

RTP 1123p

Hommage de l'Université

HENRY LE CHATELIER

H. de Chatelier

LA MÉTALLOGRAPHIE

MICROSCOPIQUE



CONFÉRENCE

*faite à l'occasion du Cinquantenaire
de l'Association amicale des Anciens Élèves
de l'École des Mines*

LE 14 JUIN 1914

Extrait de la *Revue de Métallurgie.*
(Janvier 1915)

PARIS

H. DUNOD & E. PINAT, ÉDITEURS

49, QUAI DES GRANDS-AUGUSTINS, 49

1915

Bibliothèque Maison de l'Orient



129979



LA MÉTALLOGRAPHIE

MICROSCOPIQUE⁽¹⁾

Introduction.

Cédant aux aimables sollicitations du Comité de notre association, je me suis un peu témérairement chargé de vous retracer l'éclosion d'une jeune science : la *métallographie microscopique*, de vous rappeler comment elle a donné le jour à un chapitre entièrement neuf de la chimie, celui des *alliages métalliques*; comment enfin elle a ouvert de nouveaux horizons à l'*industrie métallurgique*. Je crains de ne pas savoir suffisamment vous intéresser à l'élégance des méthodes d'observations mises en œuvre, à l'harmonie des résultats obtenus, à l'importance des services rendus à la science et à la technique.

C'est au microscope que la métallographie doit tous ses succès; grâce à l'emploi de cet outil de travail si délicat, elle a su démêler la structure interne des métaux et pour ce service elle s'est vu ouvrir toutes grandes les portes des usines. Les laboratoires métallographiques se sont multipliés à l'infini dans l'industrie métallurgique. On en trouve aujourd'hui à côté de tous les laboratoires d'analyse chimique, non seulement en Europe, mais aux États-Unis, au Japon, bientôt même en Chine.

Cette influence surprenante d'un petit appareil, judicieusement employé il est vrai, n'est pas un fait exceptionnel, bien loin de là. Toute découverte d'une nouvelle méthode de mesure, ou simplement d'un procédé d'observation suffisamment précis, donne généralement naissance à une science nouvelle et, bien

(1) Conférence, faite à l'occasion du cinquantenaire de l'Association des anciens élèves de l'École des Mines de Paris (14 juin 1914), est publiée ici avec l'autorisation du comité de cette Association.

souvent, une science nouvelle est le point de départ d'une industrie nouvelle. La balance entre les mains de Lavoisier créa la chimie et cette science est devenue la mère d'industries florissantes : métallurgie, produits chimiques, gaz d'éclairage, matières colorantes etc.

La découverte par Oerstedt de la déviation de l'aiguille aimantée sous l'action du courant de la pile a eu des résultats plus surprenants encore : elle a donné naissance à une science tout à fait imprévue, celle de l'électricité, et cette science s'est immédiatement transformée en une industrie aux ramifications innombrables.

Historique.

L'historique de la découverte de la métallographie microscopique et celui de son développement ultérieur présentent quelques particularités curieuses à rappeler. L'auteur de cette découverte est le Dr Sorby de Sheffield, mort en 1908 à l'âge de 82 ans. C'était le type classique du savant anglais : indépendant par sa situation de fortune, il ne se crut jamais condamné par sa richesse à l'oisiveté ; il travailla sans relâche jusqu'à son dernier jour. Entraîné à tous les sports, il passait plusieurs mois chaque été, comme son compatriote lord Kelvin, à bord de son yacht, classant et mettant en ordre ses travaux de l'hiver précédent, préparant ceux de l'hiver suivant, étudiant entre temps la faune marine. Familiarisé dès sa jeunesse avec l'ensemble des sciences mathématiques et expérimentales, avec la philosophie naturelle, comme disent les Anglais, il orienta successivement ses études dans les directions les plus variées, portant un égal intérêt aux applications industrielles et aux recherches de la science pure.

Les questions agricoles l'attirèrent tout d'abord, en raison des services qu'il croyait en se consacrant à leur étude pouvoir rendre à ses concitoyens. Mais s'abandonnant bientôt aux caprices d'une imagination toujours en éveil, comme il se laissait sur mer bercer au gré des flots, il passa de l'agriculture à la géologie et consacra de longues années à l'étude des roches. En 1859, il créait incidemment la science de la *pétrographie*, dont l'enseignement, donné aujourd'hui dans toutes les Universités, constitue un des objets les plus importants des études géologiques. La coupe transversale d'une dent, vue chez un médecin de ses amis, lui avait donné l'idée d'examiner les roches taillées en lames minces pour les rendre transparentes. Mais abandonnant bientôt la pétrographie, il passe des roches aux matériaux de construction, puis aborde l'étude des bâtiments agricoles et des édifices religieux, remonte peu à peu jusqu'aux constructions de l'antiquité la plus reculée ; conduit ainsi à l'étude des unités de mesure chez les peuples anciens, il jette en passant quelques regards sur leur mythologie et pour mieux se documenter, il apprend à déchiffrer les caractères hiéroglyphiques des Egyptiens.

Il n'avait pas cependant abandonné définitivement la géologie, ni l'étude des roches. Rencontrant dans les météorites du fer natif, absolument opaque

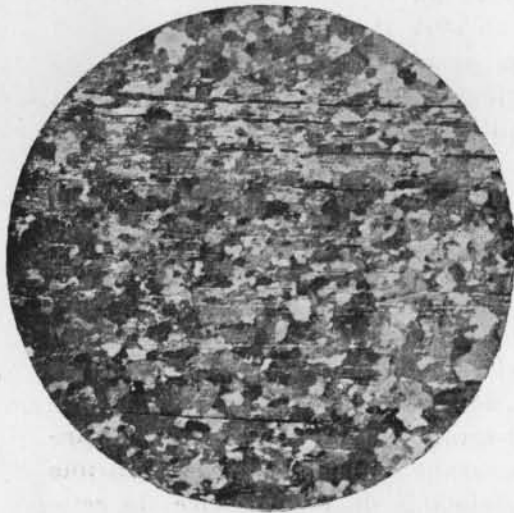


Fig. 1.
Acier extra-doux (Sorby).

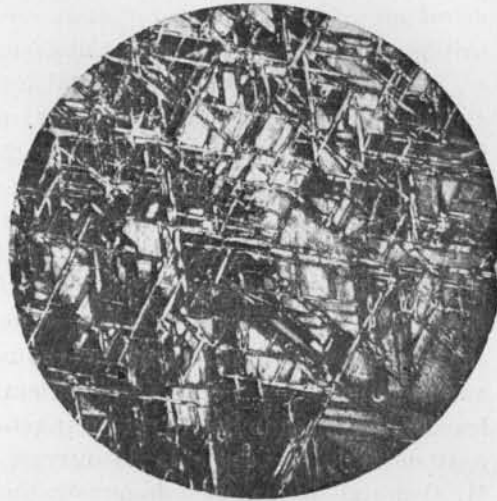


Fig. 2.
Météorite (Sorby).

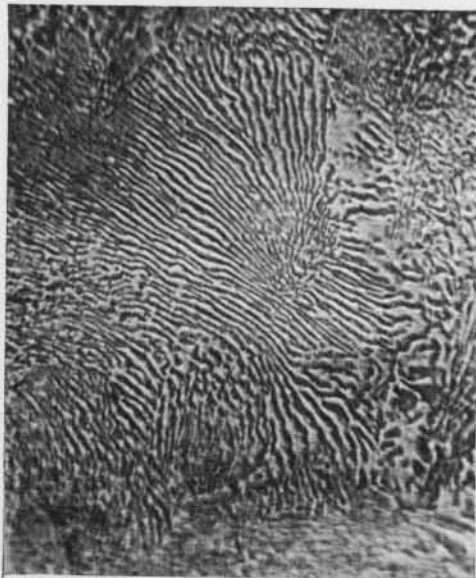


Fig. 3.
Acier eutectoïde (Osmond).

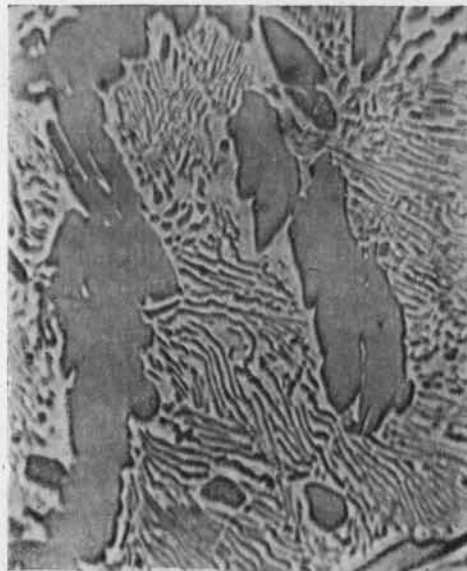


Fig. 4.
Acier hyper-eutectoïde (Osmond),

comme tous les métaux, il eut l'idée ingénieuse, ne pouvant l'étudier par transparence à la façon des roches, d'examiner par réflexion sa surface polie et légèrement attaquée par un acide, pour en mieux différencier les constituants. La *métallographie microscopique* était créée. En 1864, il signalait à l'Association britannique pour l'avancement des sciences, sa nouvelle découverte.

Sur le moment, l'intérêt capital des recherches de Sorby ne fut pas compris; c'est le sort fréquent des novateurs, quand ils devancent trop hardiment les idées de leurs contemporains. On a cependant le droit d'être surpris de voir que, dans un centre industriel comme celui de Sheffield, où la métallurgie du fer avait depuis longtemps été portée à un si haut degré de perfection, il ne se soit trouvé personne pour reconnaître l'intérêt scientifique et l'importance pratique de la métallographie: pendant vingt-cinq ans elle resta ignorée de tous. En 1887, Sorby fit devant l'*Iron and Steel Institute* une nouvelle communication sur ce sujet, étendant aux métaux industriels ses anciennes recherches relatives aux météorites (fig. 1 et 2) alors seulement, deux savants métallurgistes: le professeur Martens, de Berlin, et un ingénieur français, M. Floris Osmond, comprirent enfin la portée de la découverte du savant anglais. Notre compatriote M. Osmond donna une démonstration irréfutable de l'importance de cette méthode d'investigation en l'utilisant dans son travail classique sur la constitution des aciers, qui eut au moment de sa publication un si grand retentissement (fig. 3 et 4). Continuant ensuite à explorer avec persévérance la même voie, il aborda successivement l'étude des alliages d'or, de cuivre, d'argent, travaillant tantôt seul, tantôt en collaboration avec Sir Roberts Austen, avec J. Stead, avec M. Frémont et surtout avec son dévoué préparateur M. Cartaud, qu'une mort prématurée devait enlever trop tôt à la science. Bientôt après, un autre savant français M. G. Charpy, s'engageant dans la même direction, publiait sur les laitons, sur les métaux anti-friction, des études qui sont également restées classiques. La métallographie avait définitivement pris sa place au soleil.

Sorby, accomplit le premier une œuvre de génie: mais comme Pygmalion, il n'avait pas su donner la vie à sa statue. C'est à notre compatriote Osmond qu'appartient incontestablement le mérite, d'avoir animé la belle momie que le savant de Sheffield avait, au retour de ses voyages d'Égypte, emmailloté dans les pages de vieux livres que personne ne songeait à développer. Après Osmond, la métallographie devint rapidement familière, sinon dans sa pratique, au moins dans ses résultats, à tous les métallurgistes et à un grand nombre de savants.

Vulgarisation.

Il y avait cependant encore une étape importante à franchir avant de faire du microscope un appareil maniable, facile à employer dans les usines. Vous me permettez de rappeler le rôle modeste que j'ai joué dans cette mise au point définitive.

F. Osmond n'avait pas formé d'élèves, il paraissait même craindre de vul-

gariser ses méthodes de recherches. Travaillant à la Sorbonne, au laboratoire de Troost, puis à celui de Moissan, au milieu d'une jeunesse studieuse, avide de s'instruire, il répondait à ses compagnons de laboratoire qui lui demandaient des leçons de métallographie : « En essayant d'apprendre un art aussi difficile vous perdriez votre temps sans résultat. Donnez-moi vos échantillons, je les examinerai pour vous ». Il faisait d'ailleurs tout le travail du polissage chez lui, loin des regards des profanes. C'était alors une opération très délicate, demandant des soins et une habileté extrême. Il suffit d'un grain d'émeri égaré, mêlé aux matières de polissage pour rayer toute une préparation, pour faire perdre le fruit d'un travail long et fastidieux. F. Osmond avait installé son atelier de travail de la façon suivante : il faisait le dégrossissage dans sa chambre à coucher, le doucissage dans la salle à manger et le finissage dans son salon. Des cuvettes et des serviettes installées à chaque porte rappelaient au passage les précautions indispensables.

Il procédait ensuite avec la même minutie à l'attaque chimique nécessaire pour faire paraître sur la surface polie la structure intime du métal, changeant la nature des réactifs, leur concentration et combinant parfois un nouveau polissage à l'attaque. Ses réactifs étaient extrêmement variés ; l'emploi du jus de réglisse déconcertait les chimistes.

Il procédait finalement à la photographie et ce n'était pas là l'opération la moins longue, ni la moins délicate ; il fallait des tâtonnements répétés pour trouver l'orientation convenable de la source de lumière et donner à la préparation toute sa valeur. F. Osmond était devenu un véritable artiste dans la disposition et l'éclairage de ses modèles. Pendant longtemps personne ne réussit à égaler la perfection de ses clichés photographiques.

Le polissage d'un échantillon d'acier demandait 1 heure : avec l'attaque et la photographie, la dépense totale de temps atteignait souvent 3 heures. Aujourd'hui le polissage peut se faire en 3 minutes, l'attaque et la photographie en 2 minutes ; le développement et le fixage du cliché en 5 minutes, soit au total 10 minutes au lieu de 3 heures. Quels perfectionnements ont permis d'atteindre ces résultats imprévus ?

Frappé des services que la métallographie semblait appelée à rendre dans les usines, je songeai à introduire son enseignement au laboratoire de métallurgie générale dont j'avais alors la direction. Notre École des Mines de Paris a été ainsi le premier établissement où l'enseignement de cette nouvelle technique ait été donné régulièrement.

Il me fallut d'abord faire mon apprentissage personnel ; j'obtins des leçons d'Osmond auquel j'avais antérieurement d'ailleurs donné l'hospitalité dans mon laboratoire lors de ses premières recherches sur l'analyse thermique. Il ne me dissimula pas les chances d'insuccès de ma tentative ; des élèves pris en groupe n'auraient jamais le soin ni la patience nécessaire pour mener à bien des opérations aussi délicates. Je ne me décourageai pas, pensant qu'une technique encore toute jeune pourrait certainement avec l'âge prendre de la force et de l'agilité. Par l'analyse méthodique de tous les facteurs de chaque opération, on

devait arriver à définir certaines conditions précises, dont la réalisation rigoureusement imposée aux élèves assurerait sans aucun aléa le succès de leurs manipulations.

Je vais passer en revue les trois opérations fondamentales de la métallographie en vous indiquant pour chacune d'elles la mise au point dont elle a été l'objet.

Polissage. — Attaque. — Photographie.

Polissage.

F. Osmond classait lui-même par des lavages méthodiques ses différents numéros d'émeri, ne trouvant pas ceux du commerce assez réguliers; il préparait également ses feuilles émerisées en se servant d'un papier très fin, contrairement à ce qui se fait dans l'industrie, et collait l'émeri au blanc d'œuf pour éviter les impuretés de la gélatine. Enfin au moment de l'emploi, il appliquait sur des glaces ses papiers, de façon à en rendre la surface bien plane.

Pour le polissage final, il se servait de rouge d'Angleterre qu'il préparait lui-même en calcinant à l'air de l'oxalate de fer bien pur. Il étendait ensuite cette matière sur un morceau de drap humide porté par un disque horizontal en fonte, qu'il faisait tourner à la main.

Dans le but de perfectionner cette technique, ma première idée fut de m'adresser à un ouvrier polisseur. L'échec fut complet: mon nouveau professeur m'apprit dédaigneusement que les alliages ne se polissent pas; les métaux homogènes seuls: nickel, or, acier trempé, laiton, peuvent être travaillés. A l'appui de son dire, il me transforma en quelques secondes, avec ses toiles et ses brosses de polissage, une surface à laquelle Osmond avait donné le poli d'une glace, en une région montagneuse où des vallées accusaient les parties tendres du métal et des reliefs les parties dures. La finesse du papier d'Osmond et l'incompressibilité de la glace sous-jacente permettaient seules de niveler également les parties inégalement dures de l'alliage.

Je combinai alors des appareils pour le classement de l'émeri, j'essayai des pâtes de savon pour son agglomération, je me servis de flanelles tendues sur des glaces en utilisant les planchettes à dessin avec règle, etc. Tout cela sans aucun profit. Il n'est pas inutile de rappeler à l'occasion combien il faut, dans les recherches expérimentales, accumuler de résultats négatifs avant d'atteindre la solution cherchée.

J'avais essayé à tout hasard, comparativement avec l'oxyde de fer servant au polissage, d'autres oxydes analogues: ceux de chrome, d'alumine. Ce fut alors le succès complet. Le remplacement du rouge d'Angleterre par l'alumine provenant de la calcination de l'alun ammoniacal et lévignée par suspension colloïdale, suivant la méthode de Schloesing, joint à l'emploi de plateaux plus grands que celui de l'appareil d'Osmond et tournant plus vite, grâce à la com-



Fig. 5.
Alliage cuivre-nickel (Desch)
(Attaque par H^2S)



Fig. 6.
Eutectique phosphore-cuivre (Desch).
(Attaque par H^2S).

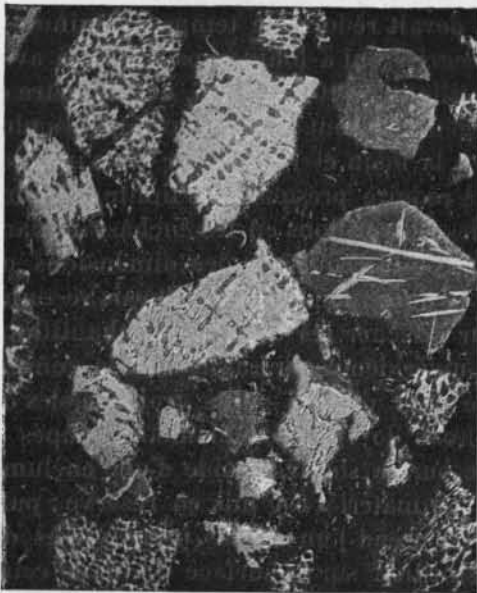


Fig. 7.
Grains d'acier et fonte
enchâssés dans la gomme laque (Legr's).



Fig. 8.
Tubes Legris.

mande au pied ou à la machine, permet de décupler la vitesse du polissage proprement dit et de faire rapidement disparaître les petites rayures provenant de mauvais papiers d'émeri. L'alumine, tout en donnant un aussi beau poli que l'oxyde de fer, possède une puissance abrasive infiniment supérieure. On peut alors employer les papiers d'émeri du commerce, sans avoir à se préoccuper de leurs imperfections. C'est là une très grosse simplification.

L'emploi de plateaux de polissage verticaux (fig. 29) diminuait beaucoup les chances de transport de grains d'émeri détachés de papiers employés au voisinage de l'appareil. Restait encore la difficulté très grave, surtout pour des élèves travaillant ensemble, d'éviter toute souillure accidentelle de la provision d'alumine destinée au polissage. La négligence d'un seul élève suffisait pour paralyser le travail du laboratoire tout entier. Je cherchai longtemps sans succès la solution pourtant très simple de ce problème. J'essayai d'abord de mettre l'alumine en pâte dans des tubes d'étain, mais pendant les manipulations nécessaires pour précipiter l'alumine obtenue en suspension dans l'eau, pendant la mise en pâte et pendant le remplissage des tubes, il était difficile d'éviter complètement les poussières, les grains de sable. Ce sont là des manipulations aussi délicates que la préparation des solutions stérilisées de la microbiologie. Une méthode parfaite, que j'aurais dû trouver dès le premier jour, consiste simplement à conserver l'alumine en suspension dans l'eau et à l'enfermer dans un pulvérisateur d'où on projette le mélange sur le drap. Les flacons fermés sont nécessairement à l'abri de toute contamination extérieure.

On arrivait ainsi à faire le polissage en un $1/4$ d'heure au lieu de 1 heure. Un nouveau perfectionnement de détail devait réduire le temps à 3 minutes; il est dû à un opérateur très habile, M. Legris, qui a longtemps travaillé avec moi. On employait auparavant des échantillons de 10 à 15 mm. de diamètre et d'une épaisseur égale aux $2/3$ de leur largeur. Ce sont là les conditions les plus favorables pour bien tenir l'échantillon à la main et l'empêcher de s'incliner pendant le polissage. M. Legris a réussi à réduire presque sans limite, à moins de 1 mm. par exemple, les dimensions des échantillons en les enchâssant dans une monture convenable (fig. 7 et 8). Cette réduction des dimensions de l'échantillon diminue considérablement la durée de polissage. J'avais reconnu les avantages de la gomme laque pour boucher les trous des échantillons poreux, pour agglomérer des matières pulvérulentes ou fragiles. Or la gomme laque fait aussi une excellente monture pour de très petits grains isolés de métal. M. Legris prend des tubes de laitons de 1 cm. de diamètre coupés à 8 mm. de longueur. Il en place une série sur la surface froide d'une enclume et les remplit de gomme laque fondue. Ce matériel est mis en réserve; puis au moment de faire une préparation, on prend l'un de ces tubes pleins de gomme laque, on applique le petit échantillon sur la surface plane de cette matière et on l'y fait pénétrer en l'appuyant avec une lame de fer chauffée, celle d'un canif par exemple.

L'emploi de l'alumine et l'insertion des échantillons dans la gomme laque, ont ainsi permis de réduire la durée du polissage de 1 heure à 3 minutes et ont

tellement simplifié l'opération qu'on peut la confier à un manoeuvre quelconque.

Ce sont là, semble-t-il, des détails insignifiants sur lesquels je n'aurais pas dû m'attarder aussi longtemps. Ces détails, seuls cependant, ont donné à la métallographie sa rapide extension. Pendant 30 ans, de 1864 à 1894, il n'y eut guère que trois métallographistes dans le monde entier : Sorby, Osmond et Martens. Il y en a aujourd'hui des centaines, tant dans les usines métallurgiques que dans les laboratoires scientifiques. De même, dans toute industrie le succès de chaque opération tient à la parfaite adaptation de certains détails que l'on juge trop souvent ensuite indignes même d'une simple mention. Par exemple, la fabrication de l'acier Thomas repose uniquement sur l'obtention de matériaux réfractaires en dolomie ; à peine signale-t-on cependant dans les cours de métallurgie les précautions nécessaires dans le choix de la dolomie, dans sa cuisson, dans sa conservation à l'abri de l'humidité, dans son agglomération avec le goudron et dans sa cuisson après mise en place. En fait ces détails si difficiles à découvrir sont seuls responsables du magnifique développement de la sidérurgie au convertisseur basique. Cela semble tellement simple aujourd'hui qu'on laisse aux praticiens le soin de conserver les traditions nécessaires. Dans l'enseignement doctrinal, on s'attache surtout à l'étude des réactions chimiques, à la description des appareils, toutes questions dont le rôle a cependant été bien secondaire au point de vue du résultat final ; les réactions étaient connues depuis un siècle ; l'appareil, la cornue Bessemer, depuis vingt-cinq ans.

Attaque.

Après polissage, la surface du métal présente généralement l'aspect uniforme d'un miroir réfléchissant sur lequel on discerne seulement quelques taches isolées : trous dûs à la présence d'inclusions gazeuses (fig. 9) graphite dans la fonte (fig. 10) et scories (fig. 11) dans le fer puddlé, tous corps se détachant en gris par suite de leur moindre pouvoir réfléchissant. Rarement quelques métaux ou combinaisons métalliques se distinguent immédiatement grâce à leur coloration propre ; le cuivre pur, rouge orangé ; le régule de Vénus (antimoniure de cuivre), violet ; l'or, jaune rouge et sa combinaison avec l'aluminium, d'un rouge grenat très vif, parfois des stries (fig. 12) provoquées par la déformation du métal, etc.

Dans l'immense majorité des cas, les différents constituants d'un alliage métallique ne se différencient qu'après une attaque convenablement choisie, qui les colore inégalement. Cette attaque doit être extrêmement faible, ne pas intéresser plus de 1/1000 de millimètre d'épaisseur sur la surface polie. Certains constituants de dimensions très faibles seraient déchaussés et arrachés, et par suite la structure réelle du métal complètement masquée. De plus, des corrosions trop profondes amèneraient sur la surface examinée des dénivellations rendant impossible une mise au point uniforme de tout l'échantillon. L'auteur de l'un des premiers traités de métallographie, un savant de nationalité étrangère,

qui n'avait jamais pris de leçons auprès d'Osmond et qui ignorait cette nécessité des attaques très faibles, avait donné dans son volume toute une série de photographies d'alliages se réduisant à des tableaux noirs plus ou moins tachés, sans aucune apparence de structure.

Tout en étant très faible, l'attaque doit donner une coloration intense à quelques-uns des constituants. Une attaque parfaite devrait noircir complètement certains d'entre eux (fig. 5 et 6), en laissant aux autres tout leur éclat. C'est là un résultat trop rarement atteint.

Le mécanisme de la production de ces colorations, ou plus exactement des différences dans l'intensité de la lumière réfléchie est assez intéressant à examiner. Il se rapporte à trois causes absolument distinctes.

1° *Combinaison superficielle du métal sans dissolution corrélative.* — C'est le cas d'un métal chauffé à l'air qui s'oxyde superficiellement, c'est-à-dire fixe l'oxygène sans aucune élimination correspondante : Le bleuissage de l'acier chauffé à 300° en est un exemple bien connu. Au fur et mesure que l'épaisseur de la couche d'oxyde augmente, on voit se succéder les couleurs habituelles des lames minces : elles disparaissent d'ailleurs avant que l'épaisseur de la couche d'oxyde ait atteint un millième de millimètre. Les vapeurs de brome, l'hydrogène sulfuré donnent dès la température ordinaire, sur divers métaux qu'ils attaquent, exactement les mêmes colorations (fig. 5 et 6). Certains réactifs liquides, mais ils sont très rares, donnent encore lieu au même phénomène ; par exemple, la solution bouillante de picrate de soude en présence d'un excès de soude caustique colore ainsi la *cémentite* ou carbure de fer (Fe_3C), sans exercer aucune action sur le fer pur ou *ferrite*. Il se produit là une oxydation, comme dans le chauffage à l'air, mais elle est limitée à un seul constituant, ce qui n'a pas lieu avec l'air.

Ce procédé de coloration est certainement le meilleur de tous, mais les circonstances où l'on réussit à le mettre en œuvre sont assez rares.

2° *Formation d'un dépôt pulvérulent remplaçant le métal dissous pendant l'attaque.* — Le plomb, l'étain des alliages antifriction se reconnaissent immédiatement après un traitement au nitrate d'argent qui donne sur les métaux dissous un précipité noir pulvérulent d'argent métallique, tandis que l'antimoine libre, l'antimoniure d'étain gardent tout leur brillant. A première vue, cette méthode semblerait comporter des applications très fréquentes, en raison du nombre énorme de combinaisons insolubles des divers métaux ; mais en fait, ces précipitations insolubles donnent rarement des résultats satisfaisants. Les métaux précipités sont transportés, comme dans les piles, vers la cathode et vont irrégulièrement se déposer sur les éléments inattaqués. Il faut pour éviter cet effet que la réaction de précipitation s'accomplisse très rapidement et même brutalement, ou encore que son développement soit limité par une action contraire, par exemple le dépôt de cuivre en présence d'une solution de chlorure ferrique qui tend à le redissoudre. Les précipités de sels insolubles ou tout au moins réputés tels, car en fait, il n'y a que des différences de solubilité, se sursaturent au moment de leur formation et vont généralement aussi se

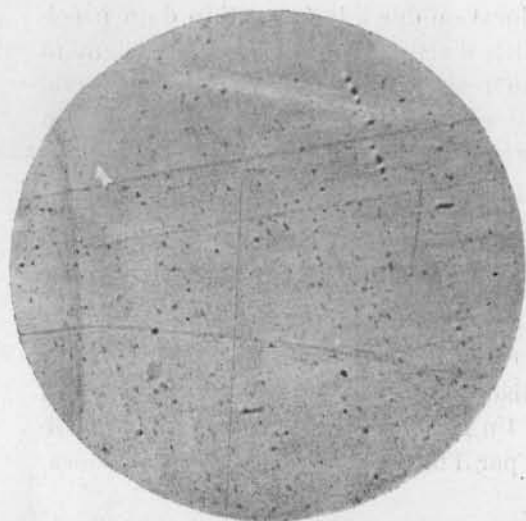


Fig. 9.
Brouze avec soufflures.

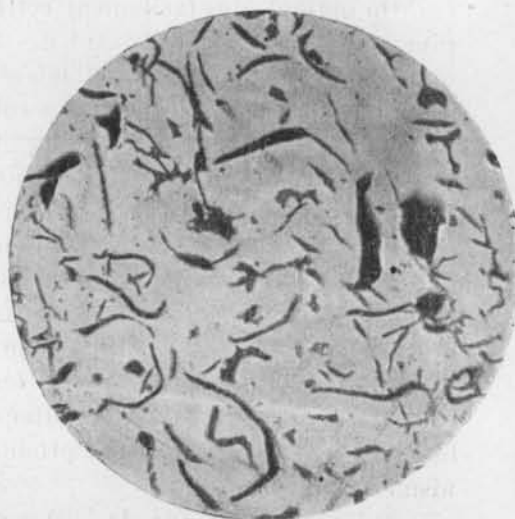


Fig. 10.
Fonte avec graphite.

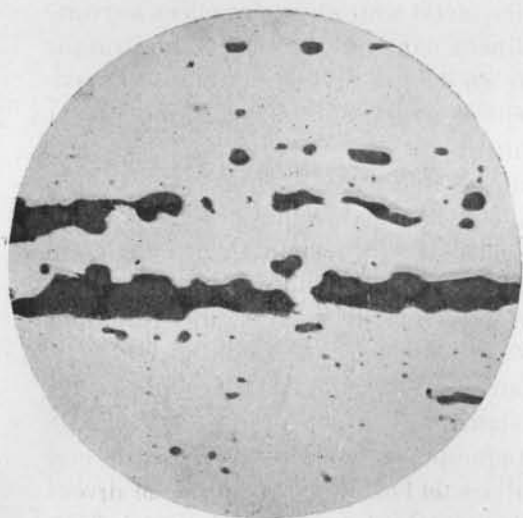


Fig. 11.
Scorie de fer puddlé.

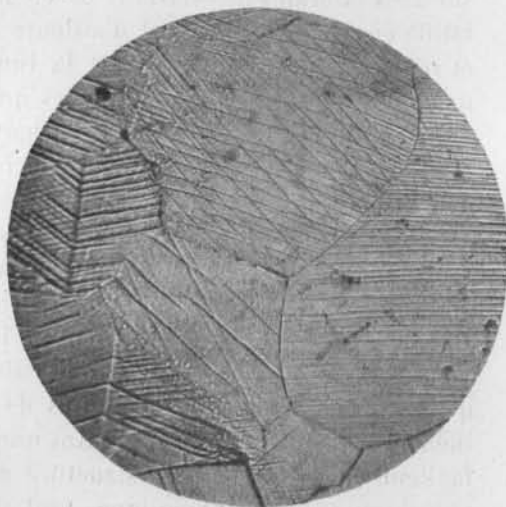


Fig. 12.
Nickel déformé.

déposer dans un certain rayon autour du point attaqué où ils ont pris naissance.

On obtient plus facilement cette coloration due à la formation d'un précipité pulvérulent en employant des réactifs d'attaque qui dissolvent seulement un des métaux de l'alliage et laissent un résidu non attaqué du second métal ou d'une de ses combinaisons. La coloration noir foncé que prend sous l'action des acides étendus l'*osmondite* (fig. 17 et 36), l'un des constituants des aciers trempés, paraît tenir à un dépôt impalpable de cémentite (Fe^3C) qui est resté inattaqué; de même dans les aciers phosphoreux, la coloration noire que prend la ferrite est due à un résidu pulvérulent de phosphure. Ce dernier est un véritable résidu chimique provenant de la dissolution incomplète du métal qui renfermait le phosphure en solution solide homogène. Au contraire dans le cas de l'*osmondite* le résidu impalpable de cémentite devait préexister, juxtaposé au fer, en cristaux trop fins pour être discernables au microscope. Le fer est dissous et la cémentite reste inattaquée. Un grand nombre de colorations utilisées en métallographie sont produites par l'un ou l'autre de ces deux mécanismes.

3° Un dernier mode de différenciation assez curieux et d'un emploi très fréquent résulte de la mise à nu, par l'attaque chimique de plans cristallins inclinés par rapport à la surface polie de l'alliage. Ces plans réfléchissant la lumière incidente obliquement et par suite en dehors de l'objectif, semblent alors, pour l'observateur, ne pas être éclairés; ils se détachent en noir sur le fond blanc de la préparation.

Deux mécanismes distincts peuvent mettre en jeu le même phénomène. Voici le premier et le plus simple. Attaquons par un acide un alliage de plomb et d'antimoine, le plomb se dissout seul et l'antimoine reste inattaqué. Les surfaces latérales des cristaux de ce dernier métal sont alors dénudées sur une faible épaisseur, elles sont d'ailleurs inclinées dans une direction quelconque et réfléchissent le plus souvent la lumière en dehors de l'objectif. Elles dessinent ainsi de petits filaments noirs qui délimitent les contours des cristaux et tracent la ligne de séparation des deux constituants de l'alliage.

Dans les métaux purs, le même mécanisme permet d'accuser, plus difficilement il est vrai, les lignes de séparation des cristaux accolés les uns aux autres; on obtient alors ce que l'on appelle la structure cellulaire. La vitesse d'attaque d'un même corps cristallisé varie avec l'orientation de la surface libre par rapport aux axes cristallographiques. Des grains voisins, différemment orientés, se creusent inégalement et laissent alors apercevoir leur surface latérale de séparation sous forme d'un filament noir (fig. 13 et 14). Les impuretés qui s'accumulent dans les joints de cristaux tendent encore à accentuer le même phénomène en provoquant une attaque plus ou moins rapide. On met facilement en évidence la structure cellulaire de l'acier par l'action de divers acides en solution alcoolique, tout particulièrement avec la solution à 5 % d'acide nitrique dans l'alcool amylique.

Cette méthode d'attaque donne simplement des lignes noires sur un fond

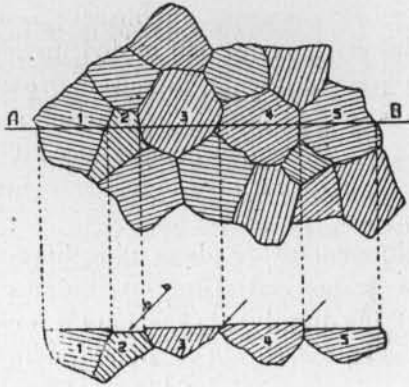


Fig. 13.
Schéma de la structure cellulaire.

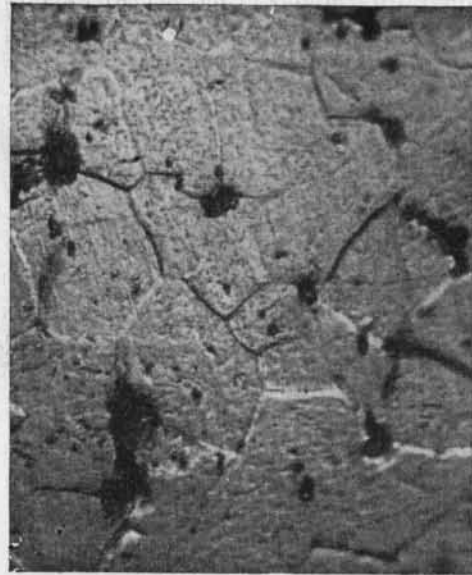


Fig. 14.
Attaque profonde d'un acier extra-doux
montrant l'inclinaison des surfaces
de séparation des cellules.



Fig. 15.
Acier à 0,45 0/0 de C.
Perlite partiellement dissociée.
(Grossissement: 800 diam.).

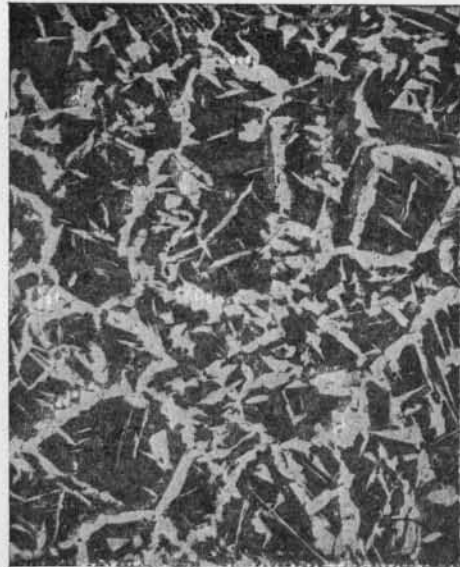


Fig. 16.
Acier à rails à 0,45 0/0 de C.
Perlite non dissociée.
(Grossissement: 80 diamètres)

blanc, on voit bien les contours des différents cristaux, mais rien ne permet d'en différencier la nature, ni l'orientation.

Lorsque les cristaux sont très fins et très rapprochés l'un de l'autre, ont par exemple moins de 1/10.000 de millimètre, le pouvoir séparateur du microscope ne permet plus de distinguer les lignes noires juxtaposées, on observe seulement une coloration grise générale. Pour des cristaux un peu moins fins, on verra, soit les filaments noirs, soit une masse grise uniforme, suivant le grossissement de l'objectif employé. Ces phénomènes se présentent d'une façon extraordinairement nette avec ce que l'on appelle la *perlite* des aciers, agrégat de lamelles alternantes très fines de fer pur (ferrite et de carbure de fer (cémentite = Fe^3C) qui renferme 0,9 % de carbone (fig. 15 et 16).

Un second mode très curieux de développement de plans réfléchissants obliques se produit parfois à l'intérieur des grains cristallins eux-mêmes et dans toute leur étendue, sous l'action de certains dissolvants spéciaux qui corrodent le métal en donnant une surface taillée en marches d'escalier; toutes les marches parallèles entre elles sont orientées suivant la direction des plans de clivage du cristal. Un gros cristal de gypse abandonné dans l'eau courante se corrode ainsi à la longue; les faces latérales du fer de lance, présentent des gradins visibles à l'œil nu. De même, lorsque l'on casse par choc un cristal de feldspath, la surface de rupture suit une série de plans de clivage, dont on reconnaît facilement l'existence en éclairant convenablement la cassure. Pour certaines positions de la source lumineuse, la cassure fait miroir. C'est ainsi que dans le granit, les minéralogistes reconnaissent à coup sûr le feldspath et le distinguent du quartz.

Sur ces minéraux, les gradins sont visible à l'œil nu ou tout au moins à la loupe; dans les métaux au contraire, ils sont tellement fins qu'ils restent indiscernables aux plus forts grossissements du microscope; mais suivant l'orientation des plans de clivage, par rapport à la surface polie, l'éclairage de chaque grain cristallin sera variable. Les grains conserveront le brillant du métal poli, quand leurs plans de clivage seront parallèles à la surface libre; ils sembleront au contraire absolument noirs quand ces plans seront inclinés à 45°. On voit ainsi sur la préparation une série de cellules d'éclat différent. Cette méthode convient particulièrement pour l'étude des métaux purs, comme le fer, le zinc, l'étain ou des alliages homogènes à un seul constituant, comme le laiton à moins de 30 % de zinc convenablement recuit (fig. 19). On voit parfois les gradins, dans l'acier au silicium par exemple (fig. 20).

Les réactifs donnant lieu à ce mode d'attaque sont assez rares et souvent difficiles à découvrir; le laiton est un des alliages pour lesquels ce phénomène est le plus facile à produire; presque toutes les attaques un peu énergiques conviennent. Dans ce cas, on reconnaît en plus dans chaque grain, l'existence de macles nombreuses s'éclairant inégalement par suite de leur différence d'orientation et présentant de grandes analogies avec celles des feldspaths. Pour le fer, on doit employer le chlorure double de cuivre et de potassium, ou le perchlorure de fer acide. Pour le zinc, le meilleur réactif est une solution au

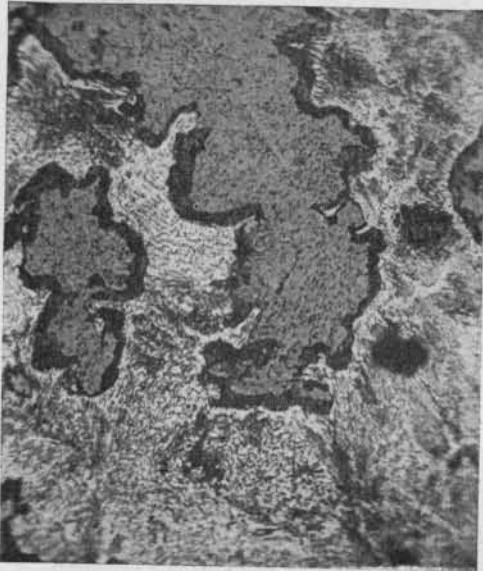


Fig. 17.
Acier à 0,30 0/0 de C. avec liserés noirs d'Osmoudite.



Fig. 18.
Autifriction (Attaque au nitrate d'argent).



Fig. 19.
Laiton.

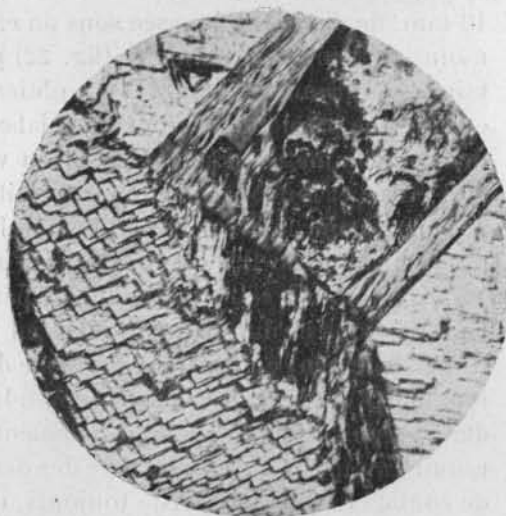


Fig. 20
Acier au silicium.

millième d'acide nitrique additionnée de quelques gouttes d'acide chromique, etc.

L'étude des différents procédés d'attaque des alliages a fait l'objet de recherches extrêmement prolongées. En totalisant les études faites à ce sujet dans mon laboratoire, on arriverait certainement à plus de trois cents journées de travail de 10 heures. Antérieurement, M. le professeur Martens et son collaborateur M. Heyn, M. Osmond et son préparateur Cartaud avaient pu faire ensemble un travail aussi considérable; mais jusqu'ici le résultat de ces recherches a été sensiblement nul au point de vue scientifique. On n'a pu trouver aucune loi, aucune relation générale, qui permette de prévoir à l'avance le mode d'action des divers réactifs. Au point de vue pratique, par contre, on a découvert une douzaine de réactifs d'un emploi très commode et qui sont devenus aujourd'hui d'un usage courant pour les applications de la métallographie.

Dureté.

A côté de l'emploi des réactifs chimiques, il existe un procédé très intéressant pour la différenciation des constituants des alliages, c'est la mesure de leur *dureté*. Le professeur Martens, avait proposé l'emploi du scléromètre; il rayait l'alliage avec un point de diamant pressé sous un effort déterminé, puis il mesurait ensuite au microscope la largeur de cette rayure; elle est d'autant plus large que le constituant gravé est plus tendre.

M. Légris a imaginé un procédé d'une réalisation beaucoup plus simple, consistant à employer la méthode Brinell, c'est-à-dire l'impression d'une bille sphérique sous une charge déterminée; mais au lieu de la bille de Brinell de 10 mm. de diamètre, pressée sous un effort de 3.000 kg., il emploie une bille de moins de 1 mm. de diamètre (fig. 22) pressée sous un effort de quelques centaines de grammes (fig. 21). On obtient très facilement ces petites billes en étirant une baguette d'agitateur de laboratoire en un fil d'une fraction de millimètre de diamètre, coupant ce fil au voisinage de son raccord avec la partie non étirée et fondant ensuite l'extrémité par un coup de chalumeau. On mesure au microscope le diamètre de l'empreinte et on calcule le nombre de dureté par la formule de Brinell complétée d'après les indications de Benedicks.

L'emploi de cette méthode est particulièrement intéressant pour étudier les variations de dureté des alliages en fonction de leur composition. On le fait très simplement en utilisant un mode de préparation des alliages que j'ai depuis longtemps indiqué. Il consiste à prendre des métaux superposés par ordre de densité, puis à les refroidir rapidement en évitant toute agitation, de façon à réduire au minimum le mélange des deux métaux au voisinage de leur surface de contact (fig. 25). Il existe toujours, quoique l'on fasse, une zone de passage plus ou moins épaisse, dans laquelle on trouve toutes les compositions intermédiaires d'un métal à l'autre. Des empreintes réparties également dans toute

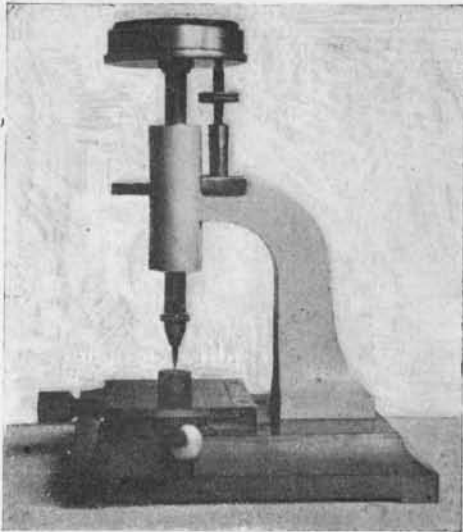


Fig. 21.
Appareil Legris à bille de verre pour la mesure
de dureté.

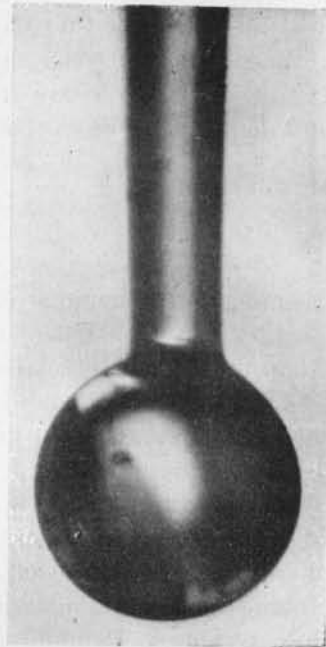


Fig. 22.
Bille de verre. Grossissement : 50 diamètres.

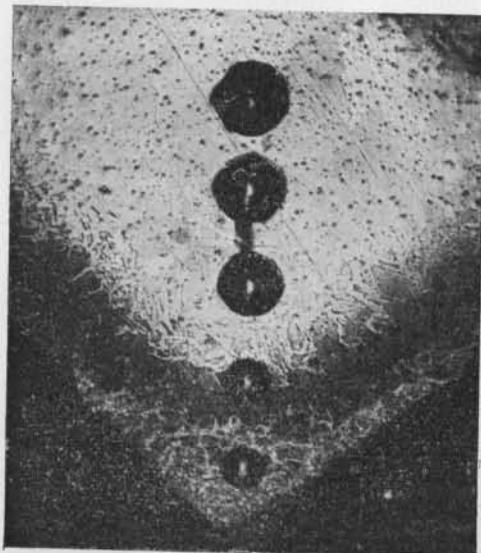


Fig. 23.
Variation de dureté
d'un acier cémenté superficiellement et recuit.

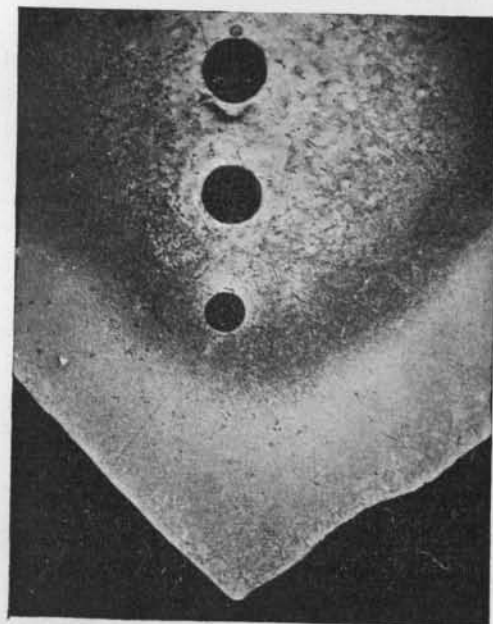


Fig. 24.
Variation de dureté
d'un acier cémenté superficiellement et trempé.

cette zone permettent de reconnaître la dureté plus grande de certaines combinaisons définies (fig. 26), ou encore des eutectiques; la finesse très grande de leur grain accroît l'influence des forces capillaires qui s'exercent au contact de corps différents. La même méthode s'applique avec avantage à l'étude de la cémentation superficielle (fig. 23 et 24).

Photographie

L'examen microscopique et la photographie des échantillons présentent des difficultés spéciales dépendant des procédés d'éclairage employés. L'opacité des métaux oblige à les éclairer par réflexion, c'est-à-dire à faire arriver la lumière du côté même de l'objectif. Pour les forts grossissements, variant de 450 à 600 diamètres, qui sont indispensables dans l'étude des alliages usuels, à grain toujours très fin, on ne peut placer l'appareil d'éclairage entre l'objectif et l'objet, la distance est trop faible. On fait arriver la lumière par l'intérieur du microscope à travers l'objectif qui remplit ainsi un double rôle, celui d'appareil d'éclairage et celui d'appareil d'observation. Théoriquement cela semble très simple; mais la réalisation de cet éclairage donne lieu à des difficultés sérieuses. Osmond employait un prisme à réflexion totale placé juste au dessus de l'objectif et en cachant une moitié, qui servait à l'éclairage, tandis que la seconde moitié servait à l'observation. En outre son dispositif d'éclairage comprenait un ensemble très complexe, dont il réglait chaque fois les divers éléments avec un soin méticuleux.

Position de la source lumineuse (3 variables indépendantes).

Position d'une lentille convergente (3 variables).

Position d'un écran interposé sur le parcours du faisceau lumineux (3 variables), inclinaison du prisme monté sur un axe de rotation (1 variable). Soit en tout 10 variables.

Après quelques tentatives infructueuses, je renonçai à acquérir le tour de main nécessaire pour un réglage aussi compliqué et je fis l'étude méthodique du problème de l'éclairage (fig. 27 et 28). Toute la question se réduit à ceci: le faisceau lumineux introduit à travers le microscope se réfléchit en partie sur les lentilles qu'il traverse et retourne vers l'œil de l'observateur ou vers la plaque photographique, diluant ainsi, dans cette lumière aberrante, l'image observée. Cet inconvénient est beaucoup plus grave pour la photographie, parce que le verre réfléchit en plus forte proportion les radiations à courte longueur d'onde. Le problème à résoudre était donc de réduire au minimum la quantité de lumière ainsi diffusée.

Indépendamment de toutes les dispositions particulières de système optique d'éclairage, il est facile de voir qu'il y a trois conditions générales essentielles à remplir et faciles à réaliser.

1° On doit limiter l'éclairage de la préparation exactement à la région visible dans le microscope, toute la lumière qui tombe en dehors de cette région



Fig. 25.
Filiation des alliages Ag-Sb.

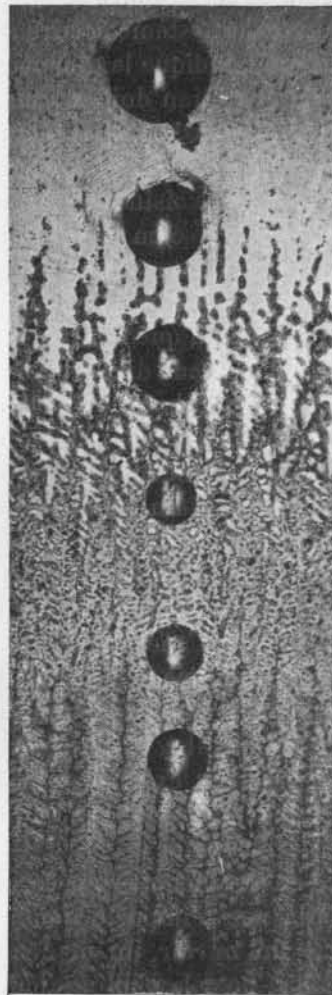


Fig. 26.
Filiation des alliages Ag-Su.

est évidemment inutile, sans cesser pour cela d'être nuisible par les réflexions qu'elle subit sur chaque surface des lentilles de l'objectif. On réalise cette condition en interposant dans le système optique d'éclairage, un diaphragme E (fig. 28) de diamètre convenable, au foyer conjugué de la préparation examinée. On règle sa position en éclairant le microscope du côté de l'oculaire, l'image du diaphragme de cet oculaire se réfléchit sur la préparation polie et vient se projeter à travers le système éclairer, exactement au point où le diaphragme doit être placé et en indique la dimension convenable.

2° La préparation doit de plus, être éclairée avec des rayons lumineux sensiblement normaux à la surface étudiée, c'est-à-dire parallèles à l'axe du microscope. C'est une condition nécessaire pour accentuer les différences d'éclat entre des constituants voisins présentant des éléments superficiels inégalement inclinés. On y arrive en plaçant un diaphragme G (fig. 28) au foyer principal du système optique composé par l'objectif et les lentilles d'éclairage I, la grandeur de ce diaphragme définit l'angle du pinceau lumineux servant à l'éclairage ;

3° Il faut enfin que tout le faisceau lumineux déterminé par les lentilles d'éclairage et les deux diaphragmes précédemment décrits pénètrent jusqu'à la préparation, ne tombe pas en dehors du prisme à réflexion totale qui est nécessairement très petit. On y arrive en plaçant l'arête de ce prisme C au foyer principal de l'objectif B, de telle sorte que l'image du diaphragme, déterminant l'angle du pinceau lumineux, se projette au voisinage même de cette arête. On peut enfin remplacer la face latérale du prisme incliné à 45° sur la face hypoténuse par deux plans équivalents, également inclinés sur la dite face, ce qui élargit le passage disponible pour le pinceau lumineux.

La réalisation mécanique de ce système d'éclairage ne comporte aucun tâtonnement et donne à coup sûr d'excellents résultats.

Il y a encore d'autres détails relatifs à l'éclairage qu'il est bon de prendre en considération. Il y a par exemple, un choix à faire parmi les différents modèles d'objectifs existant dans le commerce. Suivant la courbure des faces postérieures de leurs lentilles, la proportion de lumière renvoyée à l'œil est plus ou moins importante.

Il y a encore lieu de se préoccuper de la source lumineuse. Pour le simple examen à la vue n'importe quelle lumière convient : celle du jour diffus renvoyée par un miroir, un manchon Auer ou une simple flamme de gaz, de pétrole. Mais, pour la photographie, ces sources ne sont pas assez intenses, leur emploi nécessiterait un temps de pose exagéré. La lampe Nernst à gros filament donne aujourd'hui la source lumineuse la plus commode et celle qui dépense le moins d'électricité. On pourrait certainement obtenir d'aussi bons résultats avec des lampes du type dit 1/2 watt, à gros filament de tungstène roulé en spirale. On réduirait la longueur de la spirale au vingtième de sa grandeur habituelle ce qui lui permettrait de fonctionner sous 5 volts avec une intensité de courant de 5 ampères. La lampe à arc est plus brillante encore, mais le déplacement constant du caractère modifie irrégulièrement l'intensité utilisée dans le microscope et par suite la durée du temps de pose. On ne peut



Fig. 29.
Machine pour polissage à commande électrique.

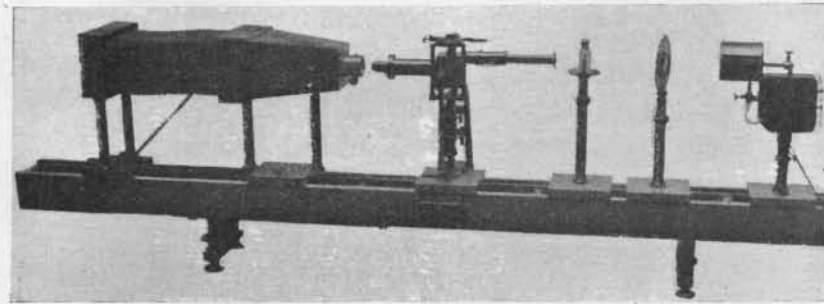


Fig. 27.
Microscope pour métallographie.

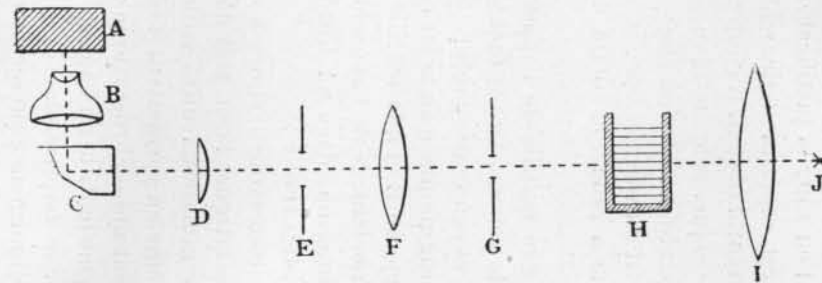


Fig. 28.
Schéma du dispositif d'éclairage.

donc pas régler mathématiquement le temps de pose comme avec les lampes à filament.

Quoiqu'il en soit, la justification de ces différents détails de construction rappelés ici est expérimentalement donnée par la finesse des photographies qu'ils permettent d'obtenir à coup sûr et sans aucun tâtonnement.

Voici le croquis schématique de la disposition que j'ai adoptée :

A. Préparation à étudier (fig. 28);

B. Objectif du microscope;

C. Prisme à réflexion totale dont l'arête est placée au foyer principal de l'objectif;

D. Première lentille de l'appareil d'éclairage. Elle est généralement confondue avec le prisme dont la face d'entrée est alors constituée par une surface sphérique de rayon convenable;

E. Diaphragme placé au foyer conjugué de la surface de la préparation par rapport à l'objectif B et à la lentille D;

F. Seconde lentille de l'appareil éclairateur;

G. Diaphragme placé au foyer conjugué de l'arête du prisme par rapport aux deux lentilles D et F;

H. Cuve absorbante destinée à retenir certaines radiations lumineuses, soit pour éviter de fatiguer l'œil, soit pour augmenter la netteté photographique en éliminant les radiations ultra-violettes dont la mise au point ne peut tenir compte ou même en permettant d'obtenir avec la lampe à mercure une lumière rigoureusement monochromatique;

I. Troisième lentille de l'appareil d'éclairage projetant l'image de la source lumineuse sur le diaphragme G;

J. Source lumineuse qui sera, suivant les cas, le filament d'une lampe Nernst, le charbon d'une lampe à arc ou le tube d'une lampe à vapeur de mercure.

Science des alliages.

Après vous avoir expliqué la technique de la métallographie microscopique, j'aurais voulu vous parler de la nouvelle science qui en est résultée, celle des alliages, l'un des chapitres les plus nouveaux et les plus intéressants de la chimie. Mais cela nous entraînerait trop loin. C'est là d'ailleurs un sujet bien connu aujourd'hui; il a sa place dans l'enseignement, il a été exposé dans des livres très bien faits, dont je me contenterai de vous signaler les plus importants : avant tout l'admirable traité des alliages métalliques de M. Cavalier, recteur de l'Université de Toulouse, les volumes si documentés de M. Guillet, professeur à l'École Centrale, et enfin de nombreux et excellents manuels de métallographie.

Je m'arrêterai seulement un instant sur un fait assez curieux, la difficulté avec laquelle, malgré sa simplicité enfantine, cette nouvelle science des alliages a réussi à prendre définitivement corps. On peut résumer d'un mot la théorie

des alliages en disant qu'ils sont analogues à tous les mélanges obtenus par fusion : mélanges de sels préparés au laboratoire ou roches ignées de l'écorce terrestres. Ils sont constitués par la juxtaposition de corps tous cristallisés, avec des formes géométriques, peut-être un peu moins régulières que celles des sels, mais dans lesquelles l'existence d'une orientation cristalline est cependant toujours facile à reconnaître. Les prétendus métaux amorphes appartiennent jusqu'ici au domaine de la mythologie et nullement à celui de la science. Ces corps cristallisés sont tantôt des métaux purs, tantôt des combinaisons définies, tantôt enfin des solutions solides ou cristaux mixtes, ce que l'on appelait autrefois bien improprement des mélanges isomorphes. Ces solutions solides, habituellement négligées dans la chimie classique, se rencontrent à chaque instant dans les métaux usuels, mais il ne sont pas moins fréquents dans les minéraux silicatés les plus communs : feldspath, pyroxène. Les cristaux des alliages sont certainement très fins et difficiles à observer, mais ils ne sont pas plus fins que ceux des mélanges de sels fondus obtenus au laboratoire, dont la nature et la complexité n'ont cependant jamais été mises en doute.

Il est bien difficile de comprendre aujourd'hui la persistance des idées singulières qui avaient cours, il y a vingt ans encore, sur les alliages. Dans les traités de chimie les plus sérieux, on disait tantôt que c'étaient des verres, tantôt que c'était des combinaisons, dont les proportions quoique définies, variaient par sauts insensibles, comme cela s'observe dans les carbures d'hydrogène très condensés, et l'on donnait comme preuve de l'existence de ces combinaisons l'abaissement du point de fusion des mélanges de métaux, caractère donné au contraire dans le cas des mélanges de sels comme preuve de leur hétérogénéité.

Pourtant un grand nombre d'expériences isolées avaient conduit à des observations parfaitement exactes et à des conclusions précises qu'il eut suffi de généraliser. Rudberg dès 1831 avait appliqué l'analyse thermique à l'étude des alliages de plomb et d'étain ; mais il fallut attendre soixante ans pour que ces nouvelles recherches d'Osmond fassent définitivement comprendre l'importance de cette méthode ; Matthiessen par des mesures de conductibilité électrique, Riche par des mesures de densité avait établi l'existence de la combinaison définie de cuivre et d'étain SnCu^2 ; H. Sainte Claire-Deville avait isolé, des alliages de métaux de la famille du platine avec le plomb, le zinc et l'étain, des combinaisons définies, parfaitement cristallisées. Personne cependant n'avait soupçonné la juxtaposition dans tous les alliages de petits cristaux de corps simples ou composés peu nombreux. Tous les savants gardaient les yeux fermés devant une vérité pourtant évidente. Mais aussitôt qu'ils purent voir un alliage au microscope, ces faits épars, depuis longtemps connus se groupèrent instantanément. Dans l'article de la *Revue générale des sciences*, de 1896 où je développai pour la première fois ce nouveau point de vue, il m'a suffi, pour en démontrer l'exactitude, de rappeler des faits depuis longtemps connus, dont on n'avait pas auparavant soupçonné le lien.

C'est là un exemple intéressant de la difficulté incroyable avec laquelle

notre esprit parvient à édifier une idée nouvelle. Le brouillard où sont aujourd'hui noyées toutes les nouvelles radiations se dispersera certainement un jour comme par enchantement et nous serons alors bien surpris de n'avoir pas reconnu des vérités qui nous entouraient de toutes parts. La matérialisation par le microscope de la structure des alliages a fait plus pour l'établissement de leur science que les nombreuses recherches péniblement amassés jusque là. Cela prouve une fois de plus que nous ne sommes pas de purs esprits et que les impressions matérielles sont un guide indispensable à l'exactitude de nos raisonnements.

Applications pratiques.

La rapide diffusion de la métallographie dans les usines donne la meilleure démonstration de son utilité pratique. Essayons d'analyser le mécanisme de son heureuse influence sur le travail des métaux.

La métallurgie est aussi vieille que le monde ; à l'usage des premiers métaux correspondent les dénominations des âges successifs de l'histoire de l'humanité. Comme toutes les industries, elle s'est pendant longtemps développée d'une façon toute empirique. Par des tâtonnements poursuivis au hasard, elle avait réussi à définir certaines règles de fabrication quelquefois heureuses, trop souvent aussi mises en défaut. La production des métaux était peu abondante et leur prix de revient très élevé. Des traditions inébranlables arrêtaient toute évolution ; certains minerais comme ceux d'Allevard étaient déclarés bons à la fabrication de l'acier ; ceux de la Lorraine, au contraire, étaient condamnés et ne pouvaient être d'aucun usage. Ces barrières sont aujourd'hui tombées. Depuis un siècle, grâce au progrès des sciences expérimentales, l'industrie métallurgique s'est transformée du tout au tout, sa production a centuplé.

Toutes les propriétés des métaux : leur résistance mécanique, leur conductibilité électrique, leur inaltérabilité chimique, etc., sont des fonctions complexes d'un grand nombre de facteurs élémentaires ; la science seule a su les démêler. Les minerais aciers, comme ceux d'Allevard, donnent un bon métal, non pas en raison de qualités surnaturelles, mais simplement parce qu'exempt de phosphore ; par contre les minerais oolithiques de la Lorraine réputés inutilisables, le sont seulement par suite de l'élévation de leur teneur en phosphore ; ils donnent un métal trop fragile. Mais en leur enlevant ce phosphore, ils doivent égaler les meilleurs minerais à acier. La déphosphoration au four électrique a accompli cette merveilleuse prédiction. La métallurgie moderne a été créée, on peut le dire, par la découverte des méthodes d'analyse chimique ; et maintenant la métallographie se prépare à la transformer une seconde fois, en complétant les méthodes scientifiques de travail mises à sa disposition.

Les propriétés de tous les métaux pris à une température et à une pression données, sont fonctions complexes de quatre sortes de facteurs différents :

1° *Composition chimique brute.* — C'est-à-dire pour le fer, par exemple,

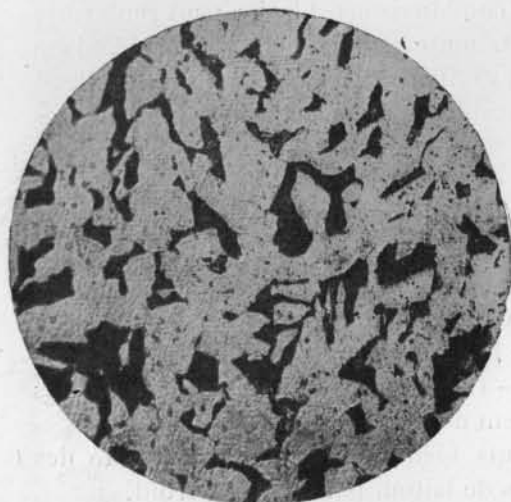


Fig. 30.
Laiton non malléable à froid (2 constituants).



Fig. 31.
Fonte grise avec eutectique phosphoreux en blanc.



Fig. 32.
Cuivre avec 0,5 0/0 d'arsenic et de l'oxygène.

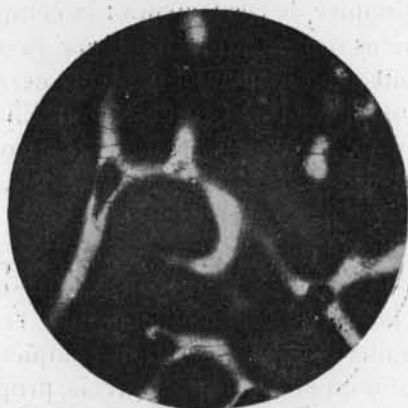


Fig. 33.
Cuivre avec 0,1 0/0 d'arsenic.

proportion des éléments étrangers et avant tout du carbone, du soufre et du phosphore ;

2° *Constitution chimique*. — C'est-à-dire état de combinaison, des corps en présence ; état allotropique des diverses combinaisons. L'acier peut renfermer son carbone à l'état libre : le graphite de la fonte grise ; à l'état de combinaison définie Fe³C cémentite des aciers recuits ordinaires, des aciers à rails ; à l'état de solution solide non magnétique, ou austénite, dans les aciers manganèses employés pour les broyeurs.

3° *Structure*. — C'est-à-dire forme et dimension des différents cristaux juxtaposés dans les alliages. Les aciers moulés bruts de coulée, présentant de gros cristaux limités par des contours rectilignes ; ils sont très fragiles, mais des recuits successifs diminuent les dimensions de ces cristaux ; le forgeage les brise et les déforme. Au fur et à mesure de ces modifications de structure, on observe une augmentation corrélative de la ductilité ;

4° *Facteurs incomplètement connus*. — Il existe encore d'autres facteurs des propriétés des métaux et plus généralement de tous les corps.

L'écrouissage amène des changements bien connus dans la dureté des métaux. On donne de la rigidité aux tubes de laiton, par étirage à froid.

D'autres facteurs, comme les *radiations* lumineuses frappant le sulfure de calcium, le *magnétisme* agissant sur l'acier trempé, permettant d'emmagasiner dans ces corps de nouvelles quantités d'énergies et d'en modifier ainsi les propriétés.

Enfin les *tensions capillaires* s'exerçant au contact de corps différents semblent intervenir pour augmenter la dureté des alliages à grain fin.

Ce champ d'étude nous réserve encore de nombreuses découvertes.

L'analyse chimique, en donnant une détermination précise de la grandeur du premier de ces facteurs : la composition chimique, a rendu à l'industrie des services rappelés plus haut, sur lesquels il n'y a pas lieu de revenir ; mais elle restait muette au sujet des trois derniers facteurs. La métallographie est venue la compléter très heureusement. Elle donne la définition rigoureuse du second et du troisième de ces facteurs : Constitution chimique et structure ; mais de plus, elle se substitue parfois utilement à l'analyse chimique brute d'un alliage ; elle réussit encore à nous donner quelques lumières sur les facteurs de la quatrième catégorie.

Je voudrais vous montrer par quelques exemples particuliers les services que la métallographie peut ainsi rendre dans les usines. Il ne s'agit pas bien entendu d'une énumération complète ; elle exigerait des volumes ; mais seulement d'un choix de faits précis, propre à mettre en lumière les modes d'emploi de la métallographie.

Analyse chimique.

Sauf dans quelque cas, très particuliers, la métallographie ne peut pas avoir la prétention de se substituer à l'analyse chimique. On a bien essayé

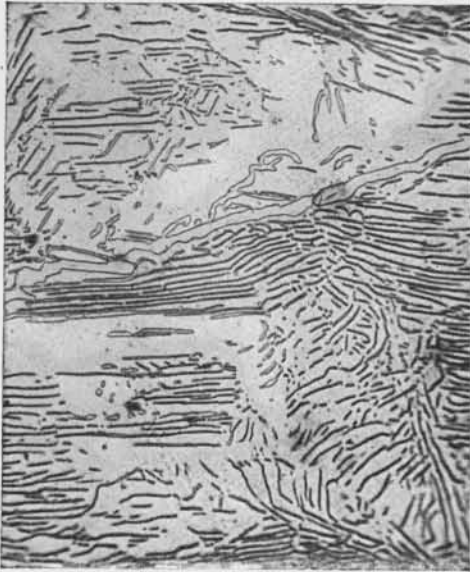


Fig. 34.
Acier à 1,2 0/0 de C. après recuit prolongé (*perlite*).

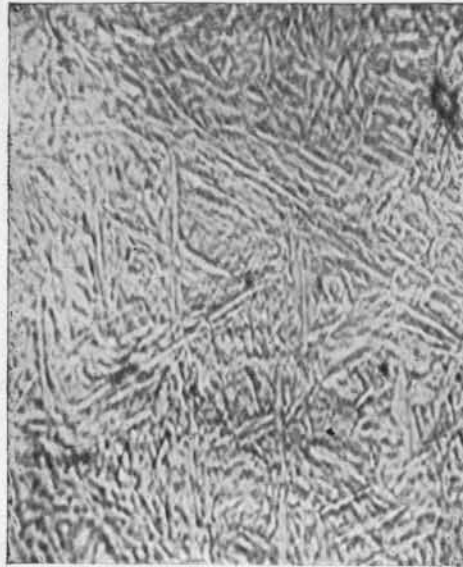


Fig. 35.
Acier à 1 0/0 de C. trempé à partir de 1000°
(*Martensite*.) Très forte attaque.



Fig. 36.
Acier à 0,8 0/0 de C. trempé à partir de 750°,
au milieu de la transformation (*Osmondite* en
noir, *martensite* en blanc et *perlite*). Très faible
attaque.



Fig. 37.
Acier à 1,4 0/0 de C. trempé dans l'eau glacée à
partir de 1.200° (*austénite* en gris, *martensite* en
blanc et *osmondite* en noir). Attaque moyenne.

d'instituer pour les alliages des méthodes de recherche qualitative fondée sur l'observation microscopique, comme Behrens l'avait cherché pour l'étude des précipités. Mais l'emploi systématique de l'analyse microchimique, exige dans tous les cas un travail préparatoire disproportionné avec le résultat poursuivi. Elle doit être recommandée seulement dans des cas exceptionnels.

Certains corps difficiles à doser, par exemple, peuvent parfois être facilement reconnus et même évalués quantitativement par un simple examen microscopique par exemple le phosphore dans les fontes (fig. 31). C'est de beaucoup le procédé le plus rapide et le plus exact pour reconnaître dans le cuivre, la présence de l'oxydure (fig. 32), si nuisible aux propriétés mécaniques ; ou encore celle de l'arsenic (fig. 32 et 33). On obtient ainsi des résultats précis en moins d'un quart d'heure, là où l'analyse chimique demanderait une journée de travail. Quelquefois même, on reconnaît ainsi la présence de corps que les méthodes purement chimiques sont actuellement incapables de déceler : par exemple la présence de scories oxydées dans le fer et l'acier. On ne possède pas en effet de procédé de dosage pour l'oxygène contenu dans le fer.

Comme méthode d'analyse chimique, la métallographie est surtout intéressante par son caractère de certitude. Un observateur ne récuse jamais ce qu'il a vu au microscope, mais il conteste volontiers l'exactitude de résultats déduits par le calcul, d'une analyse chimique. Voici un exemple typique : Je fus consulté, un jour, par un fabricant de laitons se plaignant de l'irrégularité de ses produits : certaines planches très douces se laissaient facilement travailler au burin, d'autres étaient absolument aigres et inutilisables. Pensant à une impureté, je fis en quelques minutes devant l'intéressé l'examen de son laiton (fig. 30). En fait il s'agissait simplement d'une erreur de dosage. Les bons échantillons appartenaient à la catégorie dite des laitons à froid, à 30 % de zinc environ, contenaient après recuit un seul constituant : les mauvais étaient au contraire formés par la juxtaposition de deux constituants, l'alliage appartenait à la catégorie dite des laitons à chaud, renfermant plus de 35 % de zinc. Le propriétaire de l'usine me répondit de suite en niant ces irrégularités de dosage rendues impossibles par le soin avec lequel les pesées étaient faites pour chaque coulée. Mais après avoir ainsi condamné mon diagnostic, il n'en conserva pas moins l'impression des choses vues par lui au microscope. Rentré chez lui, il se décida à ouvrir une nouvelle enquête ; il ne l'eut jamais fait sur le vu d'une simple analyse, ses pesées lui inspirant plus de confiance que celles d'un chimiste. Il découvrit alors ceci. Les ouvriers chauffaient les barres de cuivre avant de les mettre dans le creuset, en les plaçant au-dessus du foyer pendant l'opération précédente : parfois un bout de barres fondait, tombait dans le foyer et passait dans le machefer au lieu d'aller plus tard dans le creuset. Aussi malgré des pesées très soignées, le poids de cuivre variait-il irrégulièrement d'une fusion à l'autre.

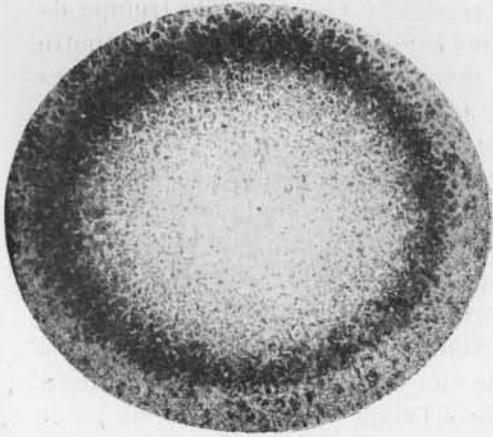


Fig. 38.
Fil de fer cémenté superficiellement. Grand excès
de cémentite, mauvaise opération.

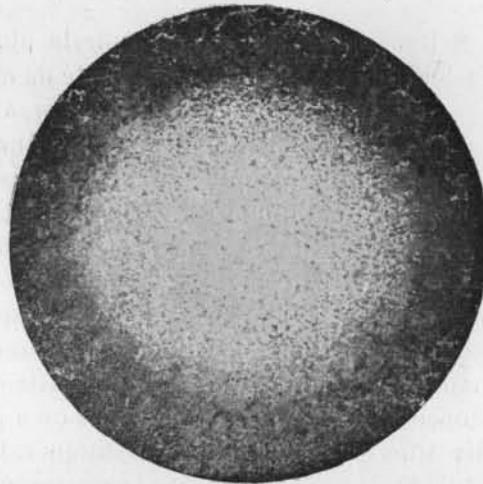


Fig. 39.
Fil de fer cémenté superficiellement, léger excès de
cémentite, opération médiocre (Legris). (Coupe
en travers).

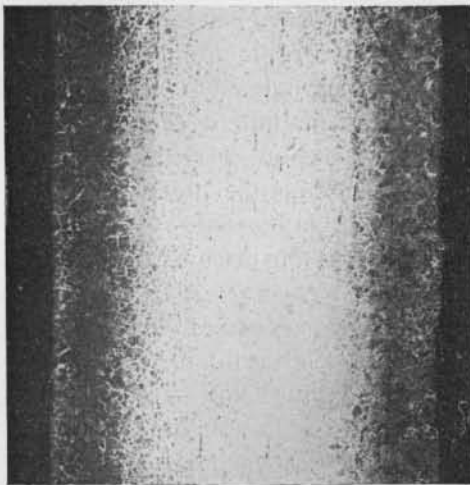


Fig. 40.
Fil de fer cémenté superficiellement, léger acier de
cémentite, opération médiocre (coupe en long)
(Legris).

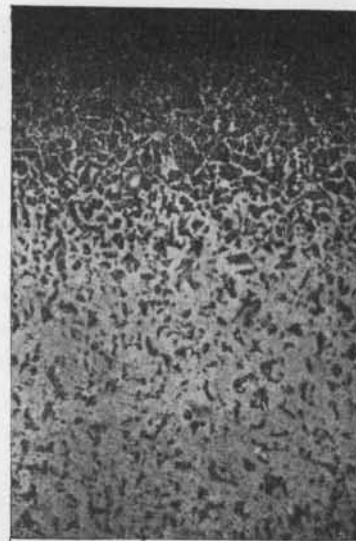


Fig. 41.
Acier doux cémenté superficiellement, pas de cé-
mentite libre, très bonne opération (de Nolly).

Constitution chimique

Dans ce domaine l'exemple le plus frappant se rapporte à la trempe de l'acier (fig. 34). Une même quantité de carbone peut exister dans l'acier à quatre ou cinq états chimiques différents, avec des propriétés naturellement très variables. Avant de les connaître, aucune théorie raisonnable de la trempe n'était possible. Toute obscurité a disparu aujourd'hui; on sait rattacher à chaque état chimique du carbone, certaines propriétés mécaniques spéciales. La *martensite* (fig. 35) possède une grande dureté minéralogique, mais aussi une fragilité extrême. Inversement l'*austénite* (fig. 37) à faible dureté minéralogique est le plus malléable des constituants des aciers. L'*osmondite* (fig. 36) réunit à une limite élastique élevée une certaine malléabilité, c'est le constituant par excellence des aciers industriels. Non seulement on rattache ainsi les propriétés à la constitution, mais on a pu de même rattacher cette constitution aux différents traitements thermiques. Grâce à l'étape intermédiaire, au point de repère assuré fourni par le microscope, on sait aujourd'hui traiter un acier de façon à lui donner à coup sûr les qualités désirées.

Autre exemple; non moins frappant. On emploie dans la construction moderne des machines et en particulier dans celle des moteurs d'automobiles, des pièces en acier doux cémentées superficiellement: ceci dans le but de réunir à la non fragilité d'arbres construits en acier doux, la grande résistance à l'usure de surfaces frottantes durcies par la trempe. On rencontrait au début de cette fabrication l'un des deux inconvénients suivants ou même les deux à la fois. L'arbre bien fabriqué avec un métal doux et non fragile, cassait parfois en service, comme du verre. Nous reviendrons plus loin sur ce défaut à propos de la structure. De plus, la surface cémentée commençait rapidement à gripper, se pulvérisait par le frottement en donnant une poussière d'acier trempé comparable à l'émeri. L'arbre et les paliers étaient immédiatement mis hors de service. La métallographie a donné sans peine l'explication de ce défaut, et a fourni de plus, le moyen de l'éviter. Dans la couche cémentée et trempée, le carbone peut être en totalité à l'état de solution solide, de *martensite* (fig. 39 et 41) ce sont là les conditions optima: grande dureté et pas d'usure au frottement. Ou bien le carbone peut s'isoler en partie à l'état de *cémentite* (fig. 38 et 40) disséminée en grandes lamelles au milieu de martensite; ces lamelles, clivables comme le mica, se fendent sous des efforts très faibles et criblent de fissures la partie cémentée, amenant ainsi sa désagrégation rapide. Non seulement la métallographie nous a expliqué la cause de ce défaut, mais elle a en outre permis de définir, au moyen d'expériences de laboratoire très simples, les conditions à remplir pour l'éviter d'une façon certaine. L'apport du carbone sur le métal, doit être assez lent par rapport à sa diffusion vers l'intérieur de la pièce pour que la teneur en carbone vers la surface, ne dépasse jamais 0,9%. On y arrive en employant un ciment peu actif, en réduisant la température de cémentation et en augmentant la durée.

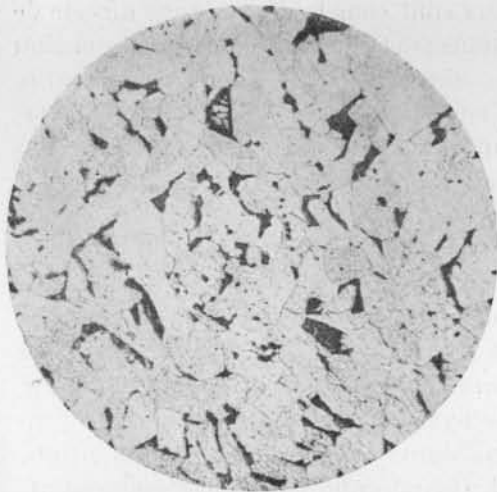


Fig. 42.
Acier doux normal (Osmond).

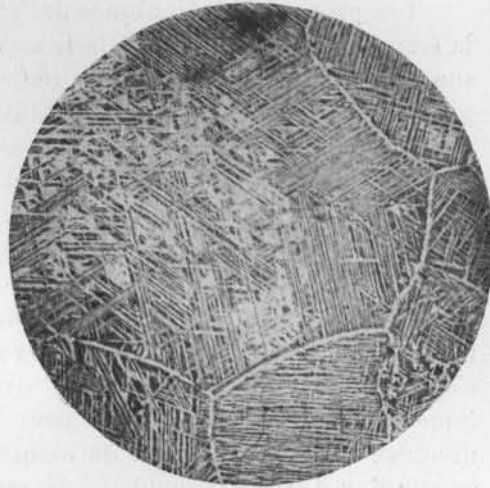


Fig. 43.
Acier doux très longtemps surchauffé (Belaiew).

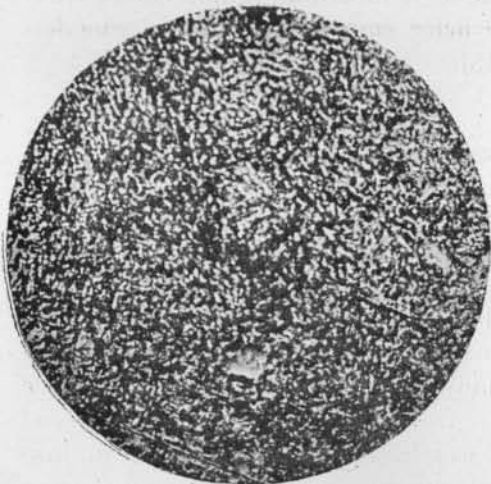


Fig. 44.
Acier au nickel trempé à l'huile à 850° et revenu
à 650° 440 d. (de Nolly).

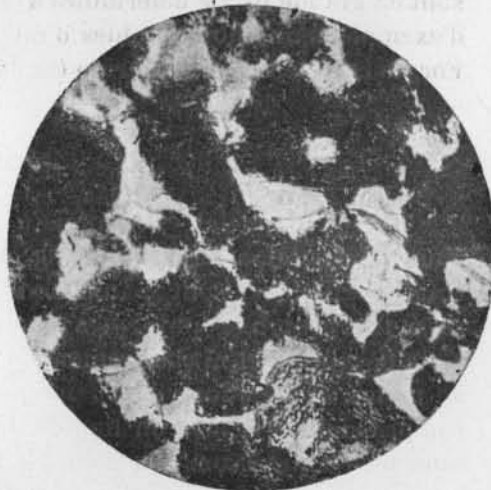


Fig. 45.
Acier au nickel recuit à 900° et refroidi dans les
cendres 440 d. (de Nolly).

Structure.

Les propriétés mécaniques des métaux sont sous la dépendance directe de la forme et de la dimension de leurs cristaux. Cette forme et cette dimension sont sous la dépendance des traitements chimiques et thermiques. La métallographie a donné sur ce point la solution complète d'un problème d'une importance capitale et a contribué ainsi dans une large mesure à l'amélioration des métaux fournis couramment à la construction mécanique.

Reprenons l'exemple des pièces cémentées superficiellement.

L'âme en métal doux (fig. 42) devient parfois complètement fragile. Dans ce cas l'examen microscopique révèle un grossissement tout à fait anormal de la structure cellulaire (fig. 43). L'étude de ce défaut poursuivi avec l'aide du microscope a permis de définir très rapidement les conditions nécessaires pour s'opposer au grossissement de la structure (fig. 44 et 45) et par suite au développement de la fragilité. On peut employer des méthodes purement chimiques : suppression totale de manganèse dans l'acier doux de cémentation, ou addition de petites quantités de nickel. Quand enfin le défaut s'est produit, on peut le réparer par un traitement approprié : la double trempe. Cette opération comprend un premier chauffage à une température voisine de 950°, suivi d'un refroidissement rapide, puis un réchauffage jusqu'à 780° et la trempe définitive à cette température.

Tous les aciers spéciaux employés aujourd'hui dans l'industrie automobile acquièrent leurs propriétés si remarquables par la réunion de certaines compositions chimiques à des traitements thermiques appropriés. Et ces derniers sont en grande partie déterminés avec l'aide de la métallographie. Voici à titre d'exemple deux photographies d'un même acier empruntées au catalogue des Forges et Aciéries de la Marine (fig. 44 et 45).

Écrouissage.

Lorsqu'un métal est soumis à un effort énergétique accompagné ou non d'une déformation importante (fig. 47), ses propriétés mécaniques, son hystérésis magnétique, sont grandement modifiées, sa dureté augmente (fig. 46); ses autres propriétés physiques le sont également, mais à un degré moindre. Il n'y a là cependant ni changement de composition, ni changement de structure, au moins si les efforts sont appliqués d'une façon uniforme, c'est-à-dire, par compression au sein d'un liquide. Un autre facteur a donc été modifié, mais nous n'en connaissons pas encore la nature exacte et nous savons encore moins le mesurer. Son intervention certaine soulève cependant de nombreux problèmes et pour quelques-uns d'entre eux, la métallographie peut fournir des indications partielles déjà très intéressantes, surtout en l'absence d'autres méthodes d'études.

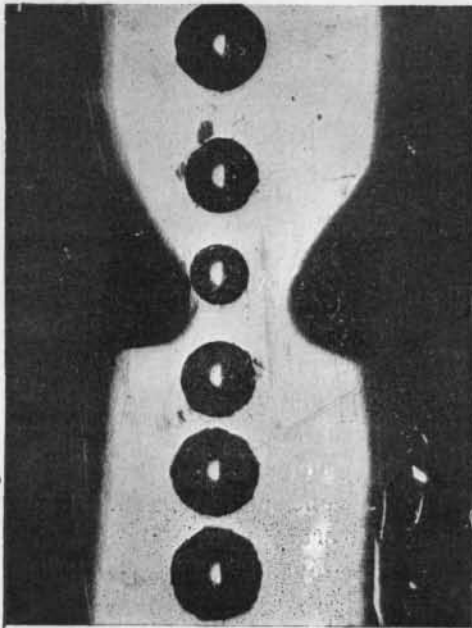


Fig. 46.
Accroissement de dureté par écouissage.



Fig. 47.
Clivages accompagnant l'écrouissage du fer doux.

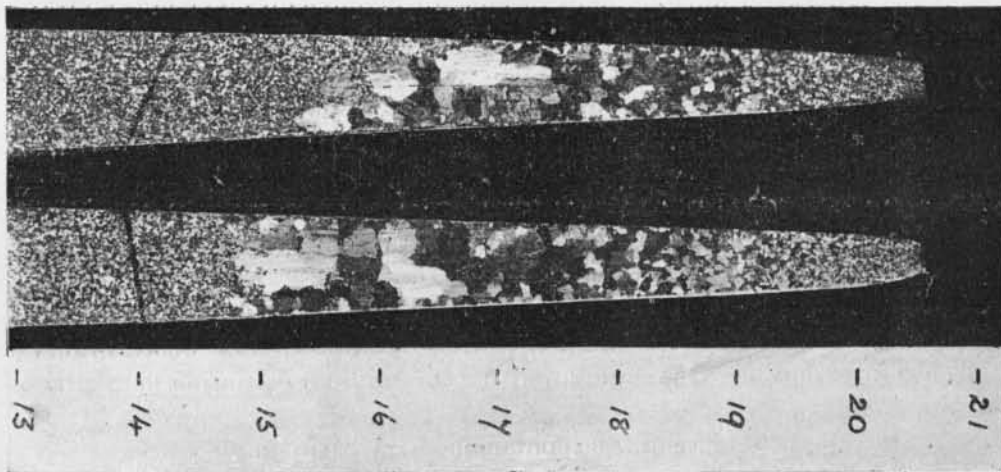


Fig. 48.
Cristallisation par recuit de l'acier écoui (Chappell).

J. Stead a signalé depuis longtemps la fragilité accidentelle de certaines feuilles de tôle mince laminées à basse température et destinées à la fabrication du fer blanc. Cette fragilité se rattache directement à une recristallisation à gros grain des tôles de mauvaise qualité. Mais quelle est la cause de cette recristallisation ? Les études métallographiques de MM. Charpy, Sauveur et Chappell l'ont très nettement mis en évidence. La formation du gros grain dépend de deux conditions suivantes :

- 1° Écrouissage modéré par déformation à basse température ;
- 2° Recuit à une température rigoureusement déterminée comprise entre 550° et 650°.

M. Chappell en a donné une démonstration particulièrement frappante en prenant une éprouvette rompue par traction, la sciant suivant son axe et la recuisant 2 heures à 600°. On voit les gros grains cristallins localisés vers le début de la striction, là où la déformation a été relativement faible (fig. 48).

Voici un autre exemple non moins intéressant au point de vue pratique, mais encore incomplètement étudié. Les objets de campement militaire en aluminium dur, c'est-à-dire allié à 3 % de cuivre s'altèrent spontanément d'une façon irrégulière et parfois avec une rapidité déconcertante. Ils tombent en poussière (fig. 51), mais contrairement à toutes les prévisions, l'analyse chimique indique une très faible oxydation, il se forme surtout de la poudre métallique.

L'examen métallographique m'a conduit au résultat suivant : le métal brut de fusion est constitué par une solution solide (fig. 49), aluminium-cuivre. L'attaque électrolytique en solution de chlorure de sodium ; montre des cellules qui s'attaquent progressivement en commençant par la partie centrale moins riche en cuivre. Après laminage et emboutissage à froid, la structure cellulaire disparaît complètement et l'attaque électrolytique donne des taches irrégulières, sans contours définis (fig. 50). Si l'on fait maintenant une coupe en travers d'un objet altéré, au voisinage d'un trou, on observe avant toute attaque un réseau de fissures dessinant dans le métal des cellules polygonales très nettes. Comment s'est produite cette désagrégation ? Si l'on examine des parties saines d'un objet altéré ou d'un objet resté inaltéré, mais ayant été mis également en service, on ne voit rien par simple polissage mais l'attaque électrolytique fait paraître un réseau polygonal identique à celui des régions fissurées (fig. 52). De plus, en employant un courant énergétique pour l'attaque électrolytique on provoque le décollement des cellules polygonales qui viennent flotter dans le liquide. On refait artificiellement de la poussière métallique semblable à celle de l'altération spontanée. Ces observations prouvent l'intervention dans l'altération de l'aluminium écroui de deux phénomènes distincts.

1° Le métal écroui recristallise spontanément, soit par simple conservation en magasin, soit plus vraisemblablement par l'action combinée de l'hydrogénation résultant à la fois de la décomposition de l'eau et de la chaleur employée à la cuisson des aliments. Mais il n'a pas encore été possible de définir les condi-

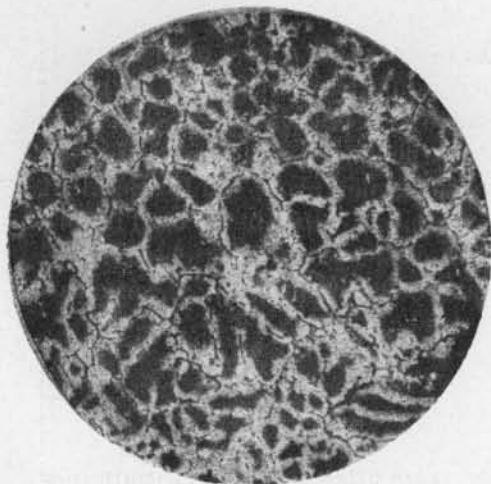


Fig. 49.
Aluminium à 3 0/0 de cuivre brut de coulée.

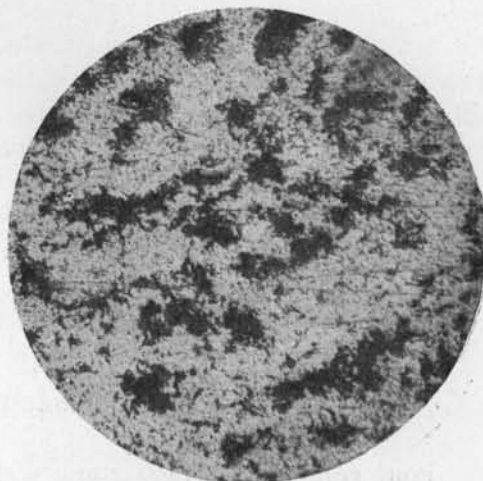


Fig. 50.
Même métal écroui.

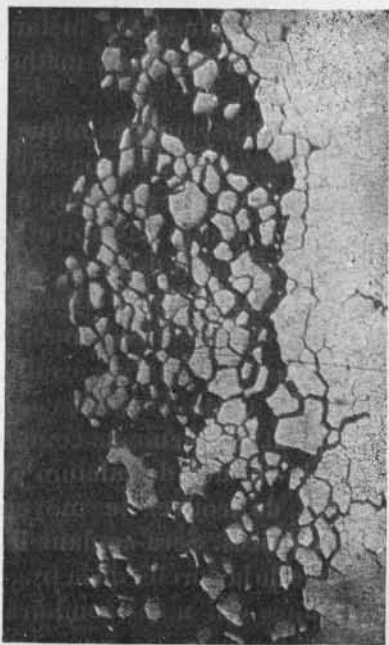


Fig. 51.
Même métal altéré à l'usage.

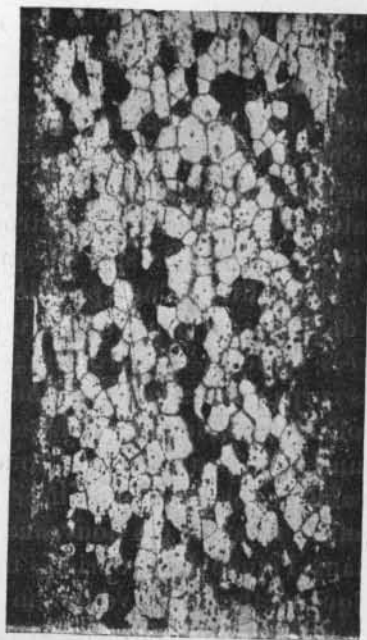


Fig. 52.
Même métal en voie d'altération dont la structure cellulaire est révélée par une attaque électrolytique.

tions exactes de cette recristallisation et de la reproduire à volonté au laboratoire.

2° La désagrégation du métal résulte de l'oxydation d'une matière accumulée dans les joints des cellules polygonales. Son altération décolle les petits polyèdres métalliques et donne ainsi naissance à la poussière grise observée sur les parties altérées. Mais on ne connaît pas la nature de l'impureté accumulée ainsi dans les joints. Est-ce de l'hydrogène, de l'azote qui formeraient avec l'aluminium ou avec le cuivre des composés altérables, on l'ignore encore complètement. Il est permis cependant d'espérer qu'un problème délimité d'une façon aussi précise, grâce à l'emploi de la métallographie, sera prochainement élucidé d'une façon complète.

Conclusions.

Pour conclure, permettez-moi d'appeler votre attention sur l'avenir que j'entrevois aujourd'hui aux études sur les alliages. L'analyse chimique, la première, nous a donné des lumières très utiles et a été comme je vous l'ai rappelé, le point de départ de la grande métallurgie moderne. La métallographie microscopique a continué dans la même voie en précisant les conditions de variation des propriétés de chaque alliage : elle nous a permis de régulariser ainsi un grand nombre de fabrications. Mais ces deux sciences ne suffisent pas encore à elles seules pour résoudre tous les problèmes que pose l'étude des métaux et des alliages ; plusieurs facteurs élémentaires échappent à ces deux méthodes d'observations.

Nous admettons généralement la détermination thermodynamique des corps ; c'est-à-dire, nous supposons qu'un corps de composition et constitution chimique données, de forme et de structure définies, pris à une pression, à une température et à une force électromotrice données, a toutes ses autres propriétés et en particulier son énergie interne rigoureusement déterminées. Ce n'est là, en réalité, qu'une première approximation, car on peut ajouter ou retirer de l'énergie à un corps tout en laissant invariables les conditions énumérées ci-dessus. L'érouissage, la phosphorescence, l'énergie capillaire dans les corps poreux et les colloïdes en donnent des exemples bien connus. Très probablement, la plupart des corps radioactifs sont des éléments communs additionnés d'un peu d'énergie, tout comme l'est le sulfure de calcium phosphorescent. Le progrès à réaliser aujourd'hui est de trouver le moyen de définir et de mesurer ces nouveaux facteurs élémentaires. Sera-ce dans le cas des métaux, l'étude des propriétés magnétiques, celle de la dureté, de la fragilité ou quelque méthode nouvelle non encore soupçonnée qui nous conduira au but, l'avenir le dira. Mais en regardant les progrès déjà accomplis, nous devons avoir foi dans l'avenir et garder l'assurance que les solutions définitives seront un jour où l'autre découvertes.

LA REVUE DE MÉTALLURGIE

Directeurs : MM. HENRY LE CHATELIER et L. GUILLET

La « Revue de Métallurgie » paraît mensuellement et comprend trois fascicules distincts ayant chacun leur pagination spéciale :

MEMOIRES,
EXTRAITS,
BREVETS, VARIETES ET ANNONCES.

Les deux premières parties, exclusivement techniques, forment chacune un volume de sept cents pages par an. Le nombre des pages consacrées dans chaque numéro aux Mémoires et aux Extraits est sensiblement le même, mais en raison de la différence des caractères, l'importance des Extraits est environ le double de celle des Mémoires.

MÉMOIRES. — La première partie de la Revue publie des mémoires de science industrielle, des articles d'un caractère exclusivement technique et enfin des traductions *in extenso* d'un certain nombre d'articles de revues étrangères donnant la description de nouveaux appareils ou de nouveaux procédés de fabrication.

EXTRAITS. — La deuxième partie de la Revue, consacrée aux extraits, a pour objet de donner un résumé aussi fidèle que possible de toutes les publications françaises et étrangères relatives à la métallurgie. Dans chaque cas, le résumé vise à faire connaître l'objet précis et l'importance du mémoire original dépouillé. Pour les mémoires d'une importance plus grande, les principaux résultats sont reproduits en détail. En vue de faciliter les recherches, ces extraits sont répartis en dix-huit chapitres dont les titres suivent :

ÉTUDES SCIENTIFIQUES

PROCÉDÉS DE MESURE. — (Analyse chimique, pyrométrie, essais mécaniques, etc.)

MATÉRIAUX ET PROCÉDÉS DE FABRICATION. — (Alliages, traitement thermique et méc. prop. dit. Études théoriques.)

MATIÈRES PREMIÈRES

MINÉRAIS. — (Extraction, préparation et divers.)

COMBUSTIBLES ET CHAUFFAGE. — (Gisement, préparation, emploi au chauffage.)

PRODUITS RÉFRACTAIRES, FOURS ET DIVERS.

FABRICATION

OUTILLAGE GÉNÉRAL DES USINES. — (Machines motrices, manutention, éclairage.)

FER ET SES ALLIAGES. — (Fonte, acier, outillage.)

AUTRES MÉTAUX ET ALLIAGES. — (Cuivre, plomb, zinc, argent, or, etc.)

LAITIERS ET CEMENTS.

DESCRIPTIONS D'USINES ET DIVERS.

EMPLOI DES MÉTAUX

FONDERIE ET TRAITEMENT THERMIQUE. — (2^e fusion, trempe, etc.)

TRAVAIL MÉCANIQUE ET OUTILS.

USAGES, CAHIERS DES CHARGES ET DIVERS. — (Construction mécanique, chemins de fer.)

QUESTIONS ÉCONOMIQUES ET DIVERS

ORGANISATION DU TRAVAIL ET COMMERCE.

STATISTIQUES.

NOUVELLES SCIENTIFIQUES.

INDUSTRIES DIVERSES.

ANALYSE DE BREVETS.

CORRESPONDANCE, BIBLIOGRAPHIE ET DIVERS.

Prix de l'abonnement de 1 an : France, 36 fr. ; Etranger, 40 fr.

Prix du numéro : 4 fr. 50.

Angers. — Imp. A. Burdin et C^o, rue Garnier, 4.