soufre), humecter d'acide azotique, sécher, calciner et peser. Le résidu final est de l'acide tungstique $Tu O_3$. Et on a, pour le tungstène 0/0 :

$$Tu = 79,31 \frac{P}{n}$$

(1) *Annales des Mines*, 1894, T. II, p. 550.



9. Dosage de l'aluminium. — Nous ne considérerons que le cas de faibles teneurs en aluminium, car les ferro-aluminiums à forte teneur n'intéressent que les métallurgistes.

Attaquer 5 à 10 grammes de métal par l'acide chlorhydrique dans une capsule de platine recouverte d'une feuille de platine (1).

Dès que le métal est dissous, ajouter de l'eau distillée et filtrer, en recueillant la liqueur dans une fiole.

Neutraliser la plus grande partie de l'acide libre par l'ammoniaque, puis par le carbonate de soude. Ajouter de l'hyposulfite de soude : lorsque la coloration violette de la liqueur a disparu (réduction du sel ferrique), verser 2 ou 3 cm³ d'une solution saturée de phosphate de soude, et 20 cm³ d'une solution d'acétate de soude (5 à 6 gr.). Chauffer à l'ébullition pendant environ trois quarts d'heure.

Il se fait un précipité de phosphate d'alumine mêlé de soufre, avec un peu de silice et de phosphate ferrique. Le recevoir sur un filtre, laver à l'eau bouillante et le redissoudre par 10 à 15 cm³ d'acide chlorhydrique étendu et chaud.

Évaporer la solution à sec ; maintenir le résidu à 100° pendant une heure (pour rendre la silice complètement insoluble dans les acides). Reprendre par un peu d'acide chlorhydrique étendu, à chaud, filtrer ; étendre de 100 cm³ d'eau froide. Précipiter à

(1) On évite l'emploi du verre et de la porcelaine, pour ne pas risquer d'introduire dans le liquide de l'alumine provenant des vases.

nouveau dans cette solution, comme ci-dessus, le phosphate d'alumine. Filtrer et recevoir le précipité sur un petit filtre en papier Schleicher. Sécher, calciner, peser : on a $P^3O^5Al^2O^3$, renfermant 22,45 0/0 d'aluminium (méthode de M. Ad. Carnot, 1882).

Avec l'aluminium, nous terminons l'étude des procédés de dosage des principaux éléments contenus (ou dont la présence est, au contraire, à éviter) dans les fontes, fers et aciers employés dans la construction automobile.

* * *

II. Analyse des bronzes et des laitons

Nous passerons beaucoup plus rapidement sur ces analyses que sur celles des fontes et aciers, car, ainsi que nous avons eu plusieurs fois l'occasion de le signaler, les fontes et les aciers sont, de beaucoup, les métaux les plus employés dans l'industrie automobile.

De plus, de par leurs applications mêmes (à toutes les pièces ayant à supporter des efforts importants), l'analyse des aciers et des fontes a infiniment plus d'intérêt que celle des bronzes et des laitons.

Nous nous bornerons donc à quelques indications rapides sur ces analyses.

1. Analyse d'un bronze ordinaire. — Les bronzes ordinaires sont composés de cuivre et d'étain ; ils peuvent renfermer de faibles quantités de zinc, de plomb, de fer et de nickel.

Analyse chimique des métaux et alliages.

Il faut éviter d'attaquer le bronze par l'acide azotique concentré, car il se formerait de l'acide stannique SnO_2 qui retiendrait tout le plomb si le bronze en contenait.

La meilleure méthode est la suivante :

Prendre 1 gramme de bronze et l'attaquer par 9 à 10 centimètres cubes d'acide azotique étendu de son volume d'eau (de densité 1,35 environ). Couvrir le vase où se fait l'attaque et porter rapidement à l'ébullition. Ajouter 2 à 3 volumes d'eau et faire bouillir pour rendre bien insoluble dans l'acide azotique l'acide stannique formé. Si le bronze renferme du silicium, la silice se déposera avec l'acide stannique. Nous avons une solution **S** et un précipité **P**.

Recueillir le précipité **P** d'acide stannique SnO_2 ; après calcination, on pourra le peser directement et on en déduira la teneur en étain. Mais, si le précipité contient de la silice, il faudra une opération complémentaire pour avoir le poids exact d'étain. Pour cela, placer le précipité dans une nacelle disposée dans un tube de porcelaine et faire passer, au rouge, un courant d'hydrogène : l'acide stannique sera réduit. Redissoudre alors l'étain réduit par cette opération : la silice restera insoluble : on en déterminera le poids qu'il faudra retrancher du poids d'acide stannique obtenu précédemment : on en déduira le poids exact de SnO_2 et, par suite, la teneur en *étain* du bronze.

Nous avons donc maintenant le poids d'étain contenu dans notre bronze.

Reprenons la solution **S** : elle renferme le cuivre

et, généralement, des traces de zinc, de plomb et de fer.

Ajouter à la solution de l'acide sulfurique étendu, évaporer jusqu'à production de vapeurs d'acide sulfurique pour éliminer l'acide azotique. Laisser refroidir et reprendre par l'eau froide : nous obtenons un précipité P_1 et une nouvelle solution S_1 ; laver le précipité P_1 en agitant avec une baguette de verre et ajouter de l'alcool : on laisse ainsi le précipité P_1 de sulfate de plomb So^4Pb insoluble, qu'on décante, calcine et pèse. On en déduit le poids de *plomb*.

Reprendre la solution S_1 ; chasser l'alcool par évaporation, puis ajouter de l'eau et de l'acide sulfurique étendu. Porter à l'ébullition et ajouter du sulfure de sodium en solution ; le cuivre est précipité à l'état de sulfure Cu^2S .

La pesée de ce précipité P_2 donne la teneur en *cuivre*.

Il reste une solution S_2 renfermant le fer et le nickel.

En y ajoutant un peu d'acide azotique et faisant bouillir, on détruit les composés thioniques ; oxyder le fer, de préférence par addition d'eau oxygénée et précipiter le fer à l'état d'oxyde par l'ammoniaque. Le précipité P_3 contient tout le fer à l'état de sesquioxyde (s'il y avait du manganèse, celui-ci serait précipité en même temps). Le précipité P_3 recueilli, calciné et pesé donne la teneur en *fer*.

La solution S_3 ne contient plus que le nickel et le zinc : chasser l'excès d'ammoniaque par chauffage ; neutraliser la liqueur par le carbonate d'ammoniaque ; ajouter 1 centimètre cube d'acide oxalique

Analyse chimique des métaux et alliages

et faire passer un courant d'hydrogène sulfuré : on obtient un précipité \mathbf{P}_4 de sulfure de zinc ZnS permettant de déterminer la teneur en *zinc*.

Enfin, en ajoutant à la solution \mathbf{S}_4 de l'acétate d'ammoniaque et faisant passer à nouveau un courant d'hydrogène sulfuré, on précipite le *nickel*.

La marche à suivre pour faire cette analyse peut être résumée par le tableau synoptique que nous donnons à la page suivante :

Tableau synoptique de l'analyse d'un bronze ordinaire

<p>1° Précipité P de SnO^2 et SiO^2 donnant teneur en.....</p> <p>2° Solution S. Ajouter SO^2H_2, étendre de son volume d'eau à l'ébullition, on obtient :</p>	<p>2° Solution S. Chasser l'alcool, ajouter SO^2H_2 et précipiter à l'ébullition par Na^2S; on a :</p>	<p>2° Solution S. Ajouter AzO^3H faire bouillir; oxyder par H_2O_2 et précipiter par NH_3; on a :</p>	<p>4° Précipité P de ZnS donnant teneur en.....</p>	<p>1° Précipité P de Cu^2S donnant teneur en.....</p>	<p>1° Précipité P de SO^2Pb donnant teneur en.....</p>	<p>1° Précipité P de Fe^2O_3 hydraté donnant teneur en.....</p>	<p>1° Précipité P de SnO^2 et SiO^2 donnant teneur en.....</p>	<p>Etain.</p>	<p>Plomb.</p>	<p>Nickel.</p>
<p>2° Solution S. Ajouter SO^2H_2, étendre de son volume d'eau à l'ébullition, on obtient :</p>	<p>2° Solution S. Chasser l'alcool, ajouter SO^2H_2 et précipiter à l'ébullition par Na^2S; on a :</p>	<p>2° Solution S. Ajouter AzO^3H faire bouillir; oxyder par H_2O_2 et précipiter par NH_3; on a :</p>	<p>4° Précipité P de ZnS donnant teneur en.....</p>	<p>1° Précipité P de Cu^2S donnant teneur en.....</p>	<p>1° Précipité P de SO^2Pb donnant teneur en.....</p>	<p>1° Précipité P de Fe^2O_3 hydraté donnant teneur en.....</p>	<p>1° Précipité P de SnO^2 et SiO^2 donnant teneur en.....</p>	<p>Etain.</p>	<p>Plomb.</p>	<p>Nickel.</p>

2. Analyse d'un bronze phosphoreux. — Les éléments à doser dans un bronze phosphoreux sont : le cuivre, l'étain, le phosphore et le manganèse.

Attaquer 1 ou 2 grammes de métal par l'acide azotique comme dans le cas d'un bronze ordinaire. Evaporer presque jusqu'à siccité, reprendre par l'eau, filtrer, laver assez longtemps; on sépare ainsi le précipité **P** d'acide stannique SnO_2 retenant en outre tout le phosphore.

Dans la solution **S**, il reste le cuivre et le manganèse.

Il s'agit de séparer l'étain du phosphore dans le précipité **P**. Pour cela, mettre à digérer le précipité humide avec une solution concentrée de sulfure de sodium ou d'ammonium. On arrive ainsi à dissoudre (formation d'un sulfo-sel) le sulfure d'étain formé, en même temps que l'acide phosphorique. En décomposant alors la liqueur par l'acide chlorhydrique, on obtient un précipité **P₁** et une nouvelle liqueur **S₁**; le précipité **P₁** est du sulfure d'étain SnS_2 que l'on transforme par grillage en bioxyde SnO_2 , forme sous laquelle on fera la pesée pour avoir la teneur en *étain*.

Dans la solution **S₁**, on dose le phosphore en précipitant par la mixture magnésienne (1), après addition d'un excès d'ammoniaque. On abandonne la solution au repos pendant plusieurs heures (le précipité se formant très lentement, surtout si la teneur

(1) Composé de :

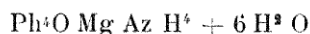
1 partie de sulfate de magnésium So^4Mg , 6 H^2O ;

1 partie de chlorure d'ammonium AzH^+Cl ;

8 parties d'eau;

4 parties d'ammoniaque.

en phosphore est faible). Le précipité de phosphate ammoniaco-magnésien :



est séparé par décantation et lavé rapidement sur un filtre avec un mélange de une partie d'eau et deux parties d'ammoniaque dans lequel il est pratiquement insoluble.

S'il reste un peu de précipité adhérent aux parois de la fiole dans laquelle a été faite la précipitation, on le dissout dans quelques gouttes d'acide azotique, puis on ajoute une faible quantité de mixture magnésienne et d'ammoniaque ; dans cette solution concentrée, le précipité est complet après un quart d'heure ; faire passer ce précipité sur le filtre pour le réunir à la partie séparée ci-dessus. Brûler le filtre, réunir les cendres au précipité et calciner le tout. On obtient ainsi le pyrophosphate de magnésie : $\text{Ph}^2\text{O} \cdot \text{Mg}^2$, forme sous laquelle se fait la pesée.

100 grammes de ce pyrophosphate renferment 63,87 grammes d'acide phosphorique Ph^2O^5 contenant lui-même 0,43662 de phosphore.

Nous avons insisté un peu longuement sur le dosage du phosphore parce que c'est une opération minutieuse et qui demande à être faite avec soin.

Revenons maintenant à la solution **S** qui contient le cuivre et le manganèse de notre bronze phosphoreux.

Transformer la liqueur en solution chlorhydrique ou sulfurique (1) et faire passer pendant assez long-

(1) De préférence en solution chlorhydrique pour faciliter le dosage ultérieur du manganèse.

temps un courant d'hydrogène sulfuré. Boucher la fiole contenant la liqueur et laisser déposer jusqu'à ce que la liqueur S^2 soit incolore ; laver sur un filtre le précipité P_2 de sulfure de cuivre Cu^2S avec de l'eau contenant de l'hydrogène sulfuré dissous ; sécher à 100° , brûler le filtre à part, réunir les cendres au précipité, ajouter du soufre en poudre dans un creuset de porcelaine taré et chauffer dans un double creuset (ou dans un creuset de Rose, dans un courant d'hydrogène). On obtient ainsi Cu^2S que l'on pèse ; le sulfure Cu^2S contient 79,85 0/0 de cuivre.

On peut encore, pour terminer l'opération, laisser entrer l'air vers la fin du chauffage dans le creuset ; on brûle le soufre à une température inférieure à la température de formation du sulfate. On aura ainsi un mélange d'oxyde CuO et de sulfure Cu^2S contenant la même quantité de cuivre, car l'oxyde CuO tient également 79,85 0/0 de cuivre.

Enfin, la solution S_2 renferme le manganèse.

On y dosera le manganèse par une des méthodes connues. Voici, à titre d'exemple, la façon d'opérer par la méthode de M. Ad. Carnot :

Neutraliser incomplètement la liqueur par l'ammoniaque, à froid. Ajouter quelques centimètres cubes d'eau oxygénée, puis verser dans la liqueur un excès d'ammoniaque. On obtient un précipité complet P_3 de manganèse à l'état d'oxyde salin. En portant alors à l'ébullition pendant une dizaine de minutes, pour chasser l'excès d'eau oxygénée, on arrive, à coup sûr, à l'oxyde $Mn^{+4}O^{2-}$, précipité brun noir, que l'on peut recevoir sur un filtre.

Le tableau suivant résume les opérations à effectuer pour l'analyse d'un bronze phosphoreux.

Tableau synoptique de l'analyse d'un bronze phosphoreux

<p>1° Un précipité P de SnO_2 tenant tout le Ph. Faire digérer P humide avec sol. conc. de Na_2S ou $(\text{AzH}_4)_2\text{S}$. Décomposer la sol. obtenue par HCl. On obtient :</p>	<p>4° Un précipité P₁ de SnS_2 griller; on a SnO_2 donnant teneur en..... Etain</p>
<p>2° Une solution S₁ dans laquelle, par la mixture magnésienne, on dose le..... Phosphore.</p>	
<p>Attaquer 1 ou 2 gr. de métal par AzO_3H. Evaporer, reprendre par l'eau, filtrer, laver. On obtient :</p>	<p>1° Un précipité P₂ de Cu_2S donnant teneur en..... Cuivre.</p>
<p>2° Une solution S₂ : transformer en liquides HCl ou sulfurique. Faire passer courant H_2S prolongé. On obtient :</p>	<p>2° Une solution S₂; neutraliser par AzH_3 ajouter H_2O_2 puis excès AzH_3. Faire bouillir 10 minutes; on a un précipité de Mn_2O_3 donnant teneur en..... Manganèse.</p>

3. Analyse d'un laiton. — Les laitons sont constitués par du cuivre et du zinc ; ils renferment parfois de faibles quantités de fer, des traces d'étain, de plomb, d'arsenic et d'antimoine.

Les traces d'arsenic et d'antimoine que peut renfermer le laiton seront décelées et dosées par l'appareil de Marsh. Nous n'insisterons pas sur la technique bien connue de cette opération.

Attaquer 2 grammes du laiton par l'acide azotique étendu d'eau (acide azotique fumant, 1 volume ; — eau, 0,5 à 1 volume). L'étain passe ainsi à l'état d'acide métastannique sans retenir de plomb.

Quand l'attaque est terminée, on évapore à sec et on reprend par l'acide azotique ; on laisse ainsi le précipité **P** insoluble du Sn^2O , donnant la teneur en *étain*.

La quantité très faible de plomb que ce précipité peut retenir est négligeable.

La solution **S** renferme les autres métaux. Lui ajouter de l'ammoniaque et du carbonate d'ammoniaque ; chauffer. On précipite ainsi le fer, sous forme de carbonate (précipité **P₁**). Il reste une solution **S₁**, contenant le cuivre et le zinc.

Redissoudre le précipité **P₁** d'oxyde de fer et de carbonate de plomb par l'acide chlorhydrique : on obtient une solution **S'₁** ; faire passer dans cette solution un courant d'hydrogène sulfuré. On a un précipité **P₂** d'oxyde de plomb PbS et une solution **S₂** renfermant le fer. La pesée du précipité **P₂** donne la teneur en *plomb* (100 grammes de sulfure PbS contiennent 86,61 de plomb).

Reprendre la solution **S₂** : chasser l'hydrogène sulfuré par la chaleur, peroxyder et précipiter le

fer par l'ammoniaque sous forme de sesquioxyde Fe_2O_3 . On a ainsi la teneur en *fer*.

Revenons à la solution S_1 ; ajouter de l'acide chlorhydrique en quantité au moins égale à la moitié du volume de la solution. Faire passer un courant d'hydrogène sulfuré : on obtient un précipité complet P_3 de cuivre, sous forme de sulfure CuS et une solution S_3 renfermant tout le zinc.

(Il est prudent, pour avoir une séparation plus complète, de reprendre le précipité et de recommencer la même opération.)

Le précipité P_3 est lavé avec une solution d'acide chlorhydrique chargé d'hydrogène sulfuré; on le transforme en Cu^2S comme nous l'avons expliqué précédemment et, sous cette forme on dose le *cuivre*.

Etendre d'eau la solution S_3 , ajouter de l'acide oxalique et du carbonate d'ammoniaque, puis faire passer un courant d'hydrogène sulfuré. On a un précipité P_4 de sulfure de zinc ZnS dont la pesée donne la teneur en *zinc*.

Le tableau synoptique suivant résume cette analyse.

Tableau synoptique de l'analyse complète d'un laiton

Par l'appareil de Marsh, on dose		Arsenic. Antimoine.	
1° Précipité P de SnO ₂ donnant teneur en.....		Etain.	
<p>1° Précipité P₁ de Fe²O₃ et CO²Pb. Redissoudre par HCl. On a solution S¹. Faire passer H²S. On obtient :</p>	1° Précipité P ₂ de PbS donnant teneur en.....	Plomb.	
	2° Solution S ₂ . Chasser H ² S, peroxyder ; ajouter AzH ³ : on a précipité de Fe ² O ₃ donnant teneur en.....	Fer.	
<p>Attaquer 2 gr. du métal par AzO₃. Evaporer à sec et reprendre par AzO₃H. Ou obtenir :</p>	2° Solution S.		
	Ajouter AzO ₃ H et carbonate d'ammoniaque. Chauffer. On a :		
2° Solution S ₁ . Ajouter HCl. Faire passer H ² S. On obtient :	1° Précipité P ₃ de CuS donnant teneur en.....	Cuivre.	
	2° Solution S ₃ . Etendre d'eau ; ajouter S ² O ₃ H ² et CO ² (AzH ³) ₂ ; puis faire passer H ² S ; on a précipité P ₄ de ZnS donnant teneur en.....	Zinc.	

Analyse chimique des métaux et alliages

Analyse électrolytique. — Beaucoup de laboratoires font aujourd'hui ces analyses par méthode électrolytique. Voici quelle est la marche à suivre pour effectuer cette opération :

Traiter 1 gramme d'alliage par quelques centimètres cubes d'acide azotique de densité 1,30. Chauffer, ajouter de l'eau bouillante, après attaque complète. Laisser déposer et filtrer : on sépare ainsi le bioxyde d'étain SnO_2 et le phosphore, s'il y en avait (précipité **P**) de la liqueur **S** renfermant le cuivre et les autres métaux.

Reprendre le précipité **P** par l'acide chlorhydrique concentré qui dissout l'étain, sous forme de métabichlorure d'étain. Précipiter l'étain métallique par le courant électrique, maintenu jusqu'à la fin du lavage.

Dans la solution **S**, on précipite le cuivre par électrolyse (la liqueur doit être azotique).

S'il s'agit d'un laiton, pour doser le zinc, on peut transformer au préalable les sels en oxalates, puis on précipite ensemble le cuivre et le zinc par un courant électrique, faible d'abord, puis croissant, jusqu'à un élément Bunsen. On pèse ensemble le cuivre et le zinc, puis on les sépare en redissolvant par l'acide azotique.

S'il y a du phosphore, il reste dans la solution; on le précipitera par la mixture magnésienne.

*
**

III. Analyse de l'aluminium et de ses alliages.

L'analyse de l'aluminium présente quelques difficultés : tout d'abord, si l'on traite les échantillons à

Analyse chimique des métaux et alliages

examiner, et à chaud surtout, par le véritable dissolvant du métal, c'est-à-dire l'acide chlorhydrique concentré, il se produit des pertes de silicium entraîné à l'état d'hydrogène silicié ; ensuite, il est presque impossible de séparer complètement l'hydrate d'oxyde d'aluminium de l'hydrate de peroxyde de fer ; enfin, les laboratoires ne s'étant pas arrêtés à certaines impuretés de réoxydation, l'analyse était forcément incomplète et négligeait, non seulement l'alumine de réoxydation, mais encore le sodium, dont les inconvénients ont été signalés par M. Moissan (1).

Diverses méthodes ont été proposées pour effectuer l'analyse complète de l'aluminium : dans toutes ces méthodes, le dosage du cuivre ne pouvait guère être fait que par l'électrolyse, le silicium disparaissait en partie à l'état d'hydrogène silicié ; le carbone n'était pas rigoureusement dosé à cause des différents états sous lesquels il pouvait se trouver dans le métal. D'autre part, on ne se préoccupait pas du sodium, élément des plus nuisibles au point de vue de la conservation du métal, et qui se rencontrait non seulement dans le métal obtenu par les procédés chimiques, mais encore dans ceux résultant des premiers traitements électrolytiques, surtout quand la cryolithe jouait le rôle prépondérant.

M. Moissan a indiqué, dans les *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, une méthode complète donnant le sodium, le carbone et l'alumine pré-existante. Cette méthode est un peu longue, mais elle est d'une exactitude absolue.

(1) P. Moissonnier, *l'Aluminium*, Paris. Gauthier-Villars, 1902.

Guide du constructeur d'automobiles

Nous allons donc indiquer la marche à suivre pour appliquer cette méthode à un aluminium industriel d'abord, à un alliage d'aluminium ensuite.

Tout d'abord, voyons en deux mots, comment on s'assurera, qualitativement, si le métal analysé renferme ou non du cuivre :

Faire dissoudre environ 2 grammes de métal dans l'acide chlorhydrique étendu d'eau ; faire passer dans la solution un courant d'hydrogène sulfuré. Si la teneur en cuivre est très faible, il est utile de chauffer légèrement la solution et de la maintenir tiède pendant quelques heures après le passage de l'hydrogène sulfuré. Filtrer : le cuivre, s'il y en a, se trouve dans le résidu, on le recherchera par les méthodes connues et l'analyse qualitative est conduite de façon à constater la présence du silicium, du fer, du carbone et de l'azote.

1° Méthode Moissan pour l'analyse de l'aluminium exempt de cuivre.

Dosage du silicium. — Peser 3 grammes environ de métal ; attaquer par l'acide chlorhydrique étendu au 1/10. S'il y a un résidu de couleur grise (contenant du silicium, du fer, de l'aluminium et du charbon), on sépare cette poudre et on l'attaque par une petite quantité de carbonate de soude en fusion dans un creuset de platine. Le contenu du creuset est repris par de l'acide chlorhydrique étendu et cette solution est réunie à la première.

Le liquide est placé dans une capsule de porcelaine et maintenu au bain-marie jusqu'à dessicca-

Analyse chimique des métaux et alliages

tion. La capsule est alors portée dans une étuve à air chaud dont la température est de 150°.

Le résidu doit être absolument blanc, pulvérulent et ne doit plus s'attacher à l'agitateur. Pour obtenir ce résultat, il est bon de gratter les parois de la capsule avec une spatule de platine et d'écraser les grumeaux qui se sont produits avec un pilon d'agate. On la retire après douze heures de séjour à l'étuve à air chaud, lorsque l'on a constaté qu'un agitateur mouillé par l'ammoniaque placé sur la capsule ne donne plus de fumées blanches, ce qui indique que tout dégagement d'acide chlorhydrique a cessé.

La dessiccation étant terminée, on reprend par de l'eau distillée tiède dans laquelle on a ajouté le moins possible d'acide chlorhydrique, on porte le liquide à l'ébullition pendant quelques minutes, la silice reste insoluble ; puis on jette le résidu sur un filtre ; après dosage et dessiccation, on calcine et on pèse.

Dosage de l'aluminium et du fer. — La solution primitive de l'aluminium dans l'acide chlorhydrique au 1/10 après séparation de la silice, a été étendue d'eau de façon à former un volume de 500 centimètres cubes. On prend 25 centimètres cubes de cette solution correspondant à 0 gr. 150 d'aluminium, on neutralise à froid par l'ammoniaque et on précipite les deux oxydes par du sulfure d'ammonium récemment préparé. On laisse le mélange en digestion pendant une heure. Le précipité est ensuite jeté sur un filtre, lavé, séché, calciné et pesé.

On évite la précipitation par l'ammoniaque, car,

pour que cette dernière soit complète, la solution ne doit pas être trop étendue et doit renfermer une assez grande quantité de sels ammoniacaux, et très peu d'ammoniaque libre.

On peut, il est vrai, se débarrasser de l'excès d'ammoniaque par l'ébullition ; mais, dans ce cas, on doit s'arrêter dès que la liqueur n'est plus que légèrement alcaline ; si l'on dépasse ce point, l'aluminium réagit lentement sur le sel ammoniacal, et le liquide prend une réaction acide.

L'alumine précipitée est, comme on le sait, très difficile à laver. Il est indispensable que le lavage se fasse par décantation dans un verre de Bohême de forme cylindrique et avec de l'eau bouillante. Le lavage est terminé lorsque l'eau surnageante ne contient plus de chlorure. Le précipité est jeté sur un filtre, séché, calciné et pesé.

On obtient ainsi le poids d'alumine et de sesquioxide de fer contenu dans l'aluminium.

Il est très important aussi de dessécher avec soin cette alumine avant de la porter au rouge. De plus, la calcination doit être opérée avec lenteur, parce que l'alumine desséchée décrépite parfois, quand on la calcine. Enfin, la calcination doit être poussée assez loin, car l'alumine ne perd complètement l'eau qu'elle renferme que sous l'action d'une chaleur assez intense.

Dosage du fer. — Pour doser le fer, on prend, après séparation de la silice, 250 centimètres cubes de la liqueur primitive, cette solution est réduite, par l'évaporation, à un volume d'environ 100 centimètres cubes. On ajoute de la potasse caustique

Analyse chimique des métaux et alliages

qui précipite d'abord le fer et l'alumine et lorsque cette potasse est en excès, l'alumine disparaît; on maintient le mélange pendant dix minutes à une température voisine de l'ébullition. Le précipité est lavé cinq ou six fois à l'eau bouillante par décantation, puis jeté sur un filtre.

On reprend ce précipité par l'acide chlorhydrique étendu et l'on recommence une nouvelle précipitation par un excès de potasse. Après lavage et filtration, on reprend encore par l'acide chlorhydrique et cette fois, on précipite le fer par l'ammoniaque. Le précipité est jeté sur un filtre, lavé, calciné et pesé. On obtient ainsi le poids de sesquioxyde de fer.

Proportionnellement, on retranche du poids des oxydes obtenus dans les opérations précédentes le poids de sesquioxyde ferrique et la différence fournit le poids d'alumine.

Dosage de la soude. — Cette méthode de dosage est basée sur ce que l'azotate d'aluminium se décompose par la chaleur en fournissant de l'alumine à une température inférieure à celle de la décomposition de l'azotate de sodium; on prend 5 grammes d'aluminium en limaille ou en lame, on les attaque dans un vase conique par l'acide azotique étendu de son volume d'eau et à une douce température.

L'attaque ne se fait pas à froid, mais il faut élever la température avec précaution, car la chaleur dégagée par la réaction peut être assez grande pour occasionner un dégagement gazeux très violent.

La solution est concentrée dans une capsule de platine au bain-marie, puis évaporée à sec au bain

de sable ou à feu nu. Le résidu est amené à l'état pulvérulent au moyen d'un pilon d'agate.

On chauffe ensuite à une température qui est inférieure au point de fusion de l'azotate de sodium et jusqu'à ce que tout dégagement de vapeurs nitreuses ait cessé. On reprend ensuite par l'eau bouillante, on décante le liquide et on recommence trois fois le lavage de l'aluminium. On lave en même temps le pilon et la capsule et toutes les eaux de lavage additionnées de quelques gouttes d'acide azotique sont évaporées à sec.

On reprend trois fois par l'eau bouillante, de façon à éliminer chaque fois une nouvelle quantité d'aluminium qui se trouvait mélangée à l'azotate alcalin.

Finalement, on reprend par l'eau bouillante, on évapore, on filtre, on additionne le liquide d'un léger excès d'acide chlorhydrique pur et on l'évapore dans une capsule de platine. On chauffe à 300° pour chasser tout excès d'acide chlorhydrique pur et le chlorure de sodium restant est dosé sous forme de chlorure d'argent.

Dosage du carbone. — On prend 2 grammes du métal sous forme de copeaux et on les met en digestion avec une solution de bichlorure de mercure ; le résidu est placé dans une nacelle portée au rouge et chauffée dans un courant d'hydrogène pur. Cette nacelle est ensuite placée dans un tube en verre de Bohême, traversée par un courant d'oxygène bien exempt d'acide carbonique et chauffé au rouge.

Le courant gazeux d'acide carbonique formé traverse un tube de Liebig contenant une solution

Analyse chimique des métaux et alliages

de potasse. L'augmentation de poids de ce tube donne en acide carbonique la quantité de carbone contenue dans l'aluminium.

Dosage de l'alumine préexistante. — On pèse 50 grammes de l'aluminium à analyser ; on met cet échantillon, qui a été préalablement coupé en fins copeaux, dans une nacelle en porcelaine tarée. On introduit cette nacelle dans un tube de porcelaine dans lequel on peut faire passer un courant de chlore. On porte le tube de porcelaine au rouge et on fait passer le courant de gaz. L'aluminium et toutes les impuretés autres que l'alumine préexistantes sont entraînés à l'état de chlorures ou détruits.

Après l'opération, on laisse refroidir, on retire la nacelle qu'on pèse et dont l'augmentation de poids indique le poids de l'alumine préexistante.

2° Méthode Moissan pour l'analyse des alliages de cuivre et d'aluminium.

Dosage du cuivre. — Lorsque l'alliage renferme jusqu'à 60/0 de cuivre, on dissout 500 milligrammes de métal par l'acide azotique bien exempt de chlore ; on étend cette solution de façon à occuper un volume de 50 centimètres cubes, et le dosage se fait par la méthode électrolytique due à M. Lecoq de Boisbaudran, en prenant le dispositif de M. Riche. L'intensité du courant employé est de 0,1 ampère. L'opération dure six heures, si elle est faite à 60°, et vingt-quatre heures si elle est faite à froid. Lorsque l'électrolyse est terminée, le cuivre, après avoir été lavé et séché, est pesé à l'état métallique.

Guide du constructeur d'automobiles

Dosage du silicium, de l'aluminium et du fer. — Le cuivre étant éliminé à l'état de sulfure par l'hydrogène sulfuré, on dose l'alumine, le fer et le silicium, ainsi qu'il a été indiqué précédemment.

Voici maintenant, à titre d'exemple, deux résultats d'analyses d'aluminiums commerciaux, faites au laboratoire de M. Moissan :

Aluminium de Neuhausen (1896)

Aluminium.	96,12
Fer.	1,08
Silicium.	1,94
Carbone.	0,30

Aluminium de Pittsburg (1898)

Aluminium.	98,82
Fer.	0,27
Silicium	0,15
Cuivre.	0,35
Sodium	0,10
Carbone.	0,41
Azote.	traces
Titane	traces
Soufre.	néant(1)

* * *

Avec les méthodes d'analyse de l'aluminium et de ses alliages, nous terminerons l'exposé des principaux procédés d'analyse chimique trouvant leur application dans les laboratoires des usines de construction d'automobiles.

Il nous reste à étudier une autre méthode d'examen des métaux employés dans la construction, la *métallographie microscopique* : cette étude fera l'objet du chapitre suivant.

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences.*

CHAPITRE III

La métallographie microscopique.

La métallographie microscopique, méthode d'investigation toute récente, a conquis droit de cité dans les laboratoires des usines d'automobiles. Les résultats déjà obtenus sont remarquables, et à ce double titre, il est intéressant, croyons-nous, de donner ici un aperçu de ces derniers et de la technique de la nouvelle méthode.

I. Technique de la métallographie microscopique.

Généralités. — La métallographie microscopique consiste dans l'examen au microscope de surfaces polies de métaux, convenablement attaquées pour mettre en évidence les éléments constitutifs ⁽¹⁾.

On doit donc distinguer dans les opérations de la technique métallographique trois parties :

(1) Nous avons largement mis à contribution, pour ce qui va suivre, les travaux de notre maître, M. le professeur Le Chatelier, et notamment les chapitres rédigés par lui dans le travail remarquable publié par la *Société d'Encouragement*, sous le titre *Contribution à l'étude des alliages*. Paris 1901.

Guide du constructeur d'automobiles

- 1° Préparation de la surface polie;
- 2° Attaque chimique;
- 3° Examen microscopique.

[Enfin, si l'on veut étudier les combinaisons existant dans des alliages non industriels, il y a lieu de considérer, avec M. Le Chatelier, une quatrième partie, la préparation des alliages. Mais ce cas ne nous intéresse pas ici.]

1° Préparation de la surface polie. — Cette préparation comprend elle-même trois phases :

- a) Découpage;
- b) Dégrossissage;
- c) Polissage.

a) *Découpage.* — La plupart des métaux peuvent se découper à la scie américaine. Les métaux durs, fragiles, comme la fonte blanche, seront cassés au marteau (mais les fragments sont alors irréguliers). Il vaut mieux, si l'on dispose de force motrice (et c'est généralement le cas dans les laboratoires des usines d'automobiles) découper le métal au moyen d'une meule mince d'émeri. Ce procédé est, d'ailleurs, le seul applicable pour la plupart des aciers.

Quel que soit le procédé employé, on doit chercher à produire un échantillon présentant des dimensions voisines de 10 millimètres.

b) *Dégrossissage.* — La surface destinée à l'examen est d'abord dégrossie à la lime ou à la meule, puis avec des papiers d'émeri du commerce de grosseur décroissante. A la fin de l'opération, la surface doit être déjà doucie, faisant miroir; elle doit rester plane et ne pas présenter de grosses rayures.

La métallographie microscopique

Cette opération est longue, mais indispensable et exige beaucoup de soins, à cause de son influence sur le résultat final du polissage.

On en abrège considérablement la durée aujourd'hui en faisant usage de meules circulaires montées comme dans la machine de la figure 59. Ces machines sont mues au pied ou au moteur. Ces meules, toutefois, s'encrassent vite, parce que les vitesses imprimées à la meule sont généralement trop faibles. Ces machines comportent le plus souvent (fig. 59), deux meules de grain différent.

Lorsque le métal est caverneux, ou simplement piqué, boucher les cavités à la gomme laque fondue ou en solution alcoolique.

c) Polissage. — M. Le Chatelier a réussi à abréger et à simplifier notablement cette opération par une préparation convenable des matières à polir. Cette opération, qui était considérée jusqu'ici comme la plus pénible des trois, devient, au contraire, la plus rapide.

L'essentiel est d'arriver à un classement absolument rigoureux des produits à polir, par ordre de grosseur. Pour cela, le procédé de lévigation industriel est absolument défectueux.

Il faut lui substituer la méthode de lavage employée par M. Schlœsing pour l'analyse des kaolins.

La poudre à classer est traitée par de l'eau acidulée nitrique au millième pour dissoudre les carbonates, sulfate de chaux, etc., qui peuvent souiller la matière. Agiter à plusieurs reprises pendant quelques heures ; laisser déposer, décantier le liquide clair et

Guide du constructeur d'automobiles

remplacer par de l'eau distillée, agiter et laisser déposer. « Après quelques opérations semblables, quand tout l'acide a été enlevé, le dépôt se fait moins rapidement, et le liquide surnageant reste laiteux. » Ajouter 2 cm³ d'ammoniaque par litre de liquide. On procède alors à la décantation à des intervalles déterminés en employant un siphon recourbé en crochet.

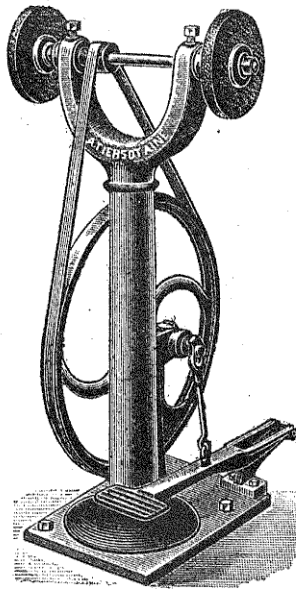


Fig. 59. — Machine à meuler à pédale pour polissage.

Les décantations se font aux intervalles suivants :

- 1/4 d'heure ;
- 1 heure ;
- 4 heures ;
- 16 heures ;
- 3 jours.

Le premier dépôt renferme tous les grains grossiers impropres au polissage. Le liquide décanté et abandonné à un repos d'une heure donne une matière encore un peu grossière, mais qui peut servir au début du polissage, et ainsi de suite.

Une fois les poudres préparées, il faut les conserver. M. Le Chatelier a obtenu de bons résultats en fai-

sant une pâte avec du savon de toilette. Il racle avec un couteau très propre le centre d'un savon de toilette bien sec et mêle la poudre à la matière décan-

La métallographie microscopique

tée encore humide (1 partie de savon sec pour 5 à 10 parties d'eau imbibant la matière); faire fondre au bain-marie, laisser refroidir, en agitant, jusqu'à ce que le mélange commence à épaissir, et couler dans des tubes en étain comme ceux employés pour les couleurs à l'huile. Après refroidissement complet, on ferme le tube.

Un procédé très pratique et employé dans la plupart des laboratoires aujourd'hui, est le suivant : on conserve le produit à polir, obtenu comme nous venons de le dire (l'alumine notamment), en suspension dans l'eau, dans un vaporisateur du modèle ordinaire (vaporisateur pour parfum). Le produit est ainsi conservé à l'abri de la poussière. Au moment d'en faire usage, il suffit d'agiter légèrement, puis de vaporiser un peu du produit sur un disque de feutre monté sur une machine analogue à celle de la figure 59.

Les matières que M. Le Chatelier recommande sont, rangées dans leur ordre de qualité :

Alumine provenant de la calcination de l'alun ammoniacal;

Potée d'émeri du commerce;

Oxyde de chrome provenant de la combustion du bichromate d'ammoniaque;

Oxyde de fer provenant de la calcination à l'air de l'oxalate de fer.

L'alumine est la matière de choix pour les aciers et les fontes.

Ces matières doivent être employées sur des *supports* souples, mais sans excès, et surtout, ne renfermant aucun grain dur pouvant rayer la surface du

Guide du constructeur d'automobiles

métal. L'alumine, la peau sont préférables ; on peut employer aussi le papier, le drap, le velours, le feutre.

Voici quelle est la méthode suivie par M. Le Chatelier pour le polissage du fer et de l'acier dégrossis au préalable avec les papiers d'émeri du commerce, jusques et y compris la potée la plus fine :

1° Un papier d'émeri préparé à l'alumine suivant les indications de M. Dumond, avec le dépôt obtenu entre un quart d'heure et une heure, dans le lavage à l'ammoniaque de la potée d'émeri ;

2° Un disque en feutre du commerce enduit de la pâte au savon préparée avec le dépôt d'alumine ou de potée obtenu entre une heure et quatre heures. On travaille avec la circonférence extérieure du disque, sans avoir à craindre de trop creuser l'échantillon qui est presque toujours resté trop bombé après passage sur le papier d'émeri ;

3° Un disque plan en bois, en métal ou en ébonite, recouvert d'un drap, d'un velours ou d'une peau solidement collés, sur lesquels on étend la préparation au savon obtenue avec le dépôt d'alumine séparé après seize heures.

Ces deux derniers disques sont montés sur une machine pouvant donner une grande vitesse de rotation, telle que celle de la maison Grauer (Cf. fig. 59).

Aujourd'hui, on préfère généralement pulvériser sur le disque (au moyen d'un pulvérisateur ou vaporisateur, comme nous avons dit plus haut) l'alumine en suspension dans l'eau.

Le disque en bois recouvert de drap est généralement remplacé aujourd'hui par des disques de feutre ; le drap se déchire, en effet, facilement. Les

La métallographie microscopique

disques de feutre, quand ils sont neufs, ont tendance à rayer l'échantillon ; mais ils se font assez vite et donnent alors un excellent polissage.

On déplace d'une façon continue l'échantillon sur le disque en sens inverse du mouvement de rotation.

Dans ces conditions, le polissage proprement dit est obtenu en cinq minutes.

2°) **Attaque de la surface polie.** — Le procédé le plus rationnel est l'attaque sous l'action du courant électrique au sein d'une dissolution sans action

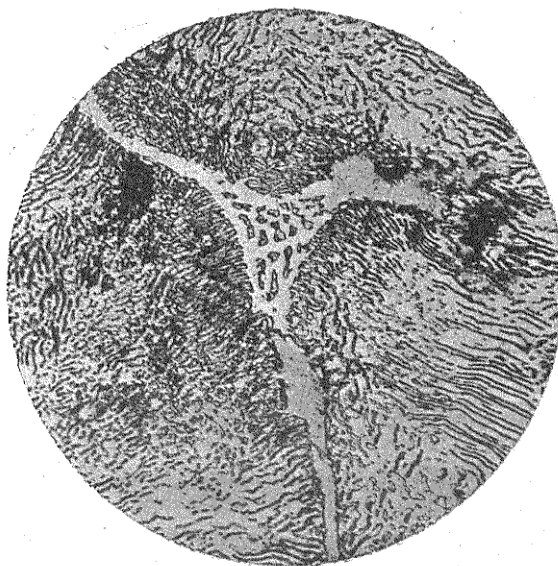


Fig. 60. — Fonte grise. Grossissement 650.

sur le métal. Cette méthode convient surtout pour les alliages de cuivre.

Guide du constructeur d'automobiles

Pour le fer, les résultats ne sont pas aussi bons, et, pour l'examen industriel, le meilleur procédé est celui du *polissage-attaque* recommandé par M. Dumond.

M. Le Chatelier obtient d'excellents résultats par la méthode suivante : « De la teinture d'iode du commerce étendue de quatre fois son volume d'alcool ordinaire est mise sur le bout d'un doigt avec lequel on frotte l'échantillon. On recommence deux ou trois fois l'opération jusqu'à ce que l'on commence à apercevoir un léger voile gris sur la surface polie, qui ne doit pas, cependant, être assez attaquée pour cesser d'être réfléchissante ». La figure 60 représente, à titre d'exemple, une préparation de bonne fonte grise de moulage obtenue par ce procédé (650 diamètres).

Les préparations peuvent être conservées en les vernissant avec une dissolution de coton nitrique dans l'acétate d'amyle (Zapon), ou, si l'on veut une conservation plus prolongée, par montage dans le baume.

3°) **Examen microscopique.** — M. Le Chatelier a imaginé un microscope pour l'examen des surfaces polies des métaux. La figure 61 représente cet instrument.

L'objectif est renversé et regarde vers le haut, ce qui permet d'examiner, quand cela est utile, des objets très volumineux, et surtout permet de se contenter, pour les échantillons ordinaires, d'une seule face plane, qui est posée directement sur un support remplaçant la platine du microscope. On est ainsi dispensé du réglage indispensable dans les microscopes ordinaires pour orienter la surface examinée perpendiculairement à l'axe de l'appareil.

La métallographie microscopique

L'oculaire O est placé horizontalement sur le côté et reçoit l'image qui lui est renvoyée par un prisme à réflexion totale placé sous l'objectif au-dessus du

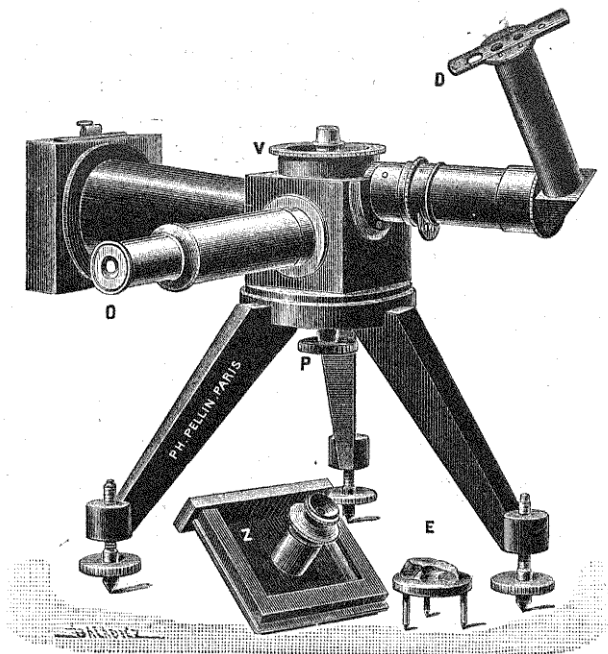


Fig. 61. — Microscope Le Chatelier.

bouton P qui sert à le mouvoir. L'examen se fait donc facilement en étant assis devant une table.

La mise au point se fait au moyen d'une monture à vis ou plate-forme filetée V, qui entoure l'objectif et reçoit les supports E. Les supports, portés par trois pointes, ont une épaisseur bien régulière de façon

Guide du constructeur d'automobiles

à assurer la bonne orientation de la préparation.

Pour des travaux demandant une plus grande précision, la maison Pellin (qui construit les microscopes Le Chatelier) a établi une platine spéciale qui permet de prendre une série successive d'épreuves photographiques du même échantillon. Cette platine (fig. 62) remplace la plate-forme fileté V ; elle se

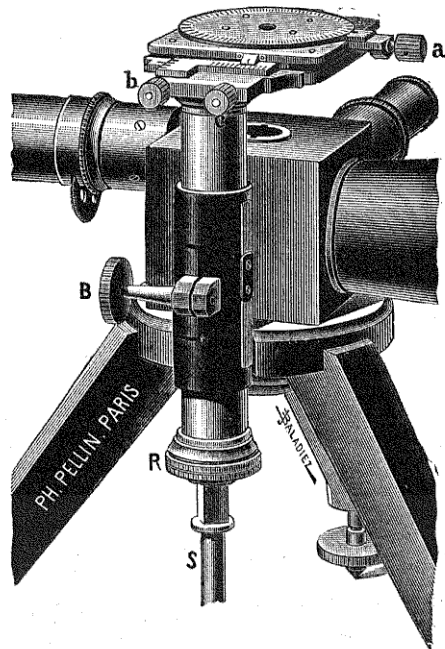


Fig. 62. — Microscope Le Chatelier avec platine spéciale.

compose de trois chariots dont deux, *b* et *c* se meuvent perpendiculairement l'un à l'autre ; leurs

La métallographie microscopique

déplacements sont de 20 millimètres et repérés par des divisions à vernier ; un troisième mouvement, à rotation, commandé par le bouton A, est également repéré par une division à vernier ; il permet de faire tourner l'échantillon sur lui-même. La mise au point se fait à l'aide de trois mouvements ; une crémaillère et collier de serrage B sert pour la mise au point rapide ; un mouvement lent micrométrique R, monté sur triangle, permet de préciser cette mise au point ; enfin, un cable souple S, qui peut se fixer au mouvement lent de la platine, sert pour la mise au point à distance, lorsqu'on emploie la chambre photographique.

L'appareil éclaireur est la partie la plus délicate à régler dans un microscope à métaux. Dans le microscope de M. Le Chatelier, les tâtonnements se réduisent à deux : la variation d'*ouverture* et la variation de *position* d'un même diaphragme D, qui est placé de telle sorte que :

1° L'*ouverture* du diaphragme commande l'angle du faisceau lumineux qui tombe en chaque point de la préparation. Cet angle doit varier avec la nature et la qualité de l'objectif comme cela a lieu dans les objectifs de photographie. Plus l'angle est grand, plus l'influence des aberrations de sphéricité se fait sentir, et au contraire, plus l'angle est petit, plus les franges de diffraction se développent. La netteté la plus grande est obtenue pour un certain angle moyen, que l'on doit, dans chaque cas, régler par tâtonnement.

2° La *position* de ce diaphragme commande l'inclinaison moyenne du faisceau qui tombe sur la préparation. Au point de vue de la netteté, cette

direction devrait se rapprocher de la normale, mais on est obligé de s'en éloigner pour atténuer la proportion de lumière réfléchie par les lentilles et arrivant à l'œil. Pour une inclinaison convenable, la majeure partie de la lumière diffusée peut être arrêtée par le prisme éclaireur lui-même.

Le diaphragme D, qui sert à régler l'éclairage, est placé au foyer principal d'un système optique complexe constitué par l'objectif, le prisme éclaireur et la lentille. Pour déterminer sa position, on cherche avec une loupe l'image d'un point lumineux placé verticalement au-dessus de l'objectif à une distance assez grande : 2 ou 3 mètres par exemple, ou, plus facilement, d'un point semblable situé horizontalement en renvoyant les rayons lumineux dans l'objectif au moyen d'un prisme à réflexion totale placé au-dessus. On fait cette détermination pour ces différents objectifs, une fois pour toutes, et on conserve en note les tirages correspondants du tube porte-diaphragme.

Le diaphragme D vient faire son image sur l'arête supérieure du prisme éclaireur.

Le tube portant le diaphragme D peut être droit (fig. 64), la source lumineuse devant alors se trouver au niveau du diaphragme, ou coudé, avec un prisme à réflexion totale (fig. 61), ce qui permet de placer la source lumineuse à un niveau quelconque. Mais il y a, dans ce cas, une petite complication pour orienter la bonnette porte-diaphragme de façon que son image réfléchie par le prisme soit verticale. Il est en général préférable de disposer la source lumineuse de façon à pouvoir conserver au tube porte-diaphragme la position horizontale.

La métallographie microscopique

Comme source lumineuse, la plus commode, s'il s'agit du simple examen à la vue, est un bec à gaz Auer, dont on atténue au besoin la lumière, en interposant des verres dépolis. On place le manchon à une dizaine de centimètres au plus du diaphragme D de façon à utiliser toute la surface de celui-ci.

La meilleure source lumineuse, est, toutefois la lampe Nernst.

Autres microscopes. — On peut également employer, pour les études de métallographie microscopique, des microscopes de modèle ordinaire, mais dont l'objectif présente des dispositions particulières.

Dans certains cas, on fait usage de microscopes ordinaires, dont on remplace l'objectif par un objectif spécial. Dans ce cas, le miroir situé sous la platine (et servant, dans les études micrographiques ordinaires, à envoyer un faisceau lumineux à travers la préparation, laquelle est alors éclairée par transparence) devient sans objet.

Mais on construit aussi (la maison Nachet notamment) des microscopes spéciaux pour la métallographie, qui rappellent par leurs dispositions d'ensemble et par leur aspect général les microscopes ordinaires, mais qui en diffèrent par quelques détails: suppression du miroir sous la platine, platine tournante et mobile indépendamment du corps de l'instrument.

Pour obtenir l'éclairage par en haut de la préparation examinée, on emploie des appareils dits *éclaireurs*, se montant sur le tube du microscope et recevant eux-mêmes à la partie inférieure l'objectif. Ces appareils consistent en principe en une monture

portant un prisme à réflexion totale (éclaireur Guillemain-Nachet) ou des glaces sans tain (microscope Cornu-Charpy) ; la lumière extérieure pénètre par une ouverture latérale et est renvoyée par le prisme ou les lamelles de verre sur la préparation.

La figure 63 représente en coupe verticale et en coupe horizontale l'éclaireur Guillemain-Nachet. Cet instrument comprend, comme organe principal, un prisme à réflexion totale P dont une surface forme lentille.

De plus, sa disposition est telle que la face réfléchissante ne se trouve que sur la moitié, au plus, de la section du microscope (voir figure 63). Deux boutons moletés B et B' placés sur le côté de l'appareil permettent d'avancer ou de reculer l'appareil ou de lui donner une certaine inclinaison (L. Guillet).

Ces systèmes sont très ingénieux ; ils ont l'avantage, surtout, de pouvoir s'appliquer à tout microscope ; l'éclaireur Guillemain-Nachet, en particulier, peut se monter sur un microscope ordinaire, et permettre ainsi de

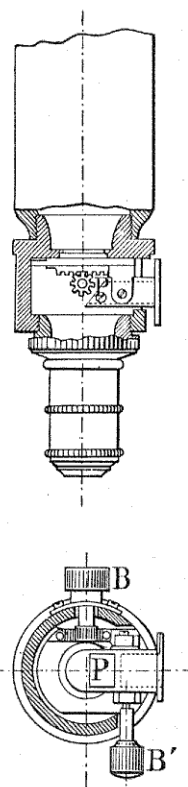


Fig. 63. — Éclaireur Guillemain-Nachet

La métallographie microscopique

l'utiliser pour la métallographie, accidentellement.

Mais pour des travaux importants, et lorsque le laboratoire peut disposer d'un microscope spécialement employé à la métallographie, le microscope de M. H. Le Chatelier s'impose, par la commodité de son emploi. Il est d'ailleurs en usage aujourd'hui dans presque tous les laboratoires.

Ce microscope présente, entre autres avantages importants, celui de permettre l'examen d'échantillons de dimensions à peu près quelconques. M. Le Chatelier a pu étudier ainsi une section d'un joint Fall pour rail de tramways qui avait 250 millimètres de large. Il a, d'ailleurs, pu exécuter des séries de photographies de sections de rails.

Photographie microscopique. — Pour de simples essais métallographiques, l'examen direct à la vue, suffit ; mais, lorsqu'on fait des travaux de recherche, notamment, il est le plus souvent nécessaire de conserver la trace de ce que l'on observe ; cela est utile, par exemple, pour permettre la comparaison facile d'une série d'échantillons. De plus, dans un laboratoire d'usine, il est parfois très bon de conserver la collection des préparations métallographiques des métaux employés.

On peut, pour cela, en effectuer des dessins à la chambre claire ; mais, outre que l'exécution de ces dessins est longue et minutieuse, on ne peut guère espérer obtenir par ce moyen une représentation rigoureusement fidèle des images observées.

La *photographie* seule permet de produire des figures, à la fois rapidement et avec une rigoureuse fidélité.

Guide du constructeur d'automobiles

Dans les premiers microscopes Le Chatelier, un dispositif spécial permettait de faire facilement des photographies des échantillons étudiés.

A cet effet, le prisme à réflexion totale était monté sur un tube mobile pouvant coulisser dans le tube extérieur. Une vis de serrage le maintenait en place; en desserrant cette vis, on pouvait attirer tout le système en arrière, de telle sorte que le prisme ne recevait plus aucun des rayons venant de l'objectif.

Dans ces conditions, les rayons lumineux ayant traversé l'objectif cessent d'être renvoyés horizontalement sur l'oculaire, et l'image de l'échantillon tombe verticalement.

Le microscope se prolongeait à la partie inférieure, entre les trois branches du support, par une boîte en forme de pyramide, à la partie inférieure de laquelle on disposait la plaque photographique.

Ce dispositif présentait divers inconvénients, notamment l'impossibilité de voir l'image photographiée, et, par suite, de mettre au point. Il fallait donc opérer par tâtonnement.

Dans un autre modèle plus récent, le prisme à réflexion totale, qui renvoie l'image dans l'œil de l'observateur, peut tourner de 90 degrés autour de son axe, de telle sorte que, dans sa seconde position, il envoie l'image dans une direction perpendiculaire à l'axe horizontal de l'appareil.

C'est le dispositif du modèle représenté par les figures 60 et 61.

On raccorde avec le microscope une chambre noire de dimension convenable, et cet ensemble donne les résultats les plus parfaits que l'on puisse désirer (M. L. Guillet).

La Métallographie microscopique

La figure 64 représente le dispositif complet pour l'obtention de photomicrographies au moyen du microscope Le Chatelier nouveau modèle.

La disposition de la partie photographique est une chambre horizontale placée sur le côté de l'appareil (*fig. 61*), dans laquelle le faisceau lumineux est renvoyé au moyen du prisme à réflexion totale, ainsi que nous l'avons expliqué plus haut : ce prisme est monté à rotation, dans le fond de la boîte, sur un axe vertical qui permet de le diriger tantôt vers l'oculaire pour l'examen à la vue directe, tantôt sur la plaque photographique en le tournant de 90 degrés à l'aide du bouton P (*fig. 61*).

Avec la chambre horizontale C (*fig. 64*), la mise au point se fait directement sur la plaque, comme dans un appareil photographique quelconque ; cela est très facile avec la lampe Nernst, par exemple, qui donne des images très lumineuses. Les surfaces du prisme à réflexion totale étant parfaitement travaillées, la netteté des images n'est nullement altérée.

La distance de la plaque à l'objectif est, bien entendu, celle pour laquelle les aberrations de l'objectif ont été corrigées, c'est-à-dire 250 millimètres.

L'image obtenue a 15 millimètres de diamètre ; elle est extrêmement nette et pourrait supporter un agrandissement ultérieur de 10 diamètres.

Pratiquement, on ne peut guère dépasser un grossissement linéaire de trois fois, ce qui donne des épreuves de 45 millimètres très convenables pour les projections. Mais il est préférable d'effectuer de suite le grossissement de l'image avant de la recevoir sur la plaque. Pour cela on installe à la place

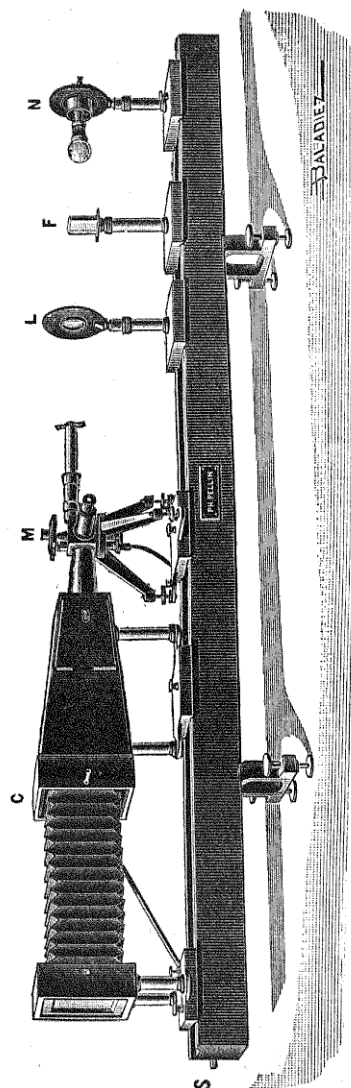


Fig. 64. — Microscope Le Chatelier disposé pour la microphotographie

du petit châssis, un oculaire à projection Z (fig. 61) grossissant deux fois et l'on place la plaque photographique de dimension 9×12 par exemple à 50 centimètres ou 1 mètre. Cette disposition, qui est adoptée maintenant, permet de monter tout l'appareil sur un banc métallique (ainsi que le représente la figure 64), comme le banc d'optique, ce qui lui donne une très grande stabilité; on se protège ainsi plus facilement en effet contre les petits mouvements très nuisibles à la net-

La Métallographie microscopique

teté des photographies (1). Dans l'appareil tel que le construit M. Pellin, la longueur que l'on donne à la chambre noire est de 50 centimètres, mais un soufflet permet un tirage jusqu'à 1 mètre. Les dimensions des plaques photographiques que l'on peut employer avec ces chambres sont de 9×12 ou 13×18 . Les oculaires à projection Zeiss, que la maison Pellin adopte pour les microscopes, sont disposés de façon à ce qu'on puisse faire varier la distance relative des deux lentilles. Cela permet de changer un peu le grossissement, mais ce n'est pas là le but essentiel de ce dispositif : les images données par des séries successives de lentilles sont généralement plus ou moins courbes, mais on peut corriger ce défaut en faisant varier quelques-unes des grandeurs qui définissent le système optique et en particulier la distance des deux lentilles de l'oculaire.

Si les échantillons étudiés étaient rigoureusement placés, on pourrait définir d'une façon rigoureuse la position relative convenable de ces lentilles pour chaque longueur de la chambre photographique, mais en réalité, le polissage donne presque toujours des échantillons courbes, et cette courbure vient, suivant les cas, s'ajouter ou se retrancher à la courbure résultant du système optique, de sorte qu'il faut, dans chaque cas particulier, déterminer par tâtonnements la position relative des deux lentilles qui donne, dans toute l'étendue de la plaque photographique, la netteté la plus uniforme.

Eclairage. — L'éclairage présente une importance

(1) M. H. Le Chatelier, *Revue de Métallurgie*, Juillet 1905.

capitale au point de vue de la photographie. Le bec Auer, les flammes d'acétylène, la lumière oxhydrique, sont très convenables, si l'on veut se contenter de l'emploi de la lumière blanche. Il faut, dans tous les cas, que la source lumineuse couvre complètement le diaphragme D (*fig. 61*). Si la source est petite, comme la perle de magnésie dans la lumière oxhydrique, on ne peut se contenter de la placer derrière le diaphragme, il faut projeter son image sur le diaphragme au moyen d'une lentille supplémentaire (*fig. 64*), que l'on dispose de façon à obtenir, quand cela est nécessaire, une image amplifiée de la source lumineuse. Cela est indispensable, si l'on se propose d'employer une étincelle électrique jaillissant entre deux pointes de magnésium par exemple.

« Pour obtenir une lumière monochromatique, M. Le Chatelier s'est adressé à l'arc à mercure.

« L'étude de cet arc a été faite par MM. Pérot et Fabry qui ont montré qu'il possède deux raies jaunes, une raie verte, une raie indigo, et plusieurs raies violettes et ultra violettes.

« La lampe, que M. Le Chatelier a fait construire par M. Chabaud, et qui est représentée dans la figure 65, comprend, dans la partie supérieure, un espace très volumineux qui permet de limiter l'échauffement de la lampe. Deux nappes de mercure se trouvent à la partie inférieure, l'une de ces nappes est contenue dans un tube de verre central, lequel est entouré d'un enduit réfractaire spécial dans sa partie supérieure, l'autre nappe entoure la

première et est reliée au courant par un autre tube situé sur la côté de l'appareil.

« Les tubes se terminent par deux fils de platine, et l'appareil est placé dans un support où se trouvent deux godets au mercure. Un tel appareil fonctionne sous 15 à 25 volts et 3 ampères. Au début, il est nécessaire de faire passer 4 à 5 ampères.

« Les premiers modèles de ces lampes étaient extrêmement fragiles ; un grand perfectionnement a été apporté par M. Le Chatelier, il consiste dans une ampoule placée à la partie supérieure de la lampe et permettant un refroidissement assez énergique. L'eau que l'on met dans cette ampoule est condensée par un serpentin placé au-dessus, comme le montre la figure 65. (M. L. Guillet.)

M. Guillet recommande de mettre au point avec la lumière oxhydrique, pour avoir un éclairage assez intense et de photographier à l'arc de mercure.

La lampe à arc de mercure a le défaut de nécessiter un temps de pose assez long. M. H. Le Chatelier a essayé des lampes donnant une intensité lumineuse plus grande ; mais ces lampes se cassent facilement.



Fig. 65. — Lampe à mercure Le Chatelier.

Guide du constructeur d'automobiles

D'autre part, ces lampes sont difficiles à transporter pleines de mercure, car elles sont trop fragiles.

M. Le Chatelier préconise la lampe Nernst, disposée comme le montre la figure 64, en N. Cette lampe donne des images très lumineuses. On doit choisir des lampes à gros filaments, car les filaments fins produisent des franges de diffraction.

On dispose entre la lampe N (*fig. 64*) et le diaphragme, une lentille L, qui grossit l'image du filament. On a ainsi des photographies très nettes avec des poses très courtes.

Cette lampe peut servir à l'examen direct et à la photographie ; dans ce dernier cas, il convient d'interposer entre la lampe et la lentille L (*fig. 64*) une cuve F renfermant une solution acide de sulfate de quinine, et de faire la mise au point sur un verre violet, à l'aide d'une loupe de mise au point.

Dans ces conditions, le temps de pose varie de 25 à 40 secondes (si la photographie est prise directement), de 2 à 5 minutes si les aciers, par exemple, sont peu attaqués et très brillants (avec oculaire à projection) et enfin de 10 à 30 minutes pour les corps peu réfléchissants.

*
* *

II. Métallographie des fontes et aciers.

Nous avons vu page 107 que le fer existe sous trois états allotropiques :

Le fer α , au-dessous de 740° ;

Le fer β , entre 740° et 860° ;

Le fer γ , au-dessus de 860° .

La Métallographie microscopique

Rappelons encore les propriétés caractéristiques de ces trois états allotropiques du fer :

Le fer α est magnétique et ne dissout pas le carbone ;

Le fer β n'est pas magnétique ; il ne dissout pas non plus le carbone ;

Le fer γ n'est pas magnétique ; il dissout le carbone.

D'autre part, nous savons qu'il existe un carbure de fer, de composition Fe_3C (*cémentite*, voir plus loin) que l'on peut isoler des aciers recuits et que l'on ne retrouve pas dans les aciers trempés. Enfin, la dissolution de ce carbure dans le fer, ou sa dissociation produisent le phénomène de la recalcination.

Des travaux des divers savants qui ont étudié les éléments constitutifs des fontes et aciers, il résulte que les *constituants* actuellement admis pour les fontes et aciers sont :

La *ferrite*, ou fer pur ;

La *cémentite*, ou carbure de fer Fe_3C ;

La *perlite* (eutectique ferrite-cémentite et qui doit son nom à ce que, vu en lumière oblique, ce constituant a l'aspect nacré de la perle) ;

La *martensite*, dédiée par M. Osmond au professeur Martens. Ce n'est pas un constituant défini : c'est une solution de carbone dans le fer ; le carbone peut y être en plus ou moins grande quantité. En France, on a nommé longtemps *hardenite* la martensite saturée de carbone. Mais ce nom a été réservé, depuis, à la martensite correspondant à l'acier eutectique ;

Guide du constructeur d'automobiles

L'*austénite*, dédiée à Roberts Austen ;

La *troostite*, du nom de M. Troost, professeur honoraire en Sorbonne ;

La *sorbite*, dédiée à Sorby, le premier savant qui ait songé à la métallographie ;

Le *graphite*, qui se dépose, ainsi que nous l'avons déjà dit, lorsque les produits sont fortement carburés (M. L. Guillet).

Voyons rapidement les propriétés caractéristiques de ces divers constituants, au point de vue métallographique (1).

Ferrite. — La ferrite apparaît en grains polyédriques par une attaque à la teinture d'iode, à l'acide picrique, etc...

Les grains sont souvent colorés ; ils forment autant de cristaux cubiques qui se sont développés autour de centres indépendants et ont été limités par des facettes plus ou moins planes (Andrews et Strad).

On applique aussi le nom de ferrite au fer renfermant certains produits, tels que le nickel, le manganèse, le silicium, qui forment avec lui des solutions solides ou des mélanges isomorphes.

Ce point a été bien spécifié dans la nomenclature officiellement établie par la Commission nommée par le bureau de l'*Iron and Steel Institute*, sur l'initiative de M. Stead, et à laquelle nous empruntons de nombreuses définitions (2).

Cémentite. — La cémentite constitue le plus dur

(1) D'après Guillet, *loc. cit.*, p. 93.

(2) *Journal of the Iron and Steel Institute* 1902, 90.

La Métallographie microscopique

constituant de la fonte et de l'acier brut de forge ; elle apparaît, par conséquent, par polissage en bas-relief. Elle ne se colore pas, lorsqu'on l'attaque à l'acide azotique dilué, l'iode, l'acide picrique, etc.

M. Sauveur distingue entre ce qu'il nomme la cémentite de ségrégation et la cémentite libre. La première est un des constituants de la perlite, la seconde est indépendante. La Commission nommée par l'*Iron and Steel Institute* proposa justement d'éliminer le mot impropre de ségrégation et de maintenir les expressions de perlite et de cémentite indépendante.

Cette dernière se colore en brun par le picrate de soude en solution sodique, ce réactif a été découvert, ainsi que l'acide picrique au laboratoire de M. Le Chatelier par M. Ivgevsky.

Perlite. — La perlite est, comme l'on sait, l'eutectique ferrite-perlite. Depuis les travaux de M. Charpy, on sait que tout eutectique est formé de lamelles alternantes des deux constituants. Nous devons donc voir, sous des grossissements assez forts, ces deux constituants en lamelles alternées. C'est bien ce qui arrive.

La perlite se colore en noir par la teinture d'iode et l'acide picrique ; elle n'est que peu colorée par le picrate de soude.

Si l'on examine par voie micrographique des aciers bruts de forge contenant de plus en plus de carbone, on obtient les résultats suivants :

Tout d'abord, dans les aciers extra-doux ou mioux dans le fer, on rencontre souvent des grains de scories ; ces impuretés ont parfois une importance

considérable, comme le montre la figure 78; on y distingue nettement deux éléments dont il nous est impossible actuellement de préciser la nature.

Si l'on considère un acier renfermant peu de carbone, si on l'attaque lentement, avec l'acide picrique par exemple, on verra tout d'abord de la perlite, et si l'on pousse plus loin l'attaque, on verra apparaître des polyèdres qui indiquent les grains de ferrite; on remarquera que la perlite se trouve sur les bords des polyèdres.

Plus l'acier contiendra de carbone, plus la quantité de perlite sera importante; ce fait est démontré par les photographies d'aciers à 0,055 0/0 de carbone; à 0,100 0/0; 0,185 0/0; 0,400 0/0 du même produit.

Lorsqu'on arrive à 0,900 0/0 de carbone, on a de la perlite pure. L'une de nos photographies représente un acier à 0,900 de carbone (figure 72); on y voit des îlots blancs de ferrite.

Si l'on examine des aciers très voisins de l'eutectique à un grossissement assez faible d'abord, puis à un fort grossissement, on met en évidence les lamelles alternantes de ferrite et de cémentite.

En attaquant de tels échantillons au picrate de soude, la cémentite apparaît nettement colorée en noir, tandis que la perlite, à peine attaquée par ce réactif, reste en teinte claire.

A une teneur en carbone supérieure à 0,900 0/0 de carbone, on a de la perlite ou de la cémentite; celle-ci est en quantité d'autant plus grande que le pourcentage du carbone est plus élevé.

A une teneur suffisamment élevée en carbone,

cette cémentite prend l'aspect d'un réseau entourant la perlite.

Dans les aciers cémentés, on obtient, lorsque l'opération est poussée assez loin, de la cémentite qui se présente en aiguilles extrêmement fines comme le montrent les photographies. Si la teneur en carbone de la couche cémentée ne dépasse pas 0,850 0/0, on ne voit que de la perlite compacte, comme le prouve la photographie.

Lorsqu'on examine un acier brut de forge, on peut donc être fixé, tout au moins d'une façon approximative, sur sa teneur en carbone et par conséquent sur les propriétés mécaniques qu'il doit présenter s'il ne contient pas d'impuretés, notamment de soufre, de manganèse et de phosphore en quantités anormales. Cependant, dans cet examen, une hésitation peut se produire pour les aciers qui se trouvent dans le voisinage de l'acier eutectique (c'est-à-dire à 0,900 0/0 de carbone).

En effet, de tels aciers présentent de très grandes quantités de perlite et quelques îlots blancs qui sont de la ferrite ou de la cémentite suivant que l'acier contient plus ou moins de 0,900 0/0 de carbone. — Pour trancher la question, nous avons un moyen absolument certain, c'est l'attaque au picrate de soude : si les îlots se colorent en noir, nous avons affaire à de la cémentite ; sinon nous nous trouvons en présence de la ferrite.

Sorbite. — Il arrive souvent que, quel que soit le grossissement, on ne peut plus voir les deux constituants de la perlite. On lui donne alors le nom de sorbite.

La sorbite s'obtient en chauffant l'acier au-dessus du point de recalescence et en le refroidissant avec une certaine vitesse, sans toutefois, aller jusqu'à la trempe. La sorbite est le constituant caractéristique de la trempe négative.

Les photographies des aciers voisins de l'eutectique montrent de la sorbite.

Martensite. — La martensite est le constituant des acier trempés à l'eau à une température supérieure à celle de dissociation de la cémentite.

Elle est caractérisée par des aiguilles ayant sensiblement la forme de fers de lance que l'on ne voit qu'à un fort grossissement et qui sont dirigées suivant trois directions. Elle est colorée par la teinture d'iode et l'acide picrique.

Nous verrons ultérieurement que les propriétés de la martensite dépendent essentiellement de sa composition qui, nous l'avons déjà dit, est variable.

Austénite. — Lorsqu'on exagère toutes les conditions qui doivent augmenter l'effet de la trempe, on obtient de l'austénite. Il suffit d'employer un acier qui contient plus de 1,10 0/0 de carbone. Il faut, de plus, que la température de trempe soit supérieure à 1.000 degrés et que la température du bain de trempe soit inférieure à 0 degré.

Avec les aciers au carbone, on n'obtient jamais de l'austénite pure, mais un mélange austénite-martensite. Quand on prend des aciers de plus en plus riches en carbone (à partir de 1,10 0/0), on obtient de plus en plus d'austénite. Pour un acier à 1,65 0/0 de carbone, on peut, d'après M. Osmond, obtenir

70 0/0 de ce constituant. Pour un acier plus riche, il y a séparation de cémentite et la proportion d'austénite n'augmente plus.

L'austénite est un produit possédant une faible dureté minéralogique; elle se raie à l'aiguille. La teinture d'iode colore en même temps l'austénite et la martensite, l'acide chlorhydrique et l'acide picrique à 10 0/0 colorent la martensite seule.

Troostite. — Si l'on trempe un acier à une température basse, pendant l'intervalle critique, ou bien à température élevée, mais dans un bain moins actif que l'eau, l'huile, par exemple, on obtient de la troostite qui est caractérisée par des lisérés apparaissant au polissage en bas-relief entre de la martensite et de la ferrite.

De la nature de certains constituants. — Si l'on envisage l'ensemble des constituants des aciers au carbone dont nous venons d'étudier les caractéristiques, on distingue deux catégories très nettes:

L'une formée par des constituants parfaitement définis sur lesquels les expériences futures ne peuvent rien nous apprendre de nouveau, ferrite, cémentite et perlite.

L'autre comprenant les constituants dont la nature n'est pas encore fixée d'une façon absolue, martensite, austénite, troostite, sorbite.

Nous insisterons sur ces derniers constituants.

Comme le faisaient remarquer MM. Osmond, Cartaud dans une note publiée à la suite de leur mémoire sur la cristallographie du fer, dans les *Annales*

des Mines, il existe une confusion réelle sur la dénomination de la martensite. Ce terme a tout d'abord été employé pour désigner l'acier trempé; puis on a regardé la martensite comme étant de l'acier au-dessus du point de transformation A_3 ; mais de ce fait on admettait que ces formes cristallines prises à haute température se conservaient par la trempe.

Or, cette martensite obtenue après refroidissement n'est pas homogène puisqu'elle est magnétique et que, de ce fait, on peut affirmer qu'elle contient du fer α .

Mais alors — comme l'a fait remarquer M. Sauveur — si elle n'est pas homogène, on doit pouvoir la résoudre par le microscope.

Ceci n'a pas encore été fait; il est vrai, d'ailleurs, que, si les deux éléments sont suffisamment petits, ils ne peuvent pas être différenciés, ce serait notamment ce qui aurait lieu, si on avait affaire à un mélange isomorphe de fer α et de fer β .

La martensite ne représente donc pas la structure définitive du fer au-dessus du point A_3 , c'est-à-dire du fer γ ; cette structure est donnée par l'austénite que l'on ne peut pas produire pure dans les aciers au carboné, mais que l'on retrouve ainsi dans les aciers au nickel et au manganèse.

Toutefois, comme le pense M. Osmond, il serait très possible que la forme cristalline de la martensite fussent celles du fer γ ; mais elles seraient ici pseudomorphiques.

Dans cette même note, MM. Osmond et Carlaud soulèvent un très intéressant problème; nous avons dit que lorsqu'on trempe à 1100 degrés un acier suffisamment carburé dans de l'eau refroidie à

La Métallographie microscopique

0 degré, on obtient le mélange d'austénite et de martensite. Ce mélange existe-t-il à haute température où bien se forme-t-il pendant l'opération de la trempe ?

Admettre la première hypothèse, c'est dire qu'à 1100 degrés l'acier n'est pas constitué par une solution homogène.

Dans la seconde hypothèse, il y aurait dédoublement d'une partie de l'austénite en martensite pendant le refroidissement. Nous croyons que c'est cette dernière façon de penser qui doit prévaloir.

Que l'austénite soit le fer γ de M. Osmond, nous croyons que tous les métallographes sont d'accord sur ce fait. Mais il reste encore de nombreux points à préciser sur la nature de la martensite.

Il en est de même, d'ailleurs, de la troostite et de la sorbite qui semblent bien être des formes intermédiaires entre la perlite et la martensite.

Méthode d'analyse métallographique. — M. Osmond dans son remarquable mémoire a indiqué la méthode suivante :

1° Faire le polissage-attaque ; on obtient alors ou un constituant coloré : troostite, sorbite ; ou un constituant non coloré : ferrite, cémentite, martensite ou austénite ;

2° Attaque à l'iode : on obtient ou un constituant coloré : sorbite, troostite, martensite, austénite, ou un constituant non coloré : ferrite ou cémentite.

On distingue aisément la ferrite de la cémentite ; la première est en cristaux polygonaux, la seconde est en lamelles.

On distingue les quatre premiers constituants les

uns des autres au temps qu'ils mettent à s'attaquer et à leur forme. La sorbite se colore très rapidement, la troostite un peu moins vite, la martensite et l'austénite en même temps, mais avec une vitesse bien moindre que les deux autres.

A la méthode de M. Osmond, il faut ajouter maintenant l'emploi de nouveaux réactifs qui facilitent les recherches.

1° Attaque à l'acide picrique en solution alcoolique à 5 0/0 ; la ferrite et la cémentite ne sont pas colorées. Ce réactif différencie nettement la perlite et colore énergiquement la sorbite et la troostite ;

2° Attaque au picrate de soude en solution sodique à 25 0/0 à la température de l'ébullition. Ce réactif colore nettement la cémentite en noir ;

3° Attaque au bitartrate de potassium ; ce réactif ne colore pas la cémentite et la perlite. Il colore, mais d'une façon plutôt sale, la ferrite. Ce réactif a été indiqué par M. Le Chatelier. Il en est de même des suivants ;

4° Attaque par une solution obtenue en mélangeant, à volumes égaux et au moment de s'en servir, une solution à 50 0/0 de soude et une solution à 10 0/0 de nitrate de plomb. La cémentite est colorée très vivement. Ce réactif attaque les phosphores et surtout les silicures ; il doit être employé pour les métaux très carburés.

Il faut tout particulièrement remarquer que les aciers demi-durs non attaqués par ce réactif quand ils sont purs montrent dans le cas contraire une perlite très accentuée, laquelle doit provenir d'une impureté dans la perlite ordinaire ;

5° Attaque par une dissolution à 10 0/0 d'acide

La Métallographie microscopique

chlorhydrique gazeux dans l'alcool absolu additionné de 5 0/0 de chlorure cuivrique pour les aciers recuits et de 1 0/0 seulement pour les aciers trempés ; dans ces conditions la ferrite et la cémentite ne sont pas colorées ; la martensite très peu ; l'austénite, un peu plus ; la troostite et la sorbite beaucoup.

M. Le Chatelier a de plus, fait remarquer que les réactifs en solution alcoolique se trouvent en défaut dans le cas de certains aciers impurs dont ils colorent la ferrite. On ne peut donc plus la différencier suffisamment de la perlite. Si on emploie l'alcool absolu, la ferrite est toujours assez blanche pour qu'on la distingue.

Nous venons d'étudier les divers constituants des aciers au carbone, ainsi que la méthode générale d'analyse micrographique de ces produits.

Comme conclusion à ces quelques détails sur les propriétés métallographiques des divers constituants des fontes et aciers, il nous reste à examiner une question très intéressante au point de vue pratique :

Étant donné un échantillon d'acier au carbone, ou encore de fonte, examiné par les procédés de la métallographie que nous venons d'exposer, que devons-nous conclure, *au point de vue des propriétés industrielles de ce métal*, de la microstructure que cet examen nous révèle ?

L'intérêt de ce problème est évident, puisque sa solution permet de tirer un parti pratique, pour l'utilisation industrielle des métaux, des résultats de l'analyse métallographique. Et, ainsi que nous l'avons déjà dit, les laboratoires d'usine font de plus en plus usage des essais métallographiques qui

Guide du constructeur d'automobiles

donnent rapidement et d'une façon très nette des indications très utiles sur la composition et les propriétés des métaux employés dans la construction.

Nous ferons encore, pour cela, un emprunt à l'ouvrage si clair de M. L. Guillet (1).

Il y a lieu de distinguer trois cas :

Premier cas. — Nous sommes en présence de perlite et de ferrite. On peut affirmer que l'acier contient moins de 0,900 0/0 de carbone, qu'il soit brut de forge ou recuit ; on peut même, d'après l'abondance de la perlite, préciser le carbone et cela à 0,100 près et même moins pour les basses teneurs.

On en conclura approximativement les propriétés mécaniques, résistance, limite élastique, allongements et striction en supposant l'acier pur.

Si l'on est en présence d'un acier extra-doux, la grosseur du grain de ferrite permettra d'avoir une idée sur la fragilité ; plus le grain est gros, moins l'acier est résistant au choc. Elle permettra, en outre, de savoir si l'acier a subi un recuit prolongé à haute température ; s'il a été surchauffé, brûlé, etc., etc.

Deuxième cas. — Nous sommes en présence de perlite et de cémentite. La quantité de cémentite permet de préciser le pourcentage de carbone et de voir l'usage auquel peut être destiné l'acier considéré.

Troisième cas. — Nous sommes en présence de martensite. Avec quelque habitude, la texture de la

(1) *Étude théorique des alliages métalliques.*

La Métallographie microscopique

martensite, sa plus ou moins facile coloration par les réactifs ordinaires peuvent donner une idée de sa composition. Nous avons dit, en effet, que la martensite, bien qu'étant le principal constituant des aciers au carbone bien trempés, n'avait pas de propriétés mécaniques définies, celles-ci étant fonction de sa composition qui est essentiellement variable, C'est ainsi que la martensite est d'autant plus fragile qu'elle contient plus de carbone.

Elle se colore également avec d'autant plus de facilité. Un acier extra-doux trempé convenablement montre de la martensite ; or, sa charge de rupture n'a pas augmenté, ses allongements n'ont pas diminué ; de même sa fragilité ne s'est pas accrue, bien au contraire ; M. Guillet a montré (1) que la trempe donne de l'homogénéité aux aciers extra-doux, en améliorant considérablement leurs propriétés mécaniques.

De la présence de la martensite dans un acier au carbone on peut conclure que cet acier a été trempé ; mais on ne peut pas déduire ses propriétés mécaniques. Si on a soin de faire recuire une partie de l'échantillon observé en la portant à 900 degrés, pendant quelques instants, on trouvera de la perlite qui permettra de connaître approximativement la teneur en carbone de l'acier étudié ; en rapprochant la structure observée de celle trouvée dans le premier cas, on peut préciser davantage les propriétés mécaniques à l'état où il se trouvait au début de l'opération. C'est ainsi que si, après recuit, la métal-

(1) *Groupe français de l'association internationale des méthodes d'essais*, Novembre 1903.

lographie indique une teneur de carbone d'environ 0,800 et si le premier échantillon observé montrait uniquement de la martensite, on peut conclure à un acier à haute charge de rupture, à faibles allongements et à grande fragilité.

D'ailleurs, il arrive le plus souvent que la martensite n'est pas seule, elle est accompagnée souvent de la ferrite ou de la cémentite.

Dans le cas de la ferrite, on peut d'ores et déjà conclure à un acier hypoeuctique trempé ; dans le cas de la cémentite, à un acier hypereuctique.

Troostite. — La troostite est, avons-nous dit, la caractéristique des aciers ayant subi une trempe douce, notamment la trempe à l'huile. On sera conduit, comme dans le cas de la martensite, à faire un recuit ; des deux microstructures obtenues, on pourra tirer une conclusion certaine.

Généralisation. — Le cas le plus général pour les aciers ayant subi un traitement physique (trempe, recuit) ou chimique (cémentation, recuit en présence d'oxydant comme dans la fabrication de la fonte malléable) est plus complexe ; on se trouve en présence de plusieurs constituants. Il ne semble pas, d'ailleurs, que la conclusion à tirer soit très difficile, mais les observations sont plus délicates.

Il faut, en effet, bien noter les situations respectives des divers constituants. C'est ainsi que l'examen d'une pièce de fort diamètre trempée vivement à l'eau conduit généralement à une structure comprenant de la martensite pure sur les bords, de la troostite plus loin, de la sorbite et enfin, au centre,

La Métallographie microscopique

de la perlite; entre chaque constituant on rencontre bien entendu, les zones de transition.

Dans un acier cémenté non trempé, le centre est à perlite, le bord contient généralement de la cémentite en fines aiguilles.

Dans un acier cémenté trempé, le centre est à perlite si la pièce est suffisamment importante, les bords sont à martensite et l'on voit nettement que la martensite des bords n'a pas même composition que celle des zones plus éloignées; elle apparaît, en effet, beaucoup plus rapidement sous l'influence des réactifs.

Nous pourrions multiplier le nombre des exemples, mais il nous semble inutile d'insister, ayant bien prouvé quel guide précieux constitue la métallographie autant pour le constructeur et le mécanicien, qui utilisent quotidiennement les aciers au carbone, que pour le métallurgiste.

Fontes. — La constitution des fontes est évidemment un problème beaucoup plus compliqué que celui des aciers. Cela provient de ce que les impuretés y sont plus importantes, et que par conséquent, elles peuvent donner naissance à des composés spéciaux, phosphures, siliciures, sulfures, etc.

La question de la constitution des fontes est donc très complexe.

Les principaux constituants de la fonte grise sont le graphite, la ferrite et la perlite.

Dans les fontes blanches, on trouve de la cémentite, de la perlite et de la martensite.

Le silicium se présente dans les produits métallurgiques sous quatre états différents, au moins.

Ceci découle des recherches de MM. Carnot et Goutal, de MM. Moissan, Lebeau, etc.

Le silicium peut être dissous dans le fer, il peut donner naissance aux combinaisons Fe^2Si et FeSi^2 . Enfin, si le produit contient suffisamment de manganèse, il peut donner naissance à un siliciure double M^2Si , M représentant la somme Fer + Manganèse,

L'état du soufre dans les produits métallurgiques a fait l'objet d'une étude très approfondie et toute récente de la part de MM. Le Chatelier et Ziegler.

Dans le fer fondu, le soufre donne du sulfure FeS , qui forme une enveloppe aux grains cristallins du fer.

Lorsqu'on se trouve en présence de manganèse, il se forme tout d'abord un composé MnS ; ceci explique le fait, bien connu en métallurgie, que le manganèse annule dans une certaine mesure les effets si nuisibles du soufre ; en effet, le sulfure de manganèse fond à une température très élevée et est insoluble.

Bien que MM. Le Chatelier et Ziegler n'aient pas étudié l'état du soufre dans les produits très carburés, ils ont signalé qu'on rencontrait fréquemment dans les fontes de moulage des cristaux très réguliers qui se rapprochent du sulfure de manganèse (voir fig. 79.)

D'autre part, MM. Carnot et Goutal ont été conduits à admettre l'existence du composé MnS dans les fontes sulfureuses et manganésifères.

C'est à M. Stead que l'on doit l'étude la plus complète sur l'état du phosphore dans les produits sidérurgiques.

La Métallographie microscopique

Les conclusions de cette étude sont les suivantes :

Au-dessous de 1,70 0/0, la masse consiste en une solution solide de phosphure Fe^3P dans un excès de métal ; cette solution est saturée à 1,70 0/0.

Pour les teneurs comprises entre 1,70 et 10,20 0/0, il y aurait une quantité variable de la solution saturée de phosphure de fer à côté d'un mélange eutectique à 10,20 0/0 de phosphore, composé de 61 0/0 de Fe^3P et de 39 0/0 de la solution saturée Fe^3P .

Le manganèse, nous l'avons déjà dit, a une tendance à se combiner au soufre et au silicium. S'il est en quantités suffisantes, il peut donner naissance à des carbures doubles qui dérivent tous de la cémentite dans laquelle une certaine quantité de manganèse s'est substituée au fer.

MM. Carnot et Goutal en ont isolé un certain nombre : (MnFe^4) ; (MnFe^2) ; $(\text{Mn}^2\text{Fe}^3)\text{C}^4$; $(\text{Mn}^4\text{Fe})^3\text{C}^4$. C'est le premier que l'on trouverait dans les fontes.

Ce court aperçu sur l'état des impuretés dans les produits sidérurgiques donne une idée de la complexité du problème métallographique des fontes qui, d'ailleurs, n'est pas encore entièrement résolu.

Exemples de microstructures de fontes et aciers. — A titre d'exemples, nous allons reproduire, en les accompagnant de quelques indications explicatives, un certain nombre de microphotogrammes que nous devons à l'obligeance de M. le professeur H. Le Chatelier.

Ces photogrammes représentent :

1° Des fontes (fonte grise, fonte Thomas) ;

2° Des fontes sursaturées en carbone produites en chauffant au four électrique du fer et du carbone ;

Guide du constructeur d'automobiles

- 3° Des aciers divers ;
- 4° Un échantillon montrant la structure du sulfure de manganèse dans le fer fondu ;

Fonte grise. — La photographie de la figure 66 représente, à un grossissement de 650 diamètres, une fonte grise de Denain.

Le métal a été soumis à un recuit partiel qui a amené la disparition par places de la perlite.



Fig. 66. — Fonte grise de Denain ; recuit partiel. $G = 650 D$.

Ce constituant persiste pourtant encore par endroits et il reste visible sur la photographie.

La Métallographie microscopique

Fonte Thomas. — La figure 67 représente un échantillon de fonte Thomas à 3 0/0 de carbone environ.

Fontes sursaturées en carbone. — Les figures 68 et 69 sont des photographies, au grossissement de 125 diamètres, du produit obtenu en chauffant au four électrique du fer et du carbone.

L'échantillon de la figure 68 a été trempé, puis recuit au bleu. Le recuit a rassemblé le graphite, que l'on aperçoit en grandes plaques sombres.

La photographie montre encore la cémentite.

L'échantillon de la figure 69 a été obtenu de la même façon, mais trempé sans recuit.

On y distingue le graphite, la cémentite et de l'austénite; de plus, les fines granulations, que l'on voit surtout à droite, sont du phosphore de fer.

Ces deux photographies sont faites avec un grossissement de 125 diamètres.

Acier à 2 0/0 de carbone. — La figure 70 est la photographie d'un acier à 2 0/0 de carbone, trempé.

L'échantillon a été attaqué par une solution alcaline et photographié avec un grossissement de 650 diamètres. On y distingue : la cémentite (en noir), l'austénite (blanche) et la martensite en aiguilles grises.

Acier de Firminy à 1,4 0/0 de carbone. — La photographie de la figure 71 montre, avec un grossis-

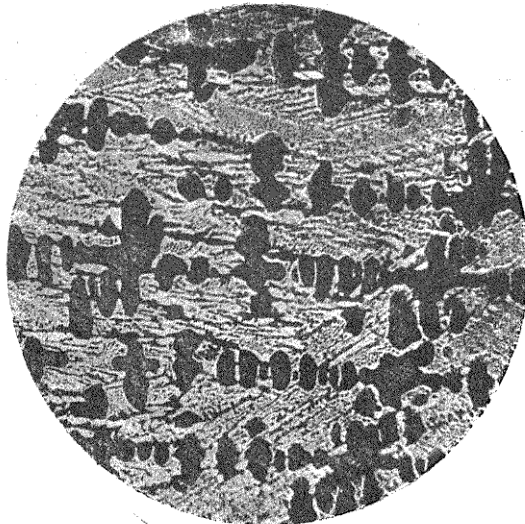


Fig. 67. — Fonte Thomas à 3 0/0 de carbone.



Fig. 68. — Fonte sursaturée en carbone; trempe et recuit au bleu. $G = 125$.

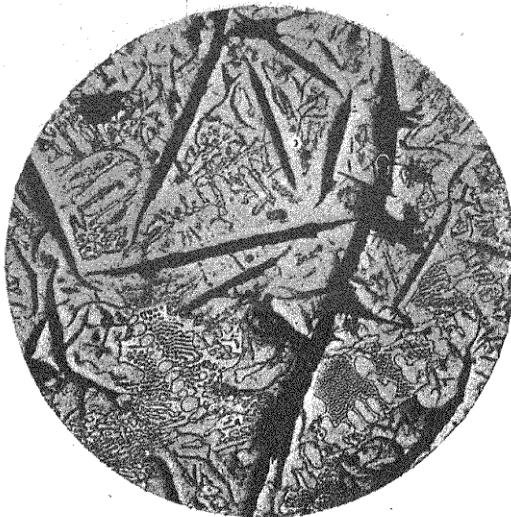


Fig. 69. — Fonte sur saturée en carbone; trempé — G. = 125.

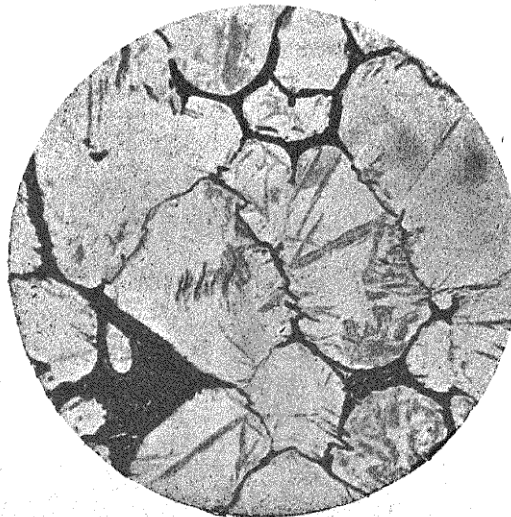


Fig. 70. — Acier à 2 0 0 de carbone; trempé — attaque alcaline — G = 650.

sement de 650 diamètres, un acier de Firminy à 1,4 0/0 de carbone.

L'échantillon a été attaqué par le mélange d'acide chlorhydrique et de chlorure de cuivre CuCl^2 .

Acier à 0,9 0/0 de carbone (Bohler). — Le métal que représente, à un grossissement de 650, la figure 72, est un acier à 0,9 0/0 de carbone, trempé à température variable.

On voit nettement dans cette photographie : la troostite colorée en noir, la martensite (blanche) et la perlite.

Acier Firminy à 0,3 0/0 de carbone. — La figure 73 est la photographie d'un acier Firminy à 0,3 0/0.

L'échantillon a été à moitié trempé et attaqué par une solution de soude caustique à 25 0/0 additionnée d'une faible quantité de permanganate de potassium.

Le grossissement est de 650 diamètres.

La figure 74 représente un acier ordinaire trempé et attaqué pour mettre en évidence la martensite, que l'on voit nettement sur la photographie, se détachant en aiguilles blanches sur le fond noir.

Acier extra-doux. — La figure 75 est la photographie d'un acier extra-doux désigné par la marque « 70 ULH ».

L'échantillon a été attaqué pendant trois heures, à la température de 100 degrés, par une solution de potasse à 10 0/0.



Fig. 71. — Acier de Firminy à 1,4 0/0 de carbone.
Attaqué par HCl + Cu Cl₂. — G = 650

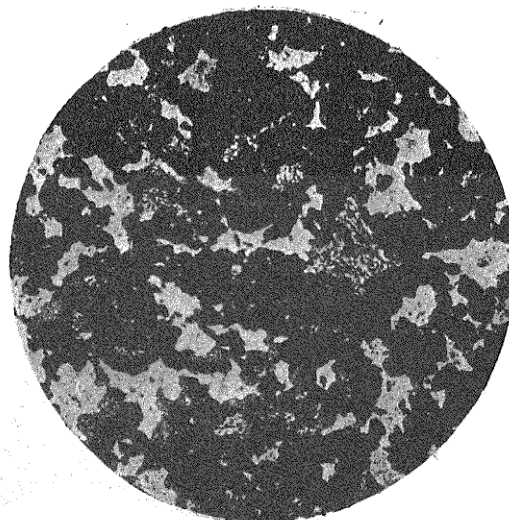


Fig. 72. — Acier à 0,9 0/0 de carbone; trempe; G = 650.

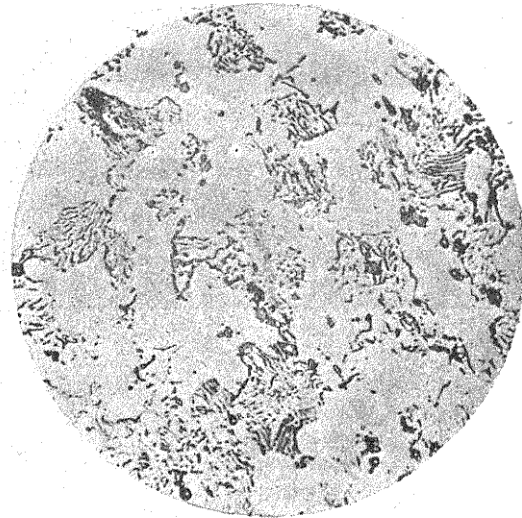


Fig. 73. — Acier à 0,3 0/0 de carbone (Firminy) mi-trempe
attaque NaOH avec un peu de $\text{MnO}_2 \cdot \text{K}$. — $G = 650$.



Fig. 74. — Martensite dans acier trempé.

La Métallographie microscopique

La photographie, faite à un grossissement de 650 diamètres, montre la perlite.

La figure 76 montre, à un grossissement assez faible (125 diamètres), un acier extra-doux analogue à celui de la figure 75.

L'attaque a été faite par le chlorure de cuivre CuCl_2 et le chlorure d'ammonium à 8 0/0.

La photographie montre la structure polyédrique de l'acier.

Le même acier, mais vu à un grossissement plus fort (650 diamètres), est représenté par la figure 77.

L'échantillon a été attaqué de la même façon. A ce grossissement, on distingue la structure des grains.

Remarque. — Il convient de noter que les photographies précédentes se rapportent au métal dans un état où il n'est pas utilisable (le traitement étant le plus souvent un recuit à haute température, avec refroidissement lent). Pour l'utilisation industrielle, il faut précisément faire disparaître par la trempe, la structure que montrent les photographies. Tous ces photogrammes représentent donc l'état du métal avant le traitement nécessaire.

Scories dans l'acier. — La figure 78 montre l'existence dans l'acier d'une certaine proportion de scories.

L'échantillon photographié (avec un grossisse-

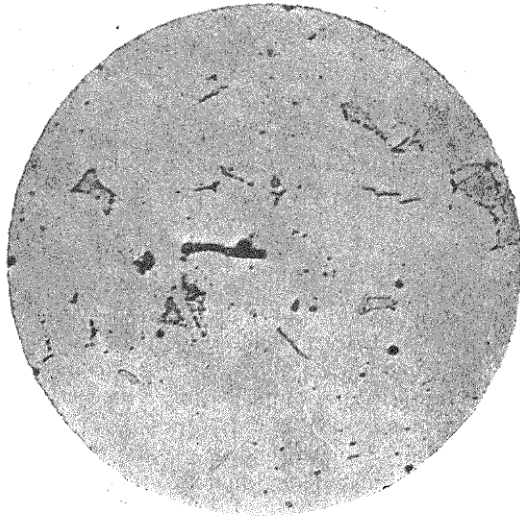


Fig. 75. — Acier extra-doux — attaque par KOH ; $G = 630$.
Perle.

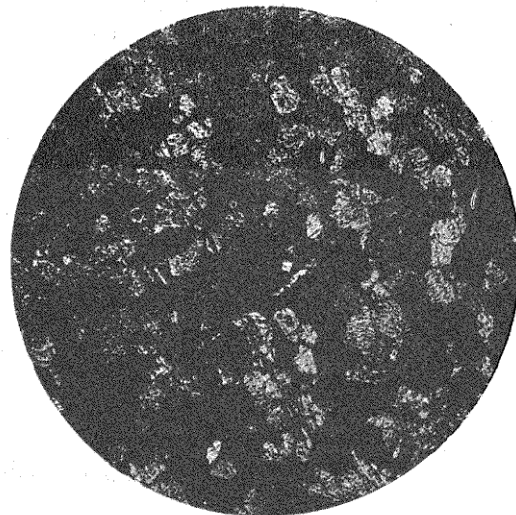


Fig. 76. — Acier extra-doux Thomas, attaque
 $\text{CuCl}_2 + \text{AzH}_4\text{Cl}$. — $G = 125 D$.



Fig. 77. — Acier de la figure 76 ; même attaque; $G = 650 \times$.

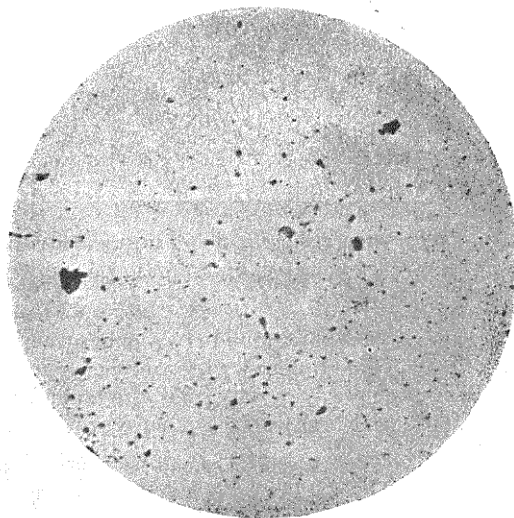


Fig. 78. — Acier extra-doux. — Polissage sans attaque (scories existant dans un acier industrielle). $G = 125 \times$.

Guide du constructeur d'automobiles

ment de 125 diamètres) est un acier industriel, extra-doux, dit « 53 IPH ». C'est un acier analogue à celui de la figure 75. L'échantillon a été poli, sans aucune attaque, et la photographie montre les scories en noir.

La figure 79 représente la forme sous laquelle se présente le sulfure de manganèse dans le fer fondu.

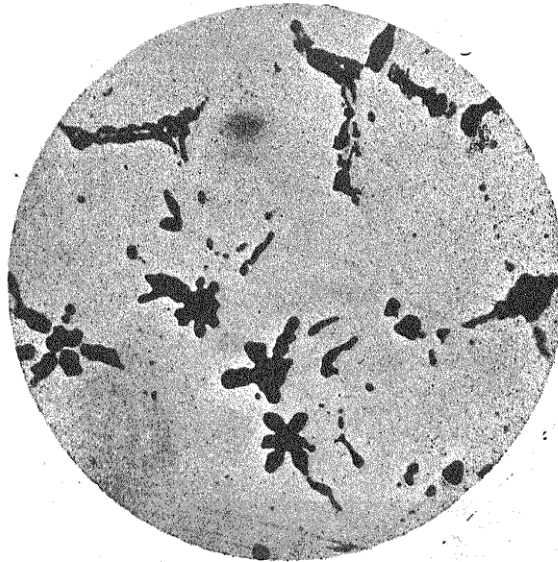


Fig. 79. — Sulfure de manganèse dans le fer fondu.

Métallographie des autres métaux. — Nous ne pouvons étudier ici la métallographie de tous les autres métaux; d'ailleurs, ainsi que nous l'avons déjà dit, la fonte et l'acier sont les plus importants au point de vue de la construction automobile.

La Métallographie microscopique

Disons cependant, à titre d'exemple de la métallographie des métaux autres que la fonte et l'acier, quelques mots de celle des alliages anti-friction.

L'étude métallographique montre que ces alliages sont constitués d'une matière extrêmement dure et et d'une autre extrêmement tendre.

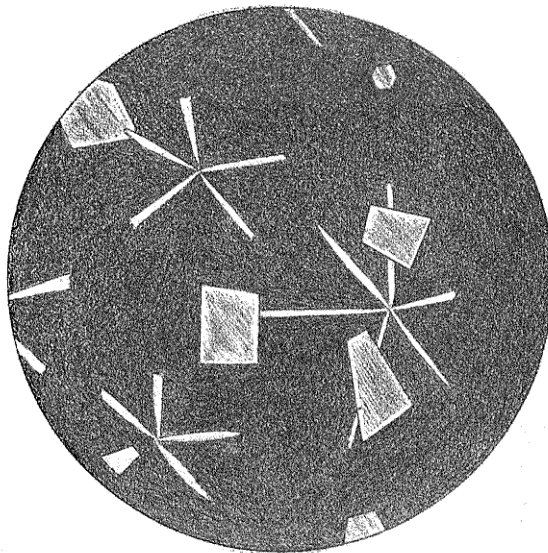


Fig. 80. — Alliage anti-friction.

La figure 80 montre l'aspect au microscope d'un alliage ayant la composition suivante :

Etain.....	83.33
Antimoine	11.11
Cuivre.....	5.55

Guide du constructeur d'automobiles

L'échantillon a été attaqué à l'acide.

Le constituant se détachant en gris sur le fond sombre a la composition Sn Cu^3 .

Quand le refroidissement de l'alliage a été rapide, les cristaux sont plus petits.

Si les cristaux sont trop grands et trop rapprochés, l'alliage est de mauvaise qualité.

CHAPITRE IV

Description d'un laboratoire d'usine

Pour compléter les indications que nous venons de donner sur les diverses méthodes d'essai permettant d'apprécier les qualités des métaux employés dans la construction des automobiles, nous allons donner la description d'un laboratoire modèle d'usine, comportant des installations pour pratiquer les principaux essais en usage dans la construction.

On sait que les usines de Dion-Bouton possèdent un laboratoire, dirigé par M. L. Guillet, dont les travaux font autorité en matière d'essais des métaux, lequel laboratoire peut-être pris, sans aucun doute, comme modèle de laboratoire industriel, MM. de Dion et Bouton ayant mis une certaine coquetterie à doter leur usine d'un laboratoire absolument parfait, muni de tous les appareils nécessaires pour les essais les plus complets.

Les laboratoires des usines de Dion-Bouton se divisent en trois parties bien distinctes :

- 1° Le Laboratoire de Chimie ;
- 2° Le Laboratoire de Physique ;
- 3° Le Laboratoire d'essais mécaniques.

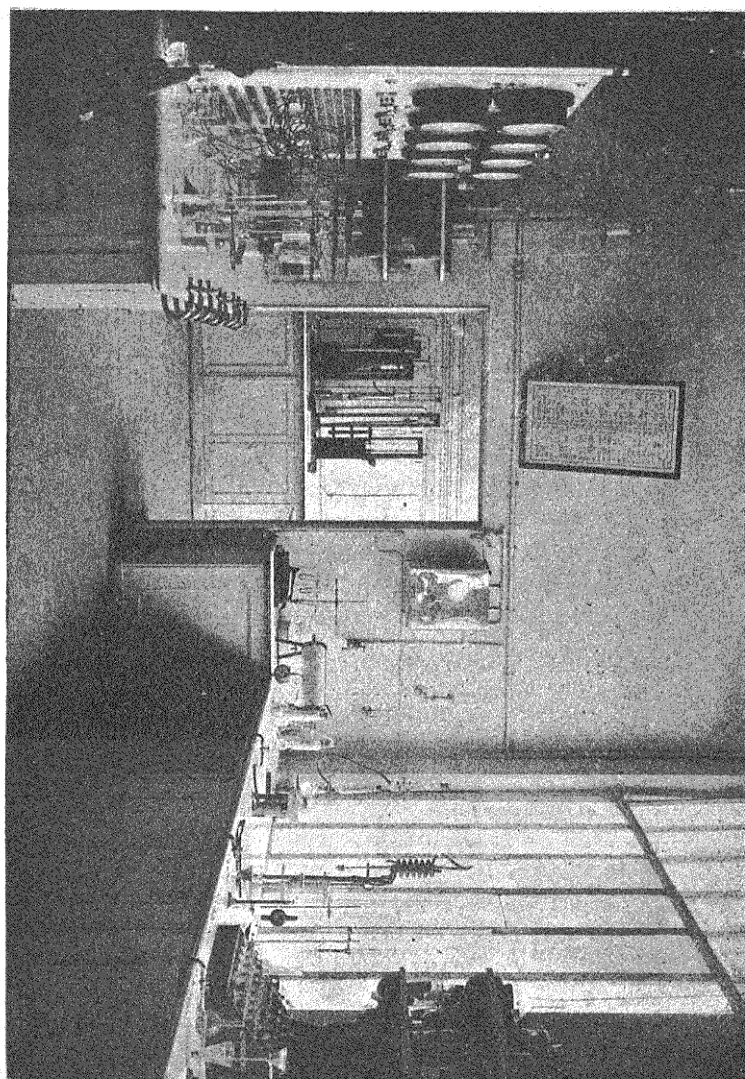
Guide du constructeur d'automobiles

Le *Laboratoire de Chimie* comprend cinq salles :

La première, très vaste, est réservée aux manipulations ordinaires, filtration, lavages, etc., et comprend une importante installation électrolytique dont nous tenons à dire quelques mots :

La méthode la plus moderne et assurément la plus pratique pour le dosage des métaux est l'électrolyse ; le principe sur lequel elle repose, est le suivant : le ou les corps à doser sont amenés en dissolution par l'intermédiaire de réactifs qui sont généralement des acides ; on fait à la liqueur ainsi obtenue les additions voulues de façon à avoir un électrolyte convenable, c'est-à-dire un liquide susceptible d'être décomposé par le courant électrique et de laisser déposer l'un des métaux à *l'état pur*, à l'un des pôles du courant. Le dépôt se fait sur appareil de platine. Il est de toute évidence que si l'on connaît la quantité de matière que l'on a mise en traitement, le poids de l'appareil de platine avant tout dépôt, le poids de cet appareil après dépôt *total* du métal que l'on dose, on peut en conclure la quantité de ce métal contenu pour 100 dans la matière première.

Avant d'arriver à la forme actuelle de l'installation d'électrolyse il a été fait de nombreux tâtonnements au laboratoire des usines de Dion-Bouton ; les deux bancs dont le laboratoire dispose maintenant permettent de faire simultanément seize électrolyses ; les appareils que l'on utilise sont ceux de M. Hollard, le savant directeur du laboratoire de la Compagnie Française des métaux, qui a donné de nombreux conseils pour l'installation ; ces appareils sont constitués par un tronc de cône en toile de platine sur lequel on affectue le dépôt à peser, et d'un panier



F. 81. — Le laboratoire des essais chimiques à l'usine de Dion-Bouton.

Guide du constructeur d'automobiles

qui forme l'autre électrode et entoure en quelque sorte le premier, de façon à diminuer la résistance et de permettre un dépôt bien uniforme. La caractéristique des bancs employés est la suivante : toutes les pièces métalliques, tous les contacts se font à l'abri des vapeurs toujours très nuisibles du laboratoire. Comme le montre la photographie, la disposition est des plus simples : un cadre de bois, renfermant les conducteurs et les contacts, sert de support aux électrodes qui plongent dans le récipient où se trouve la dissolution du métal à doser, lequel repose sur un support en bois ou sur une toile métallique chauffée, selon que l'opération doit avoir lieu à froid ou à chaud. Les résistances électriques qui permettent de régler le courant passant dans l'électrolyte, sont placées symétriquement dans des armoires qui se trouvent au-dessous du banc : *il y a une résistance par électrolyte*. Cette installation est des plus simples, relativement peu coûteuse, elle permet des analyses rapides et peu absorbantes ; elle doit être conseillée pour tous les laboratoires métallurgiques.

La seconde salle du Laboratoire de Chimie est presque entièrement consacrée aux évaporations et aux calcinations ; on y pratique aussi quelques manipulations qui demandent de l'espace et notamment quelques dosages des produits sidérurgiques, tels que carbone, soufre ; opérations demandant des appareils qui restent continuellement montés. C'est là aussi que l'on fait les déterminations physiques et chimiques sur les huiles, essences, alcools, opérations longues, délicates et... trop souvent odorantes.

Description d'un laboratoire

La troisième salle forme cour; elle renferme cinq fours (Forquignon, Perrot, Bigot, Damour) permettant de faire des fusions de métaux, alliages, etc..., de se livrer à des essais de cémentation, de recuit, etc., sur produits métallurgiques. Une hotte à fort tirage permet de faire tous les traitements à l'acide sulfhydrique, sans que l'on soit incommodé.

Insistons sur un point: une ligne à faible résistance électrique rejoint cette cour au bureau, de façon à pouvoir suivre sur un galvanomètre enregistreur les courbes de refroidissement d'alliages, le chauffage des fours, etc. A cet effet, on utilise un couple thermo-électrique placé dans le four ou dans l'alliage et dont le voltage est enregistré à distance sur un papier qui se déroule régulièrement.

La quatrième salle est consacrée aux dosages volumétriques, toujours nombreux dans un laboratoire métallurgique; à l'analyse des gaz et à la détermination de leur pouvoir calorifique. C'est dans cette salle que M. Guillet travaille actuellement cette question si importante des gaz dissous dans les aciers. Un travail très récent de M. Braune, fait au laboratoire de M. Henry le Chatelier, a montré que l'azote influe de la façon la plus nuisible sur les propriétés des aciers au carbone.

Le laboratoire possède un calorimètre Junkers qui permet de déterminer rapidement et d'une façon suffisamment précise le pouvoir calorifique, non seulement du gaz pauvre qui produit la force motrice dans l'usine et alimente les fours de cémentation

et de trempe, mais encore des essences, pétroles, alcools, etc.

Une dernière salle relève du laboratoire de chimie; elle ne renferme que les balances et se trouve à l'abri des émanations du laboratoire; elle contient des trébuchets et balances ordinaires, une balance hydrostatique pour la détermination approximative des densités, une balance Collot de haute précision, et enfin une balance Curie.

Le laboratoire d'essais mécaniques est muni de tous les appareils nécessaires aux essais de traction, de dureté, etc.

Ainsi qu'on peut le voir par la figure 82, plusieurs de ces appareils sont munis de systèmes enregistreurs permettant de conserver trace des essais mécaniques effectués.

Ces essais comprennent les essais mécaniques et les essais métallographiques.

Pour donner une idée de la façon dont sont pratiqués les essais mécaniques aux usines de Dion-Bouton, nous ne pouvons mieux faire que de reproduire l'article suivant de M. Guillet :

« Lorsque l'on envisage la question si importante de l'essai des matériaux, on est frappé — même lorsqu'on circonscrit le problème à l'étude des produits métallurgiques — de la complexité des méthodes employées ainsi que des hésitations que l'on peut éprouver dans l'interprétation des résultats.

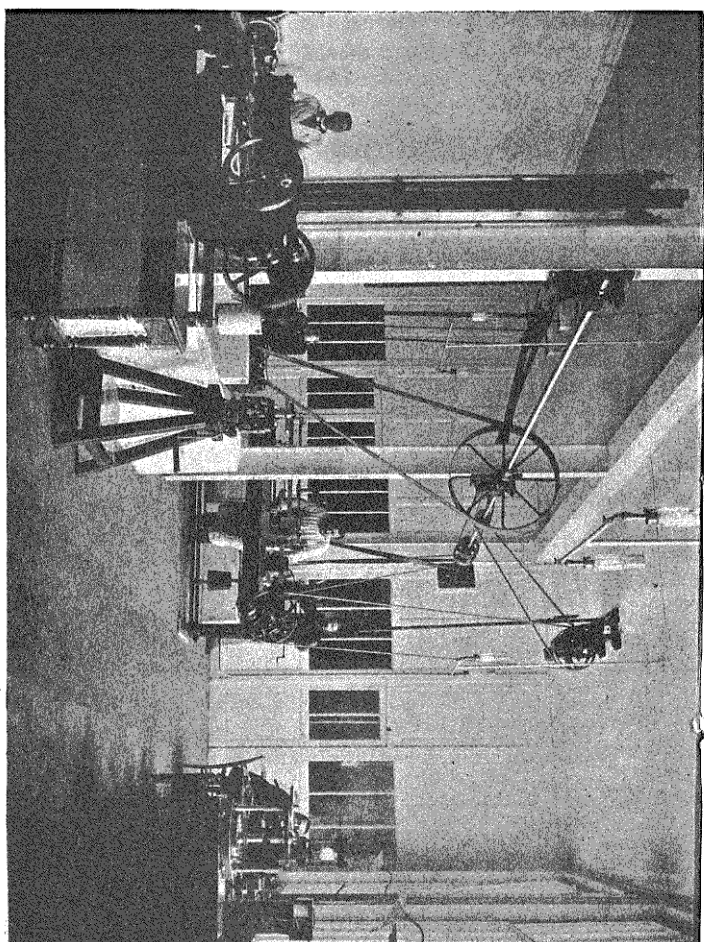


Fig. 82. — Le laboratoire des essais mécaniques à l'usine de Dion-Bouton.

Guide du constructeur d'automobiles

« Le but de cette étude est de montrer comment un ensemble d'essais, qui conduisent à une même conclusion, peut donner une sécurité si ce n'est absolue, du moins aussi parfaite que l'état actuel de la Science peut le permettre. — Nous prendrons, si vous le voulez bien, l'une des pièces les plus dangereuses de la voiture, celle qui, lorsqu'elle vient à se briser, entraîne les accidents les plus terribles : l'essieu avant. Nous le considérerons tel qu'il est constitué pour une voiture de Dion deux cylindres 1904 et nous suivrons les essais que l'on fait subir à ses différentes parties.

« Un tel essieu comprend :

« Le tube d'essieu ;

« L'axe du pivotement des roues directrices ;

« Le raccord de pivotement ;

« La fusée d'essieu ;

« L'appareil de roulement à billes.

« Nous laisserons de côté le raccord de pivotement et nous ne considérerons que les quatre parties principales en faisant remarquer que l'axe de pivotement des roues directrices, comme la fusée d'essieu, sont des parties pleines qui sont prélevées dans une barre et doivent subir les mêmes essais.

« Nous avons donc à essayer trois parties bien distinctes : un tube, une barre, une cuvette de roulement.

« Chacune de ces pièces doit correspondre à des nuances bien déterminées d'après les cahiers des charges de l'usine et nous tâcherons tout d'abord de faire comprendre comment peut se définir une nuance de métal.

Description d'un laboratoire

« Considérons une barre de section déterminée ; si par des moyens mécaniques assez puissants nous exerçons sur cette barre un effort à la traction, qui va sans cesse en croissant, il arrivera un moment où la barre se rompra ; cette rupture aura lieu sous un certain effort que permettra d'évaluer l'appareil utilisé ; cet effort sera la charge totale de rupture ; divisé par la section primitive de la barre, il donne la charge de rupture par millimètre carré, c'est-à-dire le nombre de kilogrammes maximum que peut supporter la pièce par millimètre carré sans se rompre. D'autre part si l'on rapproche les deux morceaux rompus on trouve généralement que l'éprouvette n'a pas la même longueur qu'avant l'opération. Si on a eu soin de placer sur l'éprouvette, à une certaine distance l'un de l'autre (100 m/m par exemple) deux signes, tels que des coups de pointeau, si on mesure cette distance après rupture en rapprochant les deux parties de l'éprouvette on trouvera généralement que la distance aura augmenté, elle sera devenue par exemple 120 millimètres. — On dira alors que l'allongement du métal aura été de 20 0/0.

« Il est de toute évidence qu'une telle mesure donnera des renseignements particulièrement précieux sur la ductilité du métal. D'autre part quand l'éprouvette est cassée, sa section est généralement, à l'endroit de la cassure, plus faible qu'elle n'était avant l'essai. Appelons S la section primitive du barreau, S' la section la plus petite après rupture ; on appellera striction la quantité :

$$\Sigma = \frac{S-S'}{S'} \times 100$$

« Enfin, si l'on considère la barre d'acier soumise à un effort croissant de traction et si l'on vient, pendant la toute première période de l'essai, à supprimer l'effort, toutes les molécules du métal reviennent en place, la matière n'a pris aucun allongement permanent, c'est-à-dire aucun allongement qui subsiste une fois l'effort supprimé. Mais à un moment donné, sous une charge déterminée, il se produira une déformation permanente; cette charge rapportée au millimètre carré de la section primitive, a reçu le nom de *limite élastique*. Nous n'avons encore parlé que de l'essai à la traction; il est très insuffisant pour donner idée de la résistance du métal à certains efforts, notamment à la compression et surtout au choc et au frottement.

« Des appareils spéciaux dont la description nous entraînerait trop loin et qui sont mis quotidiennement en action dans les laboratoires des usines de Dion-Bouton, permettent de faire des essais qui caractérisent la qualité du métal à ce point de vue.

« Nous passerons en revue les différentes opérations que doivent subir les parties pleines, le tube et l'acier destiné à faire la cuvette de roulement.

« *Essais des Barres.* — Les barres d'acier, qui doivent fournir les parties pleines, c'est-à-dire l'axe de pivotement des roues directrices et la fusée d'essieu, sont, comme toutes les matières premières qui entrent dans les usines de Dion, soumises à un cahier des charges particulièrement sévère.

« Des échantillons, dont le nombre est proportionnel à l'importance du lot livré, sont prélevés par les

Description d'un laboratoire

soins du magasin et envoyés avec un numéro d'ordre au laboratoire. Ils sont ensuite tournés aux dimensions voulues pour constituer l'éprouvette à traction ; puis l'éprouvette ainsi constituée ayant reçu les coups de pointeau à la distance voulue est placée sur la machine à la traction et cassée. Le diagramme fourni permet de lire la charge de rupture et la limite élastique ; l'allongement et la striction sont déduits de mesures prises sur l'éprouvette brisée.

« Lorsque l'échantillon a été prélevé dans une barre d'acier étiré, il faut avoir grand soin de la recuire à 900 degrés pendant environ une demi-heure avant de l'essayer.

« C'est qu'en effet l'écrouissage occasionné par l'étirage change sensiblement la nature de l'acier ; il est donc nécessaire de détruire cet effet ; cela s'obtient aisément par un recuit.

« De deux choses l'une, ou l'essai pratiqué sur les divers échantillons est satisfaisant et le lot est reçu, ou l'essai donne des résultats ne correspondant pas au cahier des charges et alors l'acier devra être examiné par d'autres moyens, analyses chimiques, micrographie.

« Si ces essais contrôlent le premier résultat obtenu, l'acier est refusé ; sinon il est étudié à nouveau par essai à la traction jusqu'à ce que l'on soit bien fixé sur sa qualité.

« *Essais du tube.* — Le tube est d'abord scié ; il est ensuite aplati à froid et découpé au profil voulu. Cela fait, il est recuit à 900 degrés pendant une demi-heure. Cette opération est nécessaire, car ces

Guide du constructeur d'automobiles

tubes sont utilisés après brasage, par conséquent certaines parties travaillent normalement après avoir subi un recuit; c'est donc la résistance après recuit et non après l'écrouissage occasionné par la fabrication même du tube qui nous intéresse; d'autre part, en aplatissant le tube, nous lui avons fait subir un nouvel écrouissage dont nous ne saurions tenir compte pour évaluer exactement la qualité du métal que nous avons entre les mains. L'éprouvette recuite est ensuite essayée à la machine à la traction avec les soins que nous avons indiqués plus haut.

« Si l'essai ne donne pas les résultats imposés par le cahier des charges, on commence par l'examiner au microscope.

« *Essais pratiqués dans la fabrication des cuvettes.* — La cuvette est une pièce cémentée trempée. On sait que l'opération de la cémentation consiste à prendre une pièce en acier extra-doux et à enrichir la surface en carbone, en la plaçant à une température suffisamment élevée dans un milieu susceptible de lui abandonner du carbone.

« On obtient ainsi une pièce dont l'âme est ou doit être résistante au choc et tenace, tandis que le bord possède une très grande dureté minéralogique et peut résister à un travail spécial, notamment au frottement.

« La cémentation des aciers a fait l'objet d'une étude scientifique de la part des laboratoires des usines de Dion-Bouton; nous ne pouvons donner ici les conclusions techniques auxquels nous avons été conduits; mais nous nous proposons toutefois

Description d'un laboratoire

de rappeler que nous avons déterminé d'une façon extrêmement précise l'influence du ciment, de la température et du temps sur les résultats de l'opération. Enfin nous recommandons avant toutes choses, l'emploi d'un ciment chimiquement défini,

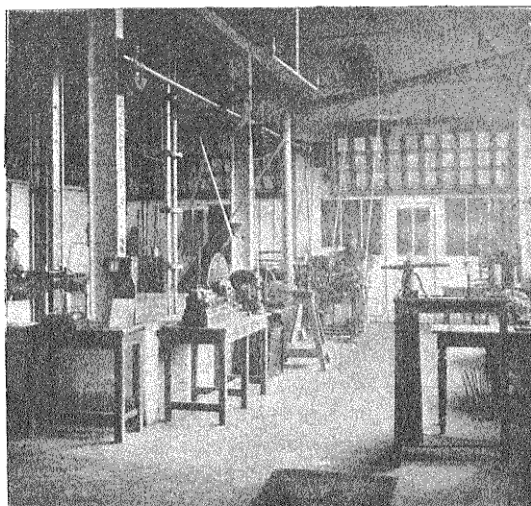


Fig. 83. — Laboratoire des essais mécaniques à l'usine de Dion-Bouton

c'est-à-dire obtenu par mélange de produits commercialement purs; il est nécessaire, lorsqu'on veut opérer scientifiquement, d'abandonner tous les ciments actuellement employés et constitués par des rognures d'os, de la suie, de la corne, etc...

« Bien que constituant un point extrêmement important pour l'industrie, cette étude sur la cémentation eût été absolument incomplète, si nous

Guide du constructeur d'automobiles

n'avions été conduits à définir d'une façon précise les propriétés mécaniques d'un acier cémenté trempé. Lorsqu'on utilise dans la cémentation un acier extra-doux, on obtient très souvent — surtout si la température de cémentation est élevée — un acier dont l'âme n'offre aucune résistance au choc. Cette fragilité est due au recuit plus ou moins prolongé à haute température, recuit qui est inhérent à l'opération même de la cémentation. Nous avons cherché de maintes façons à éviter cette fragilité, nous avons bien démontré que certaine trempe à haute température la détruisait, mais le résultat n'offre pas assez de certitude pour qu'on puisse le conseiller. Nous avons alors songé à étudier l'influence que pouvaient avoir les produits étrangers incorporés à l'acier ; il faut bien avouer d'ailleurs que nous étions guidés dans ces recherches par une autre idée, celle de la variation de la vitesse de pénétration du carbone dans les aciers renfermant certains produits qui devaient faciliter l'absorption, notamment le manganèse et le chrome.

« En étudiant les aciers au nickel, nous avons remarqué au microscope que la perlite (voir chapitre III) était bien mieux répartie dans l'acier à 2 0/0 de nickel que dans l'acier ordinaire.

« Nous basant sur ce fait, nous avons pensé qu'après cémentation un extra-doux, renfermant 2 0/0 de nickel, présenterait une âme beaucoup moins fragile que l'acier au carbone.

« Le résultat a dépassé toutes nos prévisions et nous pouvons déclarer que l'acier extra-doux à 2 0/0 de nickel est le véritable acier de cémentation et qu'il doit être employé exclusivement pour toutes pièces

Description d'un laboratoire

cémentées exigeant une sécurité absolue. Depuis que cette découverte est sortie des usines de Dion-Bouton, l'acier à 20/0 de nickel s'est rapidement vulgarisé et on le consomme à l'heure actuelle en grandes quantités.

« A la réception, cet acier est examiné par trois méthodes :

« 1° L'essai à la traction ;

« 2° L'essai micrographique ;

« 3° L'essai chimique qui consiste surtout dans un dosage électrolytique de nickel.

« L'acier reconnu bon est envoyé à l'atelier où l'on prend les cuvettes. Celles-ci sont ensuite retournées aux ateliers de cémentation et trempe, où elles sont traitées avec tous les égards qui leur sont dus.

« La question capitale est que l'on puisse être fixé sur la qualité de la pièce toute finie, sans avoir à y faire d'essai. A cet effet, dans toutes les opérations que subira la cuvette, elle sera suivie par un témoin, constitué par un morceau en même acier. Ce témoin sera donc cémenté, puis trempé dans les mêmes conditions que la cuvette.

« Il permettra de connaître mathématiquement la pénétration du carbone, approximativement la valeur en carbone de la couche extérieure, ce qui a une très grande importance, un trop fort pourcentage de carbone donnant un acier qui ne demandera qu'à se désagréger au frottement.

« On pourra de plus savoir si l'acier a été bien trempé, si son âme ne présente pas une certaine fragilité, etc. Enfin, le témoin permettra de déterminer le coefficient de dureté de l'échantillon.

« Qu'on me permette de m'arrêter un instant sur cette question si intéressante et sur la méthode employée qui est toute nouvelle puisqu'il en a été question pour la première fois au Congrès de l'Association Internationale des méthodes d'essais des matériaux de construction à Budapest. Cette méthode préconisée par M. Brinell, le savant directeur des grandes Aciéries de Fagersea (Suède), consiste à déterminer l'empreinte d'une bille en acier dur dans l'acier dont on veut déterminer la dureté et cela, bien entendu, sous une pression connue. Il est de toute évidence que, pour une même pression, le diamètre de l'empreinte obtenue est d'autant plus grand que l'acier est moins dur, cette expression s'entendant au sens minéralogique du mot.

« Si donc on mesure ce diamètre, on peut en déduire la surface S de la calotte sphérique imprimée par la bille dans le métal, le chiffre de dureté, dit chiffre de Brinell sera défini comme suit :

$$A = \frac{P}{S}$$

P étant la pression sous laquelle on a agi, S la surface de la calotte sphérique.

« Pour mettre en pratique cet essai qui est courant dans les laboratoires de Dion-Bouton non seulement pour les aciers, mais encore pour leurs bronzes, leurs laitons, etc., etc., on utilise au laboratoire des usines de Dion-Bouton la presse que M. Le Châtelier a fait construire par M. Carpentier pour l'essai des ciments. Elle permet en même temps de suivre les déformations subies par le métal.

« Le morceau d'acier qui a subi le même traitement

Description d'un laboratoire

que la cuvette de roulement, le témoin, est essayé à la dureté sous la pression de trois tonnes; il doit fournir alors un chiffre de Brinell connu.

« Il y a un point sur lequel nous n'avons pas insisté, il a trait à *l'influence de la température sur le résultat de la cémentation*; qu'il nous suffise de dire qu'une différence de 100° dans le chauffage de la boîte de cémentation peut faire varier considérablement les résultats de la cémentation; c'est ainsi que, dans ces conditions, la vitesse de pénétration du carbone peut varier du simple au double. On conçoit donc aisément l'importance que possède la connaissance parfaite de la température à laquelle se trouve le four à cémenter, ou, plus précisément, la boîte à cémenter. »

Nous avons vu (1^{re} partie, chapitre V) les principales méthodes employées et les principaux instruments en usage pour la mesure des températures élevées. Toutes ces méthodes peuvent trouver leur application ici, et il serait même à souhaiter que toutes les usines de construction d'automobiles prissent l'excellente habitude d'opérer les cémentations d'une façon pour ainsi dire scientifique, c'est-à-dire en mesurant avec précision les températures du four dans lequel se fait l'opération.

La figure 84 montre l'application à cet usage de la lunette Féry dont nous avons donné la description dans un chapitre antérieur (Voir 1^{re} partie, chap. III). Il va sans dire que l'on pourrait employer dans le même but tout autre système pour la mesure des températures élevées. Beaucoup d'usines emploient,

Guide du constructeur d'automobiles

notamment, le couple thermo-électrique de M. le professeur Le Chatelier.



Fig. 84. — Mesure de la température dans un four à cémenter au moyen de la lunette pyrométrique Féry.

Description d'un laboratoire

Conclusion. — L'emploi de toutes ces méthodes scientifiques d'essais : essais chimiques, essais mécaniques (surtout par les méthodes récentes que nous avons décrites), essais métallographiques, l'application des procédés de mesure aux opérations telles que la cémentation et la trempe, permettent de donner à la construction un caractère de précision (au point de vue des propriétés des matériaux employés) qui lui a pendant longtemps fait défaut. On peut prévoir que les usines cesseront un jour de se contenter des méthodes empiriques un peu trop en usage encore dans beaucoup d'usines, pour généraliser l'adoption de ces méthodes scientifiques. La construction automobile se doit à elle-même d'être la première à montrer la voie dans ce sens aux autres branches de la construction mécanique, car, par l'importance toute particulière que présente pour elle la perfection de fabrication et par son rapide développement, elle doit, en tout et pour tout, rester toujours à la tête du progrès.

FIN

TABLE ANALYTIQUE DES MATIÈRES

	Pages.
INTRODUCTION.....	5

PREMIÈRE PARTIE

CHAPITRE PREMIER

LES OUTILS

Généralités.....	45
Métaux employés.....	46
Avantages des aciers spéciaux.....	46
Travail des aciers à outils.....	46

CHAPITRE II

GÉNÉRALITÉS SUR LES ACIERS A OUTILS

Diverses sortes d'aciers à outils.....	48
Acier Martin.....	49
Acier puddlé.....	49
Acier Bessemer.....	49
Acier au creuset.....	49
Acier corroyé.....	49
Acier fondu.....	49
Supériorité de l'acier au creuset.....	49
<i>Aciers ordinaires</i>	49
<i>Aciers spéciaux</i>	49

Table analytique des matières

	Pages.
Influence des impuretés sur les propriétés des aciers.....	20
Tolérance dans la teneur en impuretés.....	20
Effet des impuretés.....	20
<i>Origine et influence des divers corps étrangers pouvant se trouver dans un acier.....</i>	21
Soufre.....	21
Phosphore.....	22
Silicium.....	23
Cuivre.....	25

CHAPITRE III

LES ACIERS ORDINAIRES A OUTILS

Définition.....	26
Classification.....	26
Échelle de Tunner.....	26
Autres désignations.....	27
Classification des aciéries de Bismarkhütte.....	27
Classification de M. Campredon.....	28
Forme sous laquelle sont livrés au consommateur les aciers à outils.....	29
Qualité primordiale à rechercher dans un acier ordinaire à outils.....	30
Aciers de Sheffield.....	30

CHAPITRE IV

LES ACIERS SPÉCIAUX A OUTILS

Définition.....	32
<i>Aciers au tungstène.....</i>	32
Teneur en tungstène des aciers au tungstène....	33
Inconvénient des aciers au tungstène.....	33
<i>Aciers au chrome.....</i>	33
Application des aciers au chrome.....	33

Guide du constructeur d'automobiles

	Pages.
Teneur en chrome des aciers au chrome.....	34
<i>Aciers au nickel</i>	34
Usages des aciers au nickel.....	34
<i>Aciers au manganèse</i>	34
Teneur en manganèse des aciers ordinaires à outils.....	34
Influence du manganèse.....	35
Aciers au manganèse proprement dits.....	35
Propriétés de ces aciers.....	35
Aciers à haute teneur en manganèse.....	35
Propriétés de ces aciers.....	36
<i>Classification des aciers spéciaux à outils</i>	36
<i>Aciers à outils naturellement durs</i>	36
Acier Boreas.....	36
Acier Mushet.....	37
Acier naturellement dur de Bismarkhütte.....	37
Acier de Styrie.....	37
Propriétés des aciers naturellement durs.....	38
Effet de la trempe sur ces aciers.....	38
<i>Aciers spéciaux pour outils de tour</i>	38
Composition de ces aciers.....	38
Acier Poldy.....	38
Acier Novo.....	38
Acier Express.....	38
Acier Speedicut.....	38
Diagrammes des vitesses et avances à donner à des forets en acier Speedicut.....	38
<i>Aciers pour aimants</i>	39
Composition de ces aciers.....	42
Influence du tungstène sur les propriétés magnétiques.....	42
<i>Aciers pour fraises</i>	42
Qualités d'un bon acier pour fraises.....	43
Acier Böhrer-Rapid.....	43
Acier Poldi-Hütte.....	43
Analyse d'un acier B pour fraises.....	43
Analyse d'un acier P pour fraises.....	44

Table analytique des matières

	Pages.
Analyse d'un acier K pour fraises.....	44
Analyse d'un acier T pour fraises.....	44
Analyse d'un acier S pour fraises.....	44
Avantages des fraises à grande vitesse de coupe.	44

CHAPITRE V

LA TREMPE ET LE FORGEAGE DES OUTILS

Phénomène de la trempe.....	46
Effet de la trempe.....	46
Le recuit.....	46
Effet du recuit.....	47
Utilité du recuit.....	47
A. — Pratique du chauffage de l'acier à outils. ..	47
Principes fondamentaux du chauffage de l'acier.....	48
<i>Combustibles employés</i>	48
<i>Charbon de forge</i>	48
Tour de main pour l'emploi du charbon de forge ou houille grasse maréchale.....	48
<i>Cokes durs ou cokes de fonderie</i>	49
Fours cylindriques pour l'emploi de ces cokes....	50
<i>Appareils de chauffage</i>	50
<i>Forges ouvertes ou feux de maréchal</i>	51
Modification de ces forges.....	51
Inconvénients du chauffage des outils par contact direct avec le combustible....	51
<i>Fours à cuve</i>	52
<i>Moufles</i>	53
Moufles à gaz.....	53
Chauffage des outils dans des caisses.....	54
<i>Chauffage des outils dans des bains métalliques</i> ...	54
Emploi du plomb fondu.....	54
Nécessité de pyromètres.....	55
<i>Chauffage des outils dans des sels fondus</i>	55
Emploi du sel marin.....	55

Guide du constructeur d'automobiles	Pages.
Addition de carbonate de soude.....	55
Addition de salpêtre et de chromate de potasse..	55
Addition de ferro-cyanure de potassium.....	56
Danger de surchauffage.....	56
Précautions à prendre pour le chauffage des outils dans des sels fondus.....	56
Évaluation de la température de l'acier.....	57
Évaluation approximative par les phénomènes lumineux accompagnant l'échauffement de l'acier.....	57
Mesure des températures élevées au moyen de pyromètres.....	58
Avantage des pyromètres.....	58
<i>Pyromètre thermo-électrique Le Chatelier.....</i>	<i>58</i>
Principe des pyromètres thermo-électriques....	58
Couple platine + platine rhodié de M. H. Le Cha- telier.....	59
Soudure des extrémités des fils du couple.....	59
Soudure à l'or.....	59
Soudure au palladium.....	59
Soudure autogène.....	60
Enduit protecteur de M. Roberts Austen.....	60
Emploi de fils d'amiante.....	60
Tubes de porcelaine protecteurs.....	60
Pyromètres montés dans des cannes en fer ou en nickel.....	60
Défauts des couples platine + platine rhodié....	61
Couples de fer + Constantan.....	61
Relation entre la température et la force électro- motrice développée.....	61
<i>Mesure de la force électro-motrice au moyen de gal- vanomètres.....</i>	<i>62</i>
<i>Galvanomètre aperiodique Deprez-d'Arsonval.....</i>	<i>62</i>
<i>Galvanomètre pyrométrique à lecture directe de M. H. Le Chatelier.....</i>	<i>62</i>
Description de l'instrument.....	63

Table analytique des matières

	Pages.
Graduation	63
Réglage de l'appareil.....	63
<i>Galvanomètre pyrométrique enregistreur de M. H. Le Chatelier</i>	65
Description.....	65
Graduation de l'appareil.....	66
Étalonnage	66
Exemple de lecture.....	67
Réglage de l'appareil.....	67
<i>Graduation d'un couple thermo-électrique</i>	68
Nécessité de faire la graduation pour chaque nouveau couple.....	69
Opération de la graduation.....	70
Exemple d'une opération.....	71
Exemple de courbe d'étalonnage.....	72
Application du pyromètre de M. H. Le Chatelier à la mesure des températures d'un four.....	73
Disposition du couple à demeure dans un courant d'air chaud.....	73
<i>Lunette pyrométrique Féry</i>	75
Principe.....	75
Loi de Stefan	75
Description de l'appareil	76
Télescope pyrométrique Féry.....	78
<i>Lunette pyrométrique ou Pyromètre optique Le Chatelier</i>	81
Description	81
Avantages de l'emploi systématique de pyromètres..	82
B. — Refroidissement de l'outil ou trempe proprement dite	83
Règle à suivre pour la trempe.....	83
Précautions à prendre.....	83
<i>Liquides de refroidissement</i>	84
Eau de source ou de puits.....	84
Eau de rivière	84
Eau ayant déjà servi à la trempe.....	84

Guide du constructeur d'automobiles

	Pages.
Solution de sel marin.....	85
Eau acidulée.....	85
Solution de carbonate de soude.....	85
Solution de sel ammoniac.....	85
Eau de savon.....	85
Lait de chaux.....	85
Corps gras.....	85
Trempe à l'huile.....	85
Trempe au suif.....	85
Trempe au mercure.....	85
Emploi de plomb, étain ou zinc fondus.....	85
Trempe dans un courant d'air.....	86
C. — Recuit des outils	86
Recuit par la chaleur interne.....	87
Recuit au moyen d'une source de chaleur exté- rieure.....	87
Recuit par la chaleur interne et par une source extérieure.....	87
Appréciation du degré de recuit.....	87
Trempe à l'eau et recuit à l'huile.....	88
Températures correspondant aux diverses couleurs de recuit.....	88
Choix de la couleur de recuit.....	88
Forgeage de l'acier à outils	89
Traitement des principaux outils usuels et aciers convenant pour leur fabrication	89
<i>Outils de tour</i>	90
Qualité d'acier à employer.....	90
Forgeage.....	90
Trempe.....	90
<i>Fraises</i>	90
<i>Forets hélicoïdaux</i>	90
Acier à employer.....	90
Trempe.....	90
Liquide de trempe.....	91
Recuit.....	91

Table analytique des matières

	Pages.
<i>Forets ordinaires</i>	91
Acier à employer.....	91
Forgeage.....	91
Trempe.....	91
<i>Mèches</i>	92
<i>Outils de raboteuses et d'étaux-limeurs</i>	92
<i>Tarauds</i>	92
Acier à employer.....	92
Fabrication.....	92
Trempe.....	92
<i>Coussinets de filières à fileter</i>	92
Acier à employer.....	92
Trempe.....	93
Recuit.....	93
<i>Alésoirs</i>	93
<i>Burins</i>	93
Acier à employer.....	93
Forgeage.....	93
Trempe.....	93
<i>Tranches</i>	94
Acier à employer.....	94
Forgeage, trempe et recuit.....	94

CHAPITRE VI

LES MEULES

Composition des meules.....	95
I. Corps durs servant à la fabrication des meules.	96
<i>a) Produits naturels</i>	96
Emeri.....	96
Emeri de Naxos.....	96
Emeri de Smyrne.....	96
Emeri des États-Unis.....	96
Analyses d'émeris de Smyrne et de Naxos.....	97
Emeri français ou émeri de l'Ouest.....	97

Guide du constructeur d'automobiles

	Pages.
Emeri artificiel obtenu par calcination d'une bauxite	97
Préparation de l'émeri.....	97
b) <i>Produits artificiels</i>	97
Carborundum.....	97
Préparation et propriétés du carborundum.....	98
Corindons ou émeris artificiels.....	98
II. <i>Agglomérants</i>	99
Conditions auxquelles doit satisfaire un bon agglomérant	99
Principaux agglomérants.....	99
Silicate de soude.....	99
Caoutchouc vulcanisé.....	99
Pâtes à base de kaolin ou de feldspath.....	100
Meules vitrifiées.....	100
Pâtes à base d'argile (meules en carborundum)..	100
Oxychlorure de magnésie.....	101
Tanin (meules tanite).....	101
Gomme laque.....	101

DEUXIÈME PARTIE

CHAPITRE PREMIER

LES MÉTAUX EMPLOYÉS DANS LA CONSTRUCTION DES AUTOMOBILES

Généralités.....	103
Fontes.....	103
Acier.....	103
Aciers spéciaux.....	104
Cuivre pur.....	104
Alliages de cuivre.....	104
Aluminium	104
Métal anti-friction.....	105

Table analytique des matières

CHAPITRE II

LA FONTE

	Pages.
Généralités	406
Définition.....	406
Démarcation entre les fontes, les aciers et le fer.....	406
<i>Propriétés du fer pur</i>	406
États allotropiques du fer.....	407
Fer α	407
Fer β	407
Fer γ	407
Atténuation des propriétés magnétiques du fer pur à 740°.....	408
Variation de la résistance électrique du fer pur chauffé	408
Courbe de refroidissement du fer.....	408
Propriétés du fer aux trois états.....	410
Notions sommaires de métallurgie du fer	410
<i>Procédé direct</i>	410
Foyer catalan.....	410
<i>Procédé indirect</i>	411
Définition.....	411
<i>Minerais de fer</i>	411
Magnétite.....	411
Oligiste ou fer oligiste.....	412
Hématite rouge.....	412
Limonite, hématite brune, minerais oolithiques.	412
Sidérose ou fer spathique.....	412
<i>Principe de la métallurgie du fer</i>	412
Réduction de l'oxyde de fer par l'oxyde de carbone..	412
<i>Le haut fourneau</i>	413
Généralités	413
Étalages.....	414
Ouvrage.....	414
Creuset.....	414
Dame	414

Guide du constructeur d'automobiles

	Pages.
Trou de coulée.....	414
Gueulard.....	414
Dimensions des hauts fourneaux.....	414
Hauteur.....	414
Diamètre au gueulard.....	414
Hauteur du ventre.....	415
Diamètre au ventre.....	415
Fondations du haut fourneau.....	415
Construction du haut fourneau.....	415
Épaisseur des parois.....	417
Fermeture du gueulard.....	417
Cup and cone.....	417
Prises de gaz.....	417
Machine soufflante.....	417
Chauffage du vent.....	417
Appareils Whitwell.....	417
Appareils Cowper.....	417
Principe de ces appareils.....	417
Fonctionnement des appareils de chauffage du vent...	418
Marche du haut fourneau.....	418
Allumage du haut fourneau.....	420
Laitier.....	422
Coulée de la fonte.....	422
Fours à coke.....	422
Ensemble d'une installation.....	422
Composition des charges.....	424
Minerai.....	424
Fondant.....	424
Castine.....	425
Erbue.....	425
Combustible.....	425
Marche ascendante des gaz.....	425
Réactions.....	425
Marche descendante des solides.....	426
Classification des fontes.....	426
A. Fontes ordinaires.....	427

Table analytique des matières

	Pages.
a) Fontes blanches.....	427
Définition.....	427
Usages.....	427
Fabrication.....	427
b) Fontes grises.....	427
Définition.....	427
Usages.....	427
Fabrication.....	427
c) Fontes truitées.....	427
Fontes rubanées.....	428
B. Fontes spéciales.....	428
Spiegel ou Spiegel-eisen.....	428
Ferro-manganèses.....	428
Ferro-siliciums.....	428
Ferro-silicium-manganèses.....	428
Ferro-chromes.....	428
Ferro-tungstènes.....	428
Emplois des fontes.....	428
Composition et qualités à rechercher pour les divers emplois.....	428
A. Fontes de moulage.....	429
Leur richesse en graphite.....	429
Influence du silicium.....	429
Influence du manganèse.....	429
Influence du phosphore.....	429
Influence du soufre.....	430
Qualités à rechercher dans les fontes de moulage.....	430
Classification des fontes de moulage.....	430
Fontes pour moulages en coquille.....	434
B. Fontes d'affinage.....	434
Composition.....	434
Fontes pour le traitement au bas-foyer.....	434
Fontes pour le puddlage bouillant.....	434
Qualités à rechercher dans les fontes d'affinage.....	434
C. Fontes pour acier.....	434
Qualités à rechercher.....	433

CHAPITRE III

L'ACIER

	Pages.
Généralités.....	134
Définition.....	134
Propriétés.....	134
Emplois de l'acier.....	135
Fabrication de l'acier.....	135
<i>Affinage de la fonte.....</i>	<i>135</i>
a) Procédé comtois.....	136
Bas-foyer.....	136
b) Puddlage.....	136
Fours à puddler.....	136
Pratique du puddlage.....	136
Puddlage bouillant.....	138
Puddlage sec.....	138
Puddlage à bras.....	138
Puddlage mécanique.....	139
Four à puddler tournant système Danks.....	139
<i>Procédé Bessemer.....</i>	<i>139</i>
Convertisseur Bessemer.....	139
Travail basique ou procédé Thomas.....	140
Marche de l'opération.....	140
<i>Procédé Martin.....</i>	<i>142</i>
Récupérateur Siemens.....	142
Four Siemens-Martin.....	142
<i>Fabrication de l'acier par cémentation.....</i>	<i>142</i>
Principe de la méthode.....	142
Caisses pour la cémentation.....	144
Four de cémentation.....	144
<i>Fusion de l'acier au creuset.....</i>	<i>144</i>
Creusets.....	145
Fabrication des creusets.....	145
Fours à creusets.....	146
<i>Classification et propriétés des aciers ordinaires...</i>	<i>147</i>

Table analytique des matières

	Pages.
Aciers doux.....	147
Aciers durs.....	147
Points de transformation de l'acier.....	147
Courbe de refroidissement.....	150
<i>Phénomène de la récalescence</i>	151
Dissociation de la cémentite.....	152
Étude de la dilatation de l'acier.....	152
Méthode de MM. Charpy et Grenet.....	153
Four Charpy-Grenet pour l'étude des dilatations.....	154

CHAPITRE IV

LES ACIERS SPÉCIAUX

Fabrication des aciers spéciaux.....	156
A. — Aciers ternaires	157
<i>Aciers au nickel</i>	157
Diverses sortes d'aciers au nickel.....	157
Cémentation des aciers au nickel.....	157
Propriétés mécaniques.....	158
Usages des aciers au nickel.....	159
<i>Aciers au chrome</i>	159
Propriétés.....	159
Usages.....	160
<i>Aciers au silicium</i>	160
Propriétés.....	160
Usages.....	160
<i>Aciers au tungstène</i>	160
Composition.....	160
Propriétés mécaniques.....	161
Usages.....	161
B. — Aciers quaternaires	161
<i>Aciers chrome-nickel</i>	161
Propriétés.....	161
Usages.....	161
<i>Acier NY (Commentry-Fourchambault)</i>	161

Guide du constructeur d'automobiles

	Pages.
Propriétés mécaniques.....	162
Usages.....	162
Classification, d'après M. Guillet, des aciers spéciaux employés dans la construction des automobiles..	163

CHAPITRE V

LE CUIVRE

Généralités.....	164
Propriétés physiques du cuivre.....	164
Propriétés chimiques du cuivre.....	165
Notions de métallurgie du cuivre.....	165
<i>Minerais de cuivre.....</i>	<i>165</i>
Cuivre natif.....	165
Oxyde rouge de cuivre.....	165
Carbonate du cuivre.....	165
Minerais sulfurés.....	165
Chalkosine.....	165
Chalkopyrite.....	165
<i>Principe de la métallurgie du cuivre.....</i>	<i>166</i>
Grillages et fusions répétés.....	166
Fabrication du cuivre au convertisseur (Manhès)....	167
Méthodes de voie humide.....	168
<i>Qualités recherchées dans le cuivre.....</i>	<i>168</i>
Influence des métaux étrangers.....	168

CHAPITRE VI

LES ALLIAGES DU CUIVRE. — ALLIAGES DIVERS

Préparation des alliages.....	169
<i>Laitons.....</i>	<i>169</i>
Analyses de laitons :	
Laiton anglais.....	169
Laiton de Romilly.....	169
Laiton d'Augsbourg.....	170

Table analytique des matières

	Pages.
Laiton en feuilles.....	170
Fil de laiton.....	170
<i>Bronzes</i>	170
Analyses de bronzes :	
Pour coussinets ordinaires.....	170
Pour gros coussinets.....	170
Pour coussinets principaux.....	170
Pour robinets et presse-étoupes.....	171
Bronze phosphoreux.....	171
Alliages anti-friction.....	171
Métal pour coussinets.....	171
Métal Magnolia.....	171
Paliers pour hélices.....	171

CHAPITRE VII

L'ALUMINIUM ET SES ALLIAGES

Généralités.....	173
Propriétés physiques de l'aluminium.....	174
Propriétés chimiques.....	174
Propriétés mécaniques.....	175
Notions de métallurgie de l'aluminium	175
<i>Minerais d'aluminium</i>	175
Cryolithe.....	176
Bauxite.....	176
<i>Procédé Héroult</i>	176
Réactions.....	176
Préparation des matières premières.....	177
Appareils.....	178
Marche de l'opération.....	179
Alliages d'aluminium	181
1 ^o <i>Alliages légers</i>	181
Cuivre-aluminium.....	181
Propriétés.....	182
Nickel-aluminium.....	182

Guide du constructeur d'automobiles

	Pages.
Silicium-aluminium.....	183
Partinium.....	183
2° <i>Alliages de densité moyenne</i>	184
3° <i>Alliages lourds</i>	184
Bronzes et laiton d'aluminium.....	184
<i>Autres alliages d'aluminium</i>	184
Alliages Cothias.....	184

TROISIÈME PARTIE

CHAPITRE PREMIER

ESSAIS MÉCANIQUES

Généralités.....	187
Diverses sortes d'essais mécaniques.....	188
Conditions que doit remplir une bonne méthode d'essais mécaniques.....	189
Dureté et fragilité.....	190
Essais de traction	191
<i>Définitions</i>	191
Charge de rupture.....	191
Limite élastique.....	191
Allongement total pour cent.....	191
Striction.....	191
Éprouvettes d'essai.....	192
Éprouvettes pour tôles.....	192
Mode d'attache des éprouvettes sur la machine.....	193
Machines employées dans les essais à la traction	195
1° <i>Machines à leviers</i>	195
Machines à levier simple, à plateau.....	195
Machines romaines simples.....	196
Machines romaines à leviers multiples.....	197
2° <i>Machines à manomètre ou machines à mercure</i> ..	199
Machine Thomasset.....	200

Table analytique des matières

	Pages.
Machine du colonel Maillard.....	203
Mesure des charges de rupture et des limites élastiques.....	207
Charge de rupture totale.....	207
Limite élastique totale.....	207
Mesure de l'allongement total pour cent.....	208
Mesure de la striction.....	208
Appareils enregistreurs.....	208
Méthode de M. Frémont pour la mesure rigoureuse de la limite élastique.....	209
Méthode de M. Guillery pour la détermination de la limite élastique.....	210
Essais au choc.....	212
Fragilité et ténacité.....	212
Importance de la caractéristique fragilité.....	213
Meilleure méthode de mesure de la fragilité.....	214
Éprouvettes pour essais au choc.....	214
Barreaux entaillés.....	215
Appareils pour essais au choc.....	215
Moutons.....	215
Méthodes pour les essais au choc.....	216
Essai par coups successifs.....	216
Essai par un seul coup de mouton produisant la rupture.....	216
Méthode des barrettes entaillées.....	217
Mouton Frémont.....	218
Mouton rotatif Guillery.....	220
Calculs d'établissement du mouton Guillery.....	224
Chances d'erreurs.....	225
Essais de dureté.....	227
Méthode Brinell.....	228
Chiffre de dureté de Brinell ou chiffre de Brinell.....	228
Appareil Guillery pour l'essai Brinell.....	229
Appareil portatif.....	229
Appareil fixe.....	230
Réglette de M. H. Le Chatelier.....	232

Guide du constructeur d'automobiles

	Pages.
Mesure de la limite élastique par l'appareil Guillery.	233
Essais à la flexion	233
Essais de pliage.....	233
Déformations permanentes.....	234
Limite élastique de flexion.....	234
Essais de compression	234
Inverseur.....	234
Autres essais mécaniques	234
Essais de cisailage.....	234
Essais de poinçonnage.....	234

CHAPITRE II

ANALYSE CHIMIQUE DES MÉTAUX ET ALLIAGES

<i>Prise d'essai pour l'analyse</i>	236
Au foret.....	237
Au marteau.....	237
A la lime.....	237
Cas d'un acier trempé.....	237
I. — Analyse des fontes et des aciers	238
1. Dosage du carbone	238
Divers états du carbone dans les fontes et aciers.	238
Carbone total.....	239
A. <i>Dosage du carbone total</i>	240
Oxydation par l'oxygène au rouge.....	240
Oxydation par le bisulfate de potasse au rouge..	244
Dosage par voie humide, par attaque directe et simultanée au moyen d'acide sulfurique et d'acide chromique.....	246
Dosage volumétrique de l'acide carbonique.....	249
B. <i>Dosage du graphite et du carbone graphitique</i> ...	249
C. <i>Dosage du carbone combiné ou dissous</i> (carbone du carbure et carbone de trempe).....	250
Procédé Eggertz.....	250
Exemple.....	252

Table analytique des matières

	Pages.
2. Dosage du soufre.....	252
A. <i>Oxydation directe et dissolution simultanée du soufre et du fer...</i>	252
Causes d'erreur.....	253
B. <i>Dissolution du métal seul et mise en liberté du soufre et du sulfure demeuré insoluble.....</i>	253
C. <i>Dégagement du soufre à l'état de combinaison volatile.....</i>	254
a) Méthode Boussingault.....	254
Attaque par l'acide chlorhydrique.....	255
b) Procédé Rollet.....	255
c) Méthode Schloësing.....	258
Méthodes colorimétriques.....	259
3. Dosage du phosphore.....	259
A. <i>Dosage à l'état de phosphomolybdate.....</i>	260
B. <i>Dosage à l'état de pyrophosphate de magnésie..</i>	261
Méthode de M. Ad. Carnot.....	261
Dosage volumétrique..	266
4. Dosage du silicium.....	266
I. Dosage par voie sèche.....	266
II. Dosage par voie humide.....	267
5. Dosage du manganèse.....	267
Méthode colorimétrique par les métaphosphates manganiques.....	268
6. Dosage du nickel.....	269
Séparation du fer des autres métaux par l'éther (méthode de J. Rollet).....	269
7. Dosage du chrome.....	271
Dosage volumétrique du chrome par l'eau oxygénée	272
8. Dosage du tungstène.....	274
9. Dosage de l'aluminium.....	275
II. — Analyse des bronzes et des laitons.....	276
1. <i>Analyse d'un bronze ordinaire.....</i>	276
Tableau synoptique de l'analyse.....	280
2. <i>Analyse d'un bronze phosphoreux.....</i>	281
Tableau synoptique de l'analyse.....	284

Guide du constructeur d'automobiles

	Pages.
3. <i>Analyse d'un laiton</i>	285
Tableau synoptique de l'analyse.....	287
Analyse électrolytique.....	288
III. — Analyse de l'aluminium et de ses alliages.	288
Méthode de M. Moissan.....	289
4°) <i>Analyse de l'aluminium exempt de cuivre</i>	290
Dosage du silicium.....	290
Dosage de l'aluminium et du fer.....	291
Dosage du fer.....	292
Dosage de la soude.....	293
Dosage du carbone.....	294
Dosage de l'alumine préexistante.....	295
2°) <i>Analyse des alliages de cuivre et d'aluminium</i>	295
Dosage du cuivre.....	295
Dosage du silicium, de l'aluminium et du fer....	296
Exemples d'analyses d'aluminums du commerce.	296

CHAPITRE III

LA MÉTALLOGRAPHIE MICROSCOPIQUE

I. — Technique de la métallographie microscopique	297
Généralités.....	297
1°) <i>Préparation de la surface polie</i>	298
Découpage.....	298
Dégrossissage.....	298
Polissage.....	299
Préparation des matières à polir.....	301
Supports pour polissage.....	301
Conservation des produits de polissage.....	301
Méthode de M. Le Chatelier pour le polissage...	302
2°) <i>Attaque de la surface polie</i>	303
Polissage-attaque.....	304
3°) <i>Examen microscopique</i>	304
Microscope de M. H. Le Chatelier.....	304

Table analytique des matières

	Pages.
Platine perfectionnée.....	306
Appareil éclaireur.....	307
Autres microscopes.....	309
Eclaireur Guillemin-Nachet.....	340
Microscope Cornu-Charpy.....	340
<i>Photographie microscopique</i>	344
Utilité de la microphotographie.....	344
Dispositif du premier microscope de M. H. Le Chatelier.....	342
Nouveau dispositif.....	342
Éclairage.....	345
Lampe à mercure de M. H. Le Chatelier.....	346
Lampe Nernst.....	348
II. — Métallographie des fontes et aciers.....	348
<i>Constituants</i> actuellement admis pour les fontes et aciers.....	349
Ferrite.....	320
Cémentite.....	320
Perlite.....	321
Sorbite.....	323
Martensite.....	324
Austénite.....	324
Troostite.....	325
<i>De la nature de certains constituants</i>	325
<i>Méthode d'analyse métallographique</i>	328
Nouveaux réactifs (M. H. Le Chatelier).....	328
<i>Conclusions à tirer des résultats de l'analyse métallographique</i>	329
Premier cas.....	330
Deuxième cas.....	330
Troisième cas.....	330
Troostite.....	332
Généralisation.....	332
Cas des fontes.....	333
Exemples de microstructures de fontes et aciers.....	335

Guide du constructeur d'automobiles

	Pages.
Fonte grise de Denain.....	336
Fonte Thomas.....	337
Fontes sursaturées en carbone.....	337
Aciers à 2 0/0 de carbone.....	337
Acier de Firminy à 1,4 0/0 de carbone.....	337
Acier à 0,9 0/0 de carbone.....	340
Acier de Firminy à 0,3 0/0 de carbone.....	340
Acier ordinaire trempé (martensite).....	340
Acier extra-doux (« 70 ULH »).....	340
Scories dans l'acier.....	343
<i>Métallographie des autres métaux</i>	346
Alliage anti-friction.....	347

CHAPITRE IV

DESCRIPTION D'UN LABORATOIRE D'USINE

Le laboratoire des usines de Dion-Bouton.....	349
<i>Laboratoire de chimie</i>	350
Installation pour le dosage électrolytique.....	350
<i>Laboratoire d'essais mécaniques</i>	354
Essais métallographiques..	354
Essais d'un essieu avant.....	356
Généralités.....	356
Essais des barres.....	358
Essais du tube.....	359
Essais pratiqués dans la fabrication des cuvettes.	360
Essais de l'acier extra-doux à 2 0/0 de nickel...	362
Influence de la température sur le résultat de la cémentation.....	365
Conclusion.....	367
TABLE ANALYTIQUE DES MATIÈRES.....	368
INDEX ALPHABÉTIQUE.....	391

Index alphabétique

A

	Pages.		Pages.
Acier	134	Acier Martin.....	19
<i>Acier à employer :</i>		Acier Mushet.....	36
pour les alésoirs.....	93	Acier Novo.....	38
pour les burins.....	93	Acier N Y.....	161
pour les coussinets de		Acier N Y (propriétés mé-	
filères à fileter.....	92	caniques).....	162
pour les forets hélicoï-		Acier N Y (usages).....	162
daux.....	90	Acier (Point de transfor-	
pour les forets ordi-		mation de l').....	147
naires.....	91	Acier Poldi-Hütte.....	43
pour les outils de tour..	90	Acier Poldy.....	38
pour les tarauds.....	92	Acier pour tournage rapide.	43
pour les tranches.....	94	Acier puddlé.....	19-139
Acier au creuset.....	19	Acier Speedicut.....	38
Acier au creuset (Fusion		Aciers à outils (généralités	
de l').....	144	sur les).....	18
Acier Bessemer.....	19	Aciers à outils naturelle-	
Acier Böhrer-Rapid.....	43	ment durs.....	36-37
Acier Boreas.....	36	Aciers au chrome.....	159
Acier corroyé.....	19	Aciers au chrome (leur	
Acier (définition).....	134	teneur en chrome).....	34
Acier de Styrie.....	37	Aciers au chrome (usages)	33-160
Acier (emploi dans la con-		Aciers au manganèse (leur	
struction automobile)...	103	teneur en manganèse, ..	34
Acier (emploi de l').....	135	Aciers au manganèse (pro-	
Acier Express.....	38	priétés).....	35
Acier (<i>Fabrication de l'</i>)	135	Aciers au nickel.....	157
Acier (fabrication de l' —		Aciers au nickel (leur te-	
par cémentation).....	142	neur en nickel).....	34
Acier fondu.....	19	Aciers au nickel (propriétés	
		mécaniques).....	158
		Aciers au nickel (usages)..	159

Guide du constructeur d'automobiles

	Pages.		Pages.
Aciers au silicium.....	160	Alliages de cuivre et d'aluminium (méthode de M. Moissan pour l'analyse des).....	295
Aciers au silicium (propriétés mécaniques)....	160	Allongement total pour cent.....	191
Aciers au silicium (usages).....	160	Allongement total pour cent (mesure de l').....	208
Aciers au tungstène....	160-161	Allotropiques (états - du fer pur).....	107
Aciers au tungstène (leur teneur en tungstène)....	33	Aluminium (électrolyse de l').....	176
Aciers au tungstène (usages).....	161	Aluminium (abaissement du prix du kilogramme).....	173
Aciers chrome-nickel.....	161	Aluminium (action des acides sur l')....	174
Aciers chrome-nickel (usages).....	161	Aluminium (alliages d').....	181
Aciers convenant pour la fabrication des principaux outils usuels.....	89	Aluminium (alliages de densité moyen d').....	184
Aciers ordinaires.....	19	Aluminium (alliages légers d').....	181
Aciers ordinaires (classification).....	26	Aluminium (alliages lourds d').....	184
Aciers pour aimants.....	37-39	Aluminium (analyse de l').....	288
Aciers pour fraises.....	42	Aluminium (analyse des alliages d').....	295
Aciers quaternaires.....	156	Aluminium (bronzes d')... ..	184
Aciers spéciaux.....	19-156	Aluminium (dosage de l' — dans les fontes et aciers)....	275
Aciers spéciaux à outils (définition).....	32	Aluminium (emploi dans la construction automobile).....	104
Aciers spéciaux (emploi dans la construction automobile).....	104	Aluminium exempt de cuivre (analyse de l' — par la méthode de M. Moissan).....	29
Aciers spéciaux (fabrication des).....	156	Aluminium historique):.....	173
Aciers spéciaux pour outils de tour.....	37-38	Aluminium (laiton d')... ..	189
Aciers ternaires.....	156	Aluminium (minerais d').....	175
Affinage de la fonte.....	135	Aluminium (notions de métallurgie de l').....	175
Affinage de la fonte (procédé comtois).....	136		
Agglomérants pour meules.....	99		
Agglomérants pour meules (qualités des bons)....	99		
Aimants (aciers pour)....	37-39		
Alliages anti-friction.....	171		
Alliages anti-friction (métallographie des).....	34		
Alliages Cothias.....	189		
Alliages d'aluminium (analyse des).....	295		

	Pages.
Aluminium (polissage de l').....	175
Aluminium (propriétés chimiques de l').....	174
Aluminium (propriétés mécaniques de l').....	175
Aluminium (propriétés physiques de l').....	174
Aluminium (sa faible résistance à la torsion).....	175
Aluminium (ses applications à la construction automobile).....	173
Aluminium (soudures).....	183
Analyse chimique des métaux et alliages..	236
<i>Analyse de l'aluminium.</i>	288
<i>Analyse d'un bronze ordinaire.....</i>	276
<i>Analyse d'un bronze phosphoreux.....</i>	281
<i>Analyse d'un laiton....</i>	285
Analyse électrolytique des bronzes et laitons.....	288
Analyse métallographique (méthode d').....	327
<i>Anti-friction</i> (emploi dans la construction automobile).....	107
Anti-friction (métallographie des alliages)....	347
Appareil Guillery pour l'essai Brinell.....	229
Appareils Cowper.....	117
Appareils de chauffage (pour chauffage des outils)	50
Appareils enregistreurs pour les essais à la traction.....	208
Appareils Whitwell.....	117
Appareils pour les essais au choc.....	215
Ast (mouton).....	218
Austénite.....	320-324

Index alphabétique

B

	Pages.
Bains métalliques (chauffage des outils dans des).....	54
Barba et Leblanc (mouton)	218
Barreau de choc.....	214
Barreaux entaillés.....	215
Barrettes entaillées (méthode des)....	217
Bauxite.....	176
Bayer (procédé).....	178
Bessemer (acier).....	49
Bessemer (cornue).....	139
Bessemer (procédé).....	139
Böhler-Rapid (acier).....	43
Boreas (acier).....	36
Brinell (appareil Guillery pour l'essai).....	229
Brinell (chiffre de).....	227
Brinell (méthode de — pour les essais de dureté)	228
<i>Bronze ordinaire (analys. d'un).....</i>	299
Bronze phosphoreux.....	171
<i>Bronze phosphoreux (analyse d'un).....</i>	281
Bronzes.....	170
Bronzes d'aluminium.....	189
<i>Bronzes</i> (emploi dans la construction automobile)	104
Bronzes et laitons (analyse électrolytique).....	288

C

Cannes pour pyromètres thermo-électriques.....	60
Caoutchouc vulcanisé (agglomérant pour meules).....	99
Caractéristiques nécessaires et suffisantes pour les métaux usuels.....	190

Guide du constructeur d'automobiles

Pages.	Pages.
Carbone combiné (dosage dans les fontes et aciers); 250	Charpentier - Page (expérience de M. — sur la conductabilité du cuivre-aluminium)..... 182
Carbone de trempe (dosage dans les fontes et aciers). 250	Charpy (mouton)..... 218
Carbone dissous (dosage dans les fontes et aciers). 250	<i>Chauffage de l'acier à outils (pratique du)...</i> 47
<i>Carbone (dosage dans les fontes et aciers).....</i> 238	Chauffage des outils dans des bains métalliques.. 54
Carbone du carbure (dosage)..... 230	Chauffage des outils dans des sels fondus..... 56
Carbone graphitique (dosage dans les fontes et aciers)..... 249	Chauffage du vent dans les hauts fourneaux.... 117
Carbone total (dosage dans les fontes et aciers par voie humide)..... 245	Chemins de fer (machine des — pour essais de traction)..... 199
Carbone total (dosage dans les fontes et aciers par voie sèche)..... 240	Chiffre de dureté de Brinell 228
Carborundum 97	Choc (essais au)..... 212
Carbure de fer..... 319	<i>Chrome (dosage du — dans les fontes et aciers)</i> 271
Carnot (méthode de M. Ad. — pour le dosage du phosphore dans les fontes et aciers)..... 261	Chrome (son influence sur les propriétés de l'acier). 33
Carnot (méthode de M. Ad. — pour le dosage du phosphore dans les fontes et aciers)..... 272	Cisaillage (essais de).. ... 234
Cément..... 142	Classification des aciers ordinaires..... 26
Cémentation (acier)..... 142	Classification des aciers ordinaires (M. Campredon) 28
Cémentation (étude scientifique de la)..... 360	Classification des aciers spéciaux à outils..... 36
Cémentation (influence de la température sur le résultat de la)..... 365	Cokes de fonderie..... 49
Cémentite..... 319-320	Cokes durs..... 49
Chabotte..... 215	Combustibles pour chauffage des outils..... 48
Chalkopyrite..... 165	Compression (essais de)... 234
Chalkosine..... 165	Constantan..... 61
Charbon de forge..... 49	Constituants (de la nature de certains)..... 325
Charge de rupture (définition)..... 191	Convertisseur Bessemer.. 139
Charge de rupture (mesure de la —)..... 207	Corindon..... 96
	Cornu - Charpy (microscopie)..... 310
	<i>Corps durs servant à la fabrication des meules</i> 96
	Corps gras pour la trempe 85
	Corroyé (acier)..... 19

		Index alphabétique	
	Pages.		Pages.
Cothias (alliages).....	184	Description d'un labora-	
Coulée de la fonte.....	122	toire d'usine.....	349
Couleurs de l'acier aux dif-		Dosage calorimétrique du	
férentes températures..	58	carbone dans les fontes	
Couleurs de recuit.....	88	et aciers.....	250
Couple thermo-électrique.	59	Dosage calorimétrique du	
Couple thermo-électrique		soufre dans les fontes et	
(graduation).....	68	aciers.....	259
Courbe de refroidissement		Dosage de l'aluminium	
du fer.....	108	dans les fontes et aciers	275
Creuset (acier au).....	49	Dosage du carbone com-	
Creuset (haut fourneau)...	114	biné dans les fontes et	
Creusets pour l'acier au		aciers.....	250
creuset.....	145	Dosage du carbone dans	
Cryolithe.....	176	les fontes et aciers... 238	
Cuivre (alliages du).....	169	Dosage du carbone de trem-	
Cuivre-aluminium.....	181	pe dans les fontes et	
Cuivre (carbonate de).....	163	aciers.....	270
Cuivre (fabrication du —		Dosage du carbone dissous	
au convertisseur).....	167	dans les fontes et aciers. 250	
Cuivre (le).....	114	Dosage du carbone du car-	
Cuivre (métallurgie par		bure.....	250
voie humide).....	168	Dosage du carbone graphi-	
Cuivre natif.....	165	tique dans les fontes et	
Cuivre (notions de métal-		aciers.....	249
lurgie du).....	165	Dosage du carbone total	
Cuivre (oxyde rouge de) .	165	dans les fontes et aciers. 240	
Cuivre (propriétés chimi-		Dosage du chrome dans	
ques).....	165	les fontes et aciers.... 271	
Cuivre (propriétés physi-		Dosage du graphite dans	
ques).....	164	les fontes et aciers.... 249	
Cuivre rouge (emploi dans		Dosage du manganèse	
la construction automo-		dans les fontes et aciers. 267	
bile).....	104	Dosage du nickel dans les	
Cuivre (son influence sur		fontes et aciers..... 269	
les propriétés de l'acier).	25	Dosage du phosphore dan	
Cuvettes (essais pratiqués		les fontes et aciers.... 259	
dans la fabrication des).	360	Dosage du silicium dans	
		les fontes et aciers.... 266	
		Dosage du soufre dans les	
		fontes et aciers..... 252	
		Dosage du tungstène dans	
		les fontes et aciers.... 274	
		Dosages électriques (Instal-	
		lation pour les)..... 350	

D

Dame (haut fourneau)....	114
Déformations permanentes	
(essais mécaniques).....	192

Guide du constructeur d'automobiles

	Pages.		Pages.
Dureté (chiffre de — de Brinell).....	228	<i>Essais à la flexion</i>	233
Dosages électrolytiques (installation pour les)...	350	<i>Essais à la traction</i>	190
Dureté (essais de).....	227	<i>Essais au choc</i>	242
E		Essais au choc (appareils pour les).....	215
Eau de savon pour la trempe	83	Essais au choc (épreuves pour les).....	214
Echelle de Tunner	26	Essais au choc (méthodes pour les).....	216
Eclaireur Guillemain-Nachet	310	Essais au choc par coups successifs.....	216
Effet des impuretés dans les aciers à outils.....	20	Essais de cisailage.....	234
Eggertz (procédé — pour le dosage du carbone)..	250	<i>Essais de compression</i> ...	234
Elasticité (période d' —)...	209	<i>Essais de dureté</i>	227
Elastique (limite —).....	191	Essais de pliage.....	233
Electrolyse de l'alumine..	476	Essais de poinçonnage....	234
Electrolytique (analyse — des bronzes et laïtons)..	288	<i>Essais de traction (machines pour les —)</i>	193
Electrolytiques (installation pour les dosages)..	350	Essais mécaniques	187
Emeri.....	96	Essais mécaniques (conditions qu'ils doivent remplir d'après M. Guillery)..	189
Emeri artificiel.....	97	Essais mécaniques (diverses sortes d' —).....	188
Emeri de l'Ouest.....	97	Essais mécaniques (généralités).....	188
Emeri de Naxos.....	96	Essais mécaniques (leur nécessité et leur importance).....	187
Emeri de Smyrne.....	96	Etain fondu pour la trempe	85
Emeri français.....	97	Etalages (haut fourneau)..	114
Enduits pour couples thermo-électriques.....	60	Etalonnage des galvanomètres pyrométriques..	66
Enregistreurs (appareils — pour les essais à la traction).....	208	Etalonnage d'un couple thermo-électrique (courbe d' —).....	71
Eprouvettes d'essai (mode d'attache des — sur la machine pour essais de traction).....	193	Etats allotropiques du fer pur.....	107
Eprouvettes pour essais à la traction des tôles....	192	Express (acier).....	38
Eprouvettes pour essais au choc.....	214	F	
Eprouvettes pour les essais de traction.....	192	Feldspath (pâtes à base de — comme agglomérant pour meules).....	100
Essai Brinell (appareil Guillery pour l').....	229		

		Index alphabétique	
	Pages.		Pages.
Fer α	107	entre la — et la dureté	
Fer β	107	d'un acier).....	42
Fer γ	107	<i>Forgeage de l'acier à</i>	
<i>Fer (notions sommaires</i>		<i>outils</i>	89
<i>de métallurgie du)</i>	110	<i>Forgeage des outils</i>	46
Fer oligiste.....	112	<i>Forgeage :</i>	
Fer pur (états allotropi-		Des alésoirs.....	93
ques du).....	107	Des burins.....	93
Fer pur (propriétés du)...	106	Des forets hélicoïdaux..	90
Ferrite.....	319-320	Des forets ordinaires...	91
Ferro-chromes.....	128	Des outils de tour.....	90
Ferro-manganèses.....	128	Des tranches.....	94
Ferro-siliciums.....	128	Forges ouvertes (leurs in-	
Ferro-silicium-aluminium.	184	convénients pour le	
Ferro-silicium-manganèses	128	chauffage des outils)....	52
Ferro-tungstènes.....	128	Four à puddler.....	137
Fer spathique.....	112	Four Bouvard.....	139
Flexion (essais à la).....	233	Four Danks.....	139
Fondu (acier).....	19	Four Pernot.....	139
Fonte (coulée de la).....	122	Fours à coke.....	122
Fonte (la).....	106	Fours à creusets.....	146
Fontes blanches.....	127	Fours à cuve.....	52
<i>Fontes (classification des)</i>	126	Fours à tremper pour	
Fontes d'affinage.....	131	chauffage au coke.....	53
Fontes de moulage.....	129	Foyer catalan.....	110
Fontes de moulage (man-		Fragilité.....	212
ganèse dans les).....	129	Fraises (aciers pour).....	42
Fontes de moulage (phos-		Frémont (méthode de M.	
phore dans les).....	129	— pour la mesure ri-	
Fontes de moulage (sili-		goureuse de la limite	
cium dans les).....	126	élastique).....	209
Fontés de moulage (soufre		Frémont (mouton).....	218
dans les).....	130		
<i>Fontes (emploi dans la</i>			
<i>construction automobile)</i>	103		
<i>Fontes (emplois des)</i>	128		
Fontes grises.....	127		
Fontes (métallographie des)	333		
Fontes ordinaires.....	127		
Fontes pour acier.....	131		
Fontes rubanées.....	128		
<i>Fontes spéciales</i>	128		
Fontes traitées.....	127		
Force coercitive (relation			

Guide du constructeur d'automobiles

	Pages.		Pages.
que à lecture directe de		Haut fourneau (épaisseur	
M. H. Le Chatelier.....	62	des parois).....	117
Galvanomètre pyrométri-		Haut fourneau (marche as-	
que enregistreur de M. H.		cendante des gaz).....	125
Le Chatelier.....	65	Haut fourneau (marche	
Galvanomètre pyrométri-		descendante des solides).	126
que enregistreur de M. H.		Haut fourneau (marche du)	118
Le Chatelier (lecture)...	67	Hauts fourneaux (diamètre	
Galvanomètre pyrométrique		au gueulard).....	114
enregistreur de M. H. Le		Hauts fourneaux (diamètre	
Chatelier (réglage).....	67	au ventre).....	115
Galy-Cazalat (manomètre		Hauts fourneaux (dimen-	
multiplicateur).....	203	sions des).....	114
Gomme-laque (agglomérant		Hauts fourneaux (hauteur	
pour meules).....	101	des).....	114
Graduation des galvanomè-		Hauts fourneaux (machine	
tres pyrométriques.....	63	soufflante).....	117
Graduation d'un couple		Hauts fourneaux (prises	
thermo-électrique.....	68	de gaz).....	117
Graphite.....	320	Hématite brune.....	112
Graphite dans les fontes		Hématite rouge.....	112
de moulage.....	129	Hérault (appareils — pour	
Graphite (dosage du — dans		la métallurgie de l'alu-	
les fontes et aciers)...	249	minium).....	178
Gueulard (fermeture du)...	117	Hérault (marche de l'opé-	
Gueulard (haut fourneau).	114	ration dans le procédé —)	179
Guillemin-Nachet (éclair-		Hérault (procédé — pour	
reur).....	310	la métallurgie de l'alu-	
Guillery (appareil — pour		minium).....	177
l'essai Brinell).....	229	Houille grasse maréchale.	49
Guillery (méthode de M. —		Hunt (expériences de M. —	
pour la détermination		sur les nickels-alumi-	
de la limite élastique)...	210	niums).....	183
Guillery (mouton rotatif).	220		
		I	
H		Impact (vitesse d').....	217
Hardénite.....	319	Impuretés dans les aciers	
Haut fourneau.....	113	(tolérance dans la teneur	
Haut fourneau (allumage		en).....	20
du).....	120	Impuretés (influence des	
Haut fourneau (composi-		— sur les propriétés des	
tion des charges).....	124	aciers).....	20

Index alphabétique

Pages.		Pages.
Influence de la température sur le résultat de la cémentation.....	365	Laiton d'Augsbourg..... 170
Influence des impuretés sur les propriétés des aciers.....	20	Laiton de Romilly..... 169
Influence du chrome sur les propriétés de l'acier.....	33	Laiton (emploi dans la construction automobile)..... 104
Influence du cuivre sur les propriétés de l'acier.....	23	Laitons..... 169
Influence du manganèse sur les propriétés de l'acier.....	34	Laitons d'aluminium..... 184
Influence du nickel sur les propriétés de l'acier.....	34	Lampe à mercure Le Chatelier..... 316
Influence du phosphore sur les propriétés de l'acier.....	22	Lampe Nernst..... 318
Influence du silicium sur les propriétés de l'acier.....	23	Le Chatelier (lampe à mercure)..... 316
Influence du soufre sur les propriétés de l'acier.....	21	Le Chatelier (microscope — pour l'examen des métaux)..... 304
Influence du tungstène sur les propriétés de l'acier.....	32	Lecture de l'enregistrement du galvanomètre pyrométrique enregistreur..... 66
Inverseur.....	234	Limite élastique (définition)..... 191
K		Limite élastique (détermination par la méthode de M. Guillery)..... 210
Kaolin (agglomérant pour meules).....	100	Limite élastique (mesure de la —)..... 207
Kirkaldy (machine — pour essais de traction).....	196	Limite élastique (mesure de la — par l'appareil Guillery pour essai Brinell)..... 233
L		Limite élastique (sa mesure rigoureuse par la méthode de M. Frémont)..... 209
Laboratoire d'usine (description d'un).....	349	Limonite..... 112
Lait de chaux pour la trempe.....	85	Liquides de refroidissement pour la trempe..... 84
Laitier.....	122	Loi de Stefan..... 75
Laiton (analyse d'un).....	285	Lunette pyrométrique Le Chatelier..... 81
Laiton anglais.....	169	Lunette pyrométrique Féry..... 75
		M
		Machine à levier simple à plateau pour essais de traction..... 195

Guide du constructeur d'automobiles

Pages.	Pages.
Machine des chemins de fer pour essais de traction..... 499	limite élastique (méthode de M. Frémont)..... 209
Machine du colonel Maillard pour essais de traction..... 203	Métallographie des alliages anti-friction..... 347
Machines à leviers pour essais de traction..... 495	Métallographie des fontes. 333
Machines à manomètre pour essais de traction.. 199	Métallographie des fontes et aciers..... 318
Machines à mercure pour essais de traction..... 199	Métallographie microscopique (la) 297
Machines romaines à leviers multiples pour essais de traction 497	Métallographie microscopique (attaque de la surface polie)..... 303
Machines romaines simples pour essais de traction.. 496	Métallographie microscopique (examen au microscope) 304
Machine Thomasset pour essais de traction..... 200	Métallographie microscopique (préparation de la surface polie)..... 278
Magnétite 111	Métallographie microscopique (technique de la) .. 297
Magnétos (aciers pour).... 42	Métallographique (méthode d'analyse)..... 327
Maillard (machine du colonel — pour essais de traction) 203	Métallurgie de l'aluminium (notions de —) .. 175
Manganèse (dosage du — dans les fontes et aciers) 267	Métallurgie du cuivre (notions de)..... 165
Manganèse (son influence sur les propriétés de l'acier)..... 34	Métallurgie du cuivre (principe de la)..... 166
Manomètre Galy-Cazalat.. 203	Métallurgie du fer (notions sommaires de).... 110
Martensite..... 319-324	Métallurgie du fer (principe de la)..... 112
Martin (acier)..... 19	Métal Magnolia 171
Martin (procédé)..... 142	Métaux employés dans la construction des automobiles..... 103
Mercure pour la trempe... 85	Méthode Brinell (essais de dureté)..... 228
Mesure de la charge de rupture..... 207	Méthode d'analyse métallographique 327
Mesure de la limite élastique..... 207	Méthode de M. Ad. Carnot pour le dosage du phosphore dans les fontes et aciers..... 261
Mesure de l'allongement total pour cent..... 208	Méthode de M. Ad. Carnot
Mesure de la striction... 208	
Mesure des températures élevées au moyen de pyromètres 58	
Mesure rigoureuse de la	

	Pages.		Pages.
pour le dosage volumé-		Mouton Charpy.....	218
trique du chrome dans		Mouton Frémont.....	218
les fontes et aciers.....	272	Mouton rotatif Guillery ..	220
Méthode de M. Moissan		Mouton Russell.....	218
pour l'analyse de l'alumi-		Moutons	215
nium exempt de cuivre.	290	Mushet (acier).....	36
Méthode de M. Moissan			
pour l'analyse des allia-		N	
ges d'aluminium et de		Nachet (microscope — pour	
cuivre	295	l'examen des métaux... ..	309
Méthode de Rothe pour la		Naturellement durs (aciers	
séparation du fer des au-		à outils)	36-37
tres métaux par l'éther..	269	Nernst (Lampe)	318
Méthode des barrettes en-		Nickel-Aluminium	182
taillées.....	217	<i>Nickel (dosage du) dans</i>	
Méthodes pour les essais		<i>les fontes et aciers....</i>	269
au choc.....	216	Nickel (son influence sur	
<i>Meules</i>	95	les propriétés de l'acier)..	34
Meules (composition des).	95	Novo (Acier)	38
Meules tanite.....	101		
Meules vulcanite	99	O	
Microscope Cornu-Charpy.	310	Oligiste	112
Microscope Le Chatelier		Or (soudure à l').....	59
pour l'examen des mé-		Ordinaires (aciers).....	19
taux	304	Origine et influence des	
Microscope Nachet pour		divers corps étrangers	
l'examen des métaux...	309	pouvant se trouver dans	
<i>Microscopique (la métal-</i>		un acier.....	21
<i>lographie)</i>	297	Outils de tour (acier à em-	
<i>Microstructures de fontes</i>		ployer)	90
<i>et aciers (exemples)...</i>	335	Ouvrage (haut fourneau).	114
Minerais de fer.....	111	Oxychlorure de magnésie	
Minerais oolithiques de fer	112	(agglomérant pour	
Moufles à gaz.....	53	meules).....	101
Moufles pour le chauffage			
des outils	53	P	
Moissan (méthode — pour		Palladium (soudure au)...	59
l'analyse de l'aluminium		Partinium.. ...	181-183
exempt de cuivre).....	290	Péchiney (Procédé).	177
Moissan (méthode de M —			
pour l'analyse des allia-			
ges d'aluminium et de			
cuivre).....	295		
Mouton Ast	218		
Mouton Barba et Leblanc.	218		

Pages. 1

402

Index alphabétique

S

	Pages.
Solution de carbonate de soude pour la trempe.	85
Solution de sel ammoniac pour la trempe.....	85
Solution de sel marin pour la trempe.....	85
Sorbite.....	320-323
Soudure à l'or.....	39
Soudure au palladium....	39
Soudure des fils dans les couples thermo-électriques.....	59
Soudures pour l'aluminium	184
<i>Soufre (dosage dans les fontes et aciers)</i>	252
Soufre (son influence sur les propriétés de l'acier).	21
Spiegel.....	128
Spiegel-eisen.....	128
Spéciaux (aciers).....	19
Speedicut (acier).....	38
Stéfan (loi de).....	75
Striction (définition).....	191
Striction (mesure de la).....	208
Stvrie (acier de).....	37

T

Tanin (agglomérant pour meules).....	101
Tanite (meules).....	101
Technique de la métallographie microscopique..	277
Télescope pyrométrique Féry.....	78
Ténacité.....	212
Teneur en chrome des aciers au chrome.....	34
Teneur en manganèse des aciers au manganèse.....	34
Teneur en tungstène des aciers au tungstène.....	33
Ternaires (aciers).....	156

Guide du constructeur d'automobiles

	Pages.		Pages.
Thomas (procédé).....	140	<i>Trempe des outils</i>	46
Thomasset (machine pour essais de traction).....	200	Trempe (liquides de re- froidissement).....	84
Tolérance en impuretés dans un acier à outils..	20	<i>Trempe proprement dite</i> ..	83
Tôles en aluminium à 6 % de cuivre (résistance des)	182	Trempe (son effet sur l'acier).....	46
Tournage rapide (acier pour)	43	Troostite.....	320-325-332
<i>Traitement des princi- paux outils usuels</i>	89	<i>Tungstène (dosage du) dans les fontes et aciers</i> ..	274
Trempe à l'huile.....	85	Tungstène (son influence sur les propriétés de l'acier).....	32
Trempe au mercure... ..	85	Tunner (échelle de).....	26
Trempe au suif.....	85		
Trempe dans un courant d'air.....	86		
Trempe (définition).. . .	46		
<i>Trempe :</i>			
des alésoirs.....	93		
des burins.....	93		
des coussinets de filières à fileter.....	93		
des forets hélicoïdaux..	90		
des forets ordinaires... .	91		
des outils de tour.....	90		
des tarauds.....	92		
des tranches.....	94		

V

Vitesse d'impact.....	217
Vulcanite (meules).....	99

Z

Zinc pour la trempe.....	85
--------------------------	----