



*Section de l'Ingénieur*

---

L. GAGES

---

LES  
**ALLIAGES MÉTALLIQUES**

GAUTHIER-VILLARS  
MASSON & C<sup>IE</sup>







ENCYCLOPÉDIE SCIENTIFIQUE

DES

AIDE-MÉMOIRE

PUBLIÉE

8 LA DIRECTION DE M. LÉAUTÉ, MEMBRE DE L'INSTITUT

L. GAGES — Les Alliages métalliques

1

*Ce volume est une publication de l'Encyclopédie  
scientifique des Aide-Mémoire ; L. ISLER, Secrétaire  
général, 20, boulevard de Courcelles, Paris.*

N° 310 A

# ENCYCLOPÉDIE SCIENTIFIQUE DES AIDE-MÉMOIRE

PUBLIÉE SOUS LA DIRECTION

DE M. LÉAUTÉ, MEMBRE DE L'INSTITUT.

---

LES

# ALLIAGES MÉTALLIQUES

PAR

L. GAGES

Chef d'Escadron d'Artillerie

---

PARIS

GAUTHIER-VILLARS

IMPRIMEUR-ÉDITEUR

Quai des Grands-Augustins, 55

MASSON et C<sup>ie</sup>, ÉDITEURS,

LIBRAIRE DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE

Boulevard Saint-Germain, 120

(Tous droits réservés)

*OUVRAGES DE L'AUTEUR PARUS  
DANS LA COLLECTION DE L'ENCYCLOPÉDIE*

---

- I. Travail des métaux dérivés du fer.**
- II. Élaboration des métaux dérivés du fer.  
Foyers métallurgiques.**
- III. Élaboration des métaux dérivés du fer.  
Réactions métallurgiques.**
- IV. Les alliages métalliques.**



# ALLIAGES MÉTALLIQUES

---

Ce volume, consacré à l'étude des *alliages métalliques*, comprendra deux titres :

TITRE I. — *Métallurgie des alliages et propriétés principales.*

TITRE II. — *Théorie des alliages.*

---



# TITRE PREMIER

---

## MÉTALLURGIE DES ALLIAGES ET PROPRIÉTÉS PRINCIPALES

D'une manière générale, les *alliages* sont des dissolutions de deux ou plusieurs métaux ou de métalloïdes dans des métaux. Dans ce dernier cas, la dénomination d'alliage ne saurait être conservée que si les métaux mixtes, ainsi constitués, n'ont pas cessé d'avoir les propriétés métalliques générales connues, telles que l'éclat, le pouvoir conducteur calorifique ou électrique, etc.

Cette définition sera provisoire, elle ne pourra être complétée, à l'aide des données récemment acquises sur cet important sujet, qu'au titre II dans lequel la théorie des alliages recevra tous les développements nécessaires.

Le présent titre a pour objet d'indiquer sommairement les principes servant de base à la métallurgie des alliages en faisant connaître, pour les plus importants, leurs propriétés principales.

Il y a lieu de remarquer tout d'abord qu'il ne saurait être question d'étudier la fabrication ou les propriétés de tous les alliages actuellement connus. En dehors de l'impossibilité matérielle de traiter un sujet aussi vaste dans le cadre de ce volume, on doit considérer que l'intérêt de la présente étude consistera surtout à mettre en évidence les propriétés générales des principales classes de ces métaux en les rattachant, autant que possible, à une théorie rationnelle.

Dans cet ordre d'idées, il convient de ne pas attacher une importance trop grande aux classifications, peu détaillées d'ailleurs, qui ont été adoptées. Le but poursuivi, en les choisissant, a été principalement de donner toute la clarté désirable à une étude fort complexe.

---

## CHAPITRE PREMIER

---

### LES ALLIAGES FERRO-MÉTALLIQUES

Les alliages *ferro-métalliques* ne se sont introduits que depuis une trentaine d'années environ dans la pratique industrielle ; c'est en *sidérurgie* surtout qu'ils ont rendu les plus précieux services, c'est-à-dire depuis l'apparition des procédés vraiment modernes de fabrication en grandes masses de l'acier fondu.

Les plus importants de ces alliages sont les suivants :

- Le *ferro-manganèse* ;
- Le *ferro-silicium* ;
- Le *ferro-manganèse-silicium* ou *silico-spiegel* ;
- Le *ferro-chrome* ;
- Le *ferro-nickel* ;
- Le *ferro-tungstène* ;
- Le *ferro-aluminium*.

Chacune de ces dénominations sert à désigner d'une manière générale un des alliages auxquels le *manganèse*, le *silicium*, le *chrome*, etc., donnent des propriétés spéciales, mais il convient de remarquer combien sont nombreux les alliages compris dans l'une ou l'autre de ces catégories.

Aussi y a-t-il lieu, pour les distinguer, de faire suivre du pourcentage en chacun des éléments spéciaux incorporés, la désignation de ces alliages ; ainsi on dira, par exemple :

*Ferro-manganèse* à 30 % (de manganèse) ;

*Ferro-chrome* à 15 % (de chrome).

En outre, comme on sait que ces alliages ne sont, en somme, que des fontes dans lesquelles prédominent le *manganèse*, le *silicium*, le *chrome*, etc., il n'est pas inutile d'ajouter que, même en indiquant le pourcentage en chacun de ces éléments pour un *ferro-manganèse*, un *ferro-silicium*, etc., donnés, il resterait encore, pour être plus précis, à spécifier les teneurs des autres corps étrangers contenus dans la fonte de fer qui les tient en dissolution.

## I. PRINCIPES GÉNÉRAUX DE L'ÉLABORATION DES ALLIAGES FERRO-MÉTALLIQUES

La plupart des alliages ferro-métalliques s'élaborent au haut-fourneau ; il en résulte, qu'aux particularités près qui seront indiquées plus loin, les principes de leur fabrication seront ceux qui servent de base à celle des fontes élaborées dans cet appareil métallurgique.

Le lecteur n'aura donc qu'à se reporter aux indications données à ce sujet dans le volume de l'Encyclopédie des Aide-Mémoire, la *Fabrication de la fonte* de M. E. de Billy.

Les alliages ferro-métalliques, tels que les *ferro-manganèse*, les *ferro-silicium*, les *ferro-manganèse-silicium*, les *ferro-chrome* et les *ferro-tungstène* se fabriquent couramment au haut-fourneau ; les *ferro-nickel* ne sont obtenus à l'aide de cet appareil qu'exceptionnellement.

**1. Particularités de la fabrication au haut-fourneau.** — Il est clair qu'il faudra constituer tout d'abord un lit de fusion riche en minerai, contenant l'élément à introduire en forte proportion dans l'alliage à élaborer.

En dehors du minerai de fer principal, ce lit

de fusion contiendra, suivant le cas, du minerai de manganèse, du minerai de chrome (*fer chromé des minéralogistes*) ou de la silice libre (pour le ferro-silicium), du wolfram (pour le ferro-tungstène), etc. Cela étant, il conviendra d'associer à ces minerais les fondants utiles, c'est-à-dire ceux qui, tout en faisant passer au laitier les gangues des minerais, n'éliminent pas, de ce fait, une partie des composés contenant l'élément dont on cherche l'incorporation dans le produit final.

Il sera, par suite, nécessaire d'étudier la composition chimique que devront avoir les laitiers dans ce but et de régler, en conséquence, l'allure du haut-fourneau.

a) *Ferro-manganèse*. — C'est ainsi que, pour obtenir un *ferro-manganèse*, il est indispensable de rechercher les minerais les moins siliceux et de réaliser des laitiers ultra-basiques, c'est-à-dire très calcaires. En opérant ainsi, on évitera la formation de silicate de manganèse qui entraînerait une perte de manganèse et on facilitera l'élimination de la silice qui existe toujours dans le lit de fusion, par la formation d'un silicate de chaux passant au laitier. En outre, il sera nécessaire d'augmenter, dans une très forte proportion, la quantité de combustible (coke)



chargé dans le haut-fourneau, en raison de la difficulté de réduction de l'oxyde de manganèse  $MnO$  qui, à la suite des diverses réactions effectuées dans cet appareil, finit par être le seul véhicule du manganèse à incorporer.

Ainsi, les conditions d'obtention du ferro-manganèse au haut-fourneau se résument très simplement comme il suit :

*Emploi des minerais les moins siliceux ;*

*Réalisation de laitiers ultra-basiques ;*

*Production d'une haute température.*

b) *Ferro-silicium.* — Avec un lit de fusion convenable, tous les minerais de fer peuvent servir à la fabrication du *ferro-silicium*, sous la réserve de réaliser des laitiers alumineux, puisque l'alumine, base très faible, ne retient pas énergiquement la silice et s'oppose moins que la chaux à la réduction du silicium.

Les minerais trop calcaires devront être éliminés car l'excès de chaux retiendrait trop aisément la silice dans le laitier et empêcherait la réduction.

Les laitiers alumineux formés ayant peu de fluidité, cette fabrication exigera, comme celle du ferro-manganèse, une allure chaude, c'est-à-dire une marche avec excès de combustible.

c) *Ferro manganèse-silicium*.—La fabrication du *ferro-manganèse-silicium* ou *silico-spiegel* présente de grandes difficultés, car il faut incorporer dans l'alliage final le silicium et le manganèse en forte proportion ; or, on connaît l'affinité de la silice pour le protoxyde de manganèse. Il y a donc tout lieu de croire *a priori* qu'une pareille tentative ne conduise qu'à une marche en laitier de silicate de manganèse.

Pour avoir du manganèse en proportion notable dans la fonte, on sait, d'une part, que le minerai doit contenir un minimum de silice et que le fondant employé doit néanmoins contenir une quantité importante de chaux. Pour avoir, d'autre part, du silicium en proportion notable dans la fonte, on sait qu'il ne faut pas un excès de chaux dans le lit de fusion.

Ces conditions sont donc contradictoires et l'on trouve seulement une seule condition qui soit commune aux deux fabrications séparées du ferro-manganèse et du ferro-silicium, c'est celle de la réalisation d'une allure extra-chaude,

On arrive néanmoins à obtenir le ferro-manganèse-silicium en consentant à de grandes pertes en manganèse, en forçant la proportion de ce métal dans le lit de fusion et en prenant des conditions moyennes entre les conditions

imposées dans les fabrications séparées du ferromanganèse et du ferro-silicium.

La fabrication du silico-spiegel exigera donc, en résumé, une *allure très chaude* et des *laitiers moyennement basiques*.

d) *Ferro-chrome*. — Le *ferro-chrome* se fabrique au cubilot et au haut-fourneau.

Le minerai de chrome étant très réfractaire, il est nécessaire, comme dans les fabrications précédentes, de réaliser une très haute température.

e) *Ferro-nickel*. — Les premières tentatives de l'élaboration du ferro-nickel au haut-fourneau eurent lieu lors de la découverte des gisements abondants d'hydrosilicate de nickel en Nouvelle-Calédonie.

Les résultats obtenus par ce procédé furent peu satisfaisants et firent abandonner la méthode; il convient d'ajouter toutefois que des réserves doivent être faites à ce sujet et qu'il serait téméraire d'affirmer qu'il y a lieu de renoncer à employer le haut-fourneau pour allier le nickel au fer.

En assimilant le nickel au fer, dans son traitement au haut-fourneau, on formait un alliage

de fer et de nickel ayant la composition moyenne suivante :

Carbone . . . . .	1,5 à 2	
Silicium . . . . .	2	3
Soufre. . . . .	0,5	0,75
Fer. . . . .	20	25
Nickel. . . . .	70	75

Les scories ou laitiers obtenus n'étant pas assez calcaires, le soufre du coke et le silicium des gangues passaient en grande partie dans le métal. L'affinage qu'il était nécessaire d'effectuer ensuite, sans éliminer le soufre, introduisait de l'oxyde de nickel. Dès lors, de nouveaux traitements métallurgiques s'imposaient pour réduire l'oxyde ainsi formé sans qu'on pût obtenir un nickel suffisamment malléable, car, tout comme le fer, le nickel jouit de la propriété de dissoudre une quantité notable d'oxyde.

*f) Ferro-tungstène.* — Le ferro-tungstène peut également s'élaborer au haut-fourneau par l'addition au lit de fusion de minerais appropriés ; mais, le plus souvent, on incorpore directement le tungstène dans la métallurgie des alliages en ajoutant, dans les creusets de fusion, un minerai fort riche en tungstène (le wolfram), exploité, en France, aux environs de Limoges.

**2. Fabrication des alliages ferro-métalliques au creuset.** — Les alliages ferro-métalliques qui viennent d'être étudiés peuvent être obtenus au creuset, soit parce qu'on ne cherche pas à les produire économiquement et en grande masse, soit qu'on se propose de les élaborer à un état de pureté plus satisfaisant.

Le premier *ferro-manganèse* réalisé fut obtenu au creuset par Henry Bessemer, alors qu'il cherchait à perfectionner le procédé d'élaboration de l'acier fondu dans sa cornue rotative. Le creuset, porté à haute température, contenait un mélange intime de grenailles de fonte, d'oxyde de manganèse, de verre pilé et de charbon de bois en poudre.

Presque toujours aujourd'hui, les *ferro-manganèse*, *ferro-silicium* et *silico-spiegel* sont fabriqués au haut-fourneau dans les pays métallurgiques où le combustible minéral est d'un prix de revient moins élevé que dans notre pays.

Ainsi, presque toute la fabrication du *ferro-silicium* s'est concentrée en Angleterre.

Les aciéries au creuset fabriquent le plus généralement les alliages ferro-métalliques qui leur sont nécessaires pour les aciers spéciaux (*aciers chromés* et *au tungstène*) dans les creusets utilisés pour la fusion de l'acier ; elles

emploient, dans certains cas, au lieu des creusets en terre réfractaire, des creusets de graphite et, pour quelques alliages exceptionnellement riches en chrome, des creusets en magnésie.

Pour préparer les *ferro-chrome*, on réduit le minerai de chrome dans les creusets très réfractaires dont il vient d'être question en le mélangeant d'abord avec du charbon de bois réducteur et des fondants appropriés à la nature de la gangue.

Le tungstate double de manganèse et de fer (wolfram) étant très-riche en tungstène (72 %), on ne fabrique pas ordinairement du *ferro-tungstène*. Ce minerai est directement ajouté dans les creusets à acier pour y introduire la quantité voulue de tungstène ; la petite quantité de gangue qui l'accompagne passe au laitier qui surnage à la partie supérieure du creuset.

Le *ferro-aluminium* n'est jamais préparé au haut-fourneau pour des raisons sur lesquelles il n'y a pas lieu d'insister et qui toutes se rapportent à la difficulté de réduction de l'alumine. La fabrication de cet alliage se fait, *directement*, dans des fours électriques appropriés dont la description ne ressortit pas à notre sujet ou, *indirectement*, en partant de l'aluminium pré

paré, d'autre part, et qu'on fait dissoudre dans un bain de fonte ou d'acier. D'ailleurs, et cette remarque s'applique aussi bien au *ferro-nickel*, le ferro-aluminium est de plus en plus rarement employé dans l'industrie des alliages métalliques.

C'est au *nickel* et à l'*aluminium*, préparés par leur métallurgie spéciale, qu'on a recours quand on veut incorporer ces éléments dans un bain métallique ou y provoquer une réaction utile.

## II. PROPRIÉTÉS ET EMPLOIS DES ALLIAGES FERRO-MÉTALLIQUES

Les alliages ferro-métalliques remplissent le plus souvent un double rôle dans les opérations métallurgiques en servant à incorporer l'élément spécial qu'ils contiennent ou en provoquant, à l'aide de cet élément, une réaction utile ou nécessaire dans les procédés d'élaboration.

**1. Ferro-manganèse.** — Les alliages de fer et de manganèse compris sous la dénomination générale de *ferro-manganèse* se divisent en deux classes qui sont les suivantes :

a) Les *spiegeleisen* ou simplement *spiegels* sont les alliages manganésés dans lesquels la teneur en manganèse est égale ou inférieure à 20 %.

Ce sont des fontes blanches, très fragiles, d'un aspect spécial, à grandes facettes ou lamelles brillantes plus ou moins irisées, suivant que leur refroidissement après la coulée a eu lieu dans l'air sec ou dans l'air humide.

b) Les *ferro-manganèse* proprement dits comprennent les alliages manganésés dans lesquels la teneur en manganèse varie de 20 à 80 % et plus.

On obtient difficilement au haut-fourneau du ferro-manganèse au dessus de 85 %. Il y a peu d'intérêt, d'ailleurs, à s'élever au delà, car alors l'oxydabilité du métal rend difficile sa conservation à l'air humide. On se trouve bien, pour ces hautes teneurs, 80 et plus, d'une aspersion de pétrole qui rappelle l'huile de naphte employée pour conserver les métaux très oxydables comme le potassium et le sodium.

Le ferro-manganèse présente une cassure de moins en moins spéculaire à partir de la teneur de 20 % et au fur et à mesure que la teneur en manganèse augmente.

De lamelleuse, la structure devient bacillaire



et cylindroïde et, tandis que les spiegels cristallisent dans le système d'un prisme de  $112^{\circ},33'$ , les ferro-manganèses proprement dits prennent franchement, pour une teneur de 50 % de manganèse et au dessus, le système du prisme rhombique voisin de  $120^{\circ}$ .

Le lecteur trouvera, dans le volume de l'Encyclopédie intitulé : *Élaboration des métaux ferreux. Réactions métallurgiques* (L. GAGES), tous les détails relatifs à l'emploi des ferro-manganèse dans la métallurgie de l'acier.

Le ferro-manganèse joue un rôle chimique dans l'élaboration des aciers fondus, en désoxydant et en recarburant le bain métallique. Si le ferro-manganèse est pauvre en manganèse, l'acier élaboré sera d'une certaine dureté ; il sera plus ou moins doux suivant qu'il sera plus riche en manganèse.

En outre, le ferro-manganèse sert de véhicule au manganèse lorsqu'on se propose seulement d'incorporer cet élément à l'acier sans chercher à provoquer une réaction utile. C'est là, la base de la fabrication des aciers dits *manganésés*.

Enfin, par une extension toute naturelle, on conçoit aisément que le ferro-manganèse servira aussi de véhicule au manganèse pour l'incorporation de cet élément aux alliages autres que les

alliages ferro-métalliques. On verra ultérieurement, en effet, que le manganèse est introduit avec les éléments qui constituent les *bronzes de manganèse*, et, en général, avec le cuivre, le nickel, le zinc, ou l'étain.

**2. Ferro-silicium.** — La texture des *ferro-silicium* ressemble beaucoup à celle des fontes grises chargées de graphite ; leur couleur, de même.

Le déplacement du carbone dissous dans la fonte et sa précipitation à l'état de graphite sous l'influence d'une teneur égale ou supérieure à 1 % est un fait connu dont la confirmation est donnée par de nombreuses expériences et, notamment, par celles effectuées, en 1885, par le professeur anglais Thomas Turner.

Nous ne saurions examiner en détail le rôle du *ferro-silicium* dans la métallurgie de l'acier, nous indiquerons simplement qu'il a été le premier réactif employé pour obtenir des moulages d'acier exempts de soufflures et que c'est aux Aciéries de Terrenoire (Loire), aujourd'hui disparues, que revient l'honneur de cette importante découverte.

L'emploi du *ferro-manganèse-silicium* au lieu du *ferro-silicium* provient de ce qu'on ne tarda pas à reconnaître, dans les aciéries à mou-

lages, que l'emploi simultané du *ferro-manganèse* et du *ferro-silicium* donnait des résultats bien supérieurs à ceux qu'on obtenait par l'emploi exclusif du *ferro-silicium*. L'acier produit était moins dur et plus ductile, mais il était néanmoins encore trop carburé et présentait, par suite, une partie des inconvénients qu'apporte une teneur assez forte en carbone.

On fut donc conduit naturellement à chercher une fonte contenant à la fois le manganèse destiné à réduire l'oxyde de fer formé pendant l'élaboration de l'acier et le silicium pour calmer l'effervescence gazeuse occasionnant les soufflures, tout en introduisant moins de carbone dans le bain métallique que celui qui résultait de l'addition d'un mélange de *ferro-silicium* et de *ferro-manganèse*.

L'emploi du *ferro-manganèse-silicium*, pour remplir ce double office, fut une innovation des plus heureuses dans l'industrie des moulages d'acier.

Il ne semble pas que, comme le *ferro-manganèse*, les *ferro-silicium* et les *ferro-manganèse-silicium* soient utilisés comme véhicules du silicium pour l'incorporation de cet élément aux alliages autres que les alliages ferro-métalliques. C'est surtout au *spath fluor*, à certaines terres

*siliceuses*, etc., qu'on a recours pour réaliser l'incorporation dont il s'agit.

**3. Ferro-chrome.** — Les *ferro-chrome* peuvent se combiner avec des proportions considérables de carbone, plus élevées que celles qu'on rencontre dans les ferro-manganèse.

L'aspect à la cassure des ferro-chrome varie bien plus avec la teneur en carbone et en silicium qu'avec leur teneur en chrome. Aussi, est-il fort difficile d'apprécier à la vue la teneur en chrome d'un ferro-chrome saturé de carbone ou de carbone et de silicium.

Quand ils sont fortement chargés en carbone ou en carbone et silicium, ils ont toujours une tendance à avoir une structure aiguillée et sont toujours durs et fragiles; mais à mesure que la teneur de ces deux métalloïdes diminue, la dureté et la fragilité de l'alliage diminuent aussi.

Quand les ferro-chrome sont pauvres en chrome et saturés de carbone, la cristallisation particulière du spiegel, mais d'un spiegel à facettes un peu striées, apparaît très développée.

L'emploi des ferro-chrome, dans la métallurgie de l'acier, consiste exclusivement à incorporer le chrome dans les aciers, ce qui leur donne des propriétés très précieuses; soit que

ces aciers soient simplement carburés, soit qu'ils contiennent du nickel.

Il convient de signaler incidemment l'emploi des *silico-ferro-chrome*, obtenus le plus généralement au creuset, et qui servent à introduire dans un acier, concurremment avec le chrome, une certaine quantité de silicium.

Le point de fusion élevé de ces alliages ferrométalliques chromés a été, sans doute, le principal obstacle à leur utilisation pour incorporer à des alliages autres que les alliages ferrométalliques le chrome ou le silicium et le chrome qu'ils contiennent.

**4. Ferro-nickel, ferro-aluminium, etc.** — Nous avons dit que la métallurgie de l'acier utilisait de préférence le *nickel* et l'*aluminium* au lieu de leurs alliages. Ces métaux ont des rôles bien différents.

Le *nickel*, incorporé aux aciers, depuis les teneurs les plus faibles jusqu'à 15, 20 et même 25 %, modifie, en les améliorant, dans une mesure qui ne saurait être appréciée dans le cadre de ce volume, les caractéristiques de ces métaux aux différents efforts, à savoir : la *limite élastique*, la *résistance à la rupture* et l'*allongement p.* %.

L'*aluminium* remplit surtout le rôle de réac-

tif en désoxydant le bain d'acier et, comme le silicium, élimine les soufflures. Dans les fontes, l'aluminium paraît agir, en vertu de sa présence propre, indépendamment de toute réaction chimique. Les fontes alumineuses sont plus résistantes à la flexion et au choc, elles sont aussi plus douces et se travaillent mieux que les fontes ordinaires.

Enfin, l'aluminium paraît amoindrir la faculté qu'ont les fontes de tremper en coquille ; il n'y a pas durcissement au contact du moule métallique, mais précipitation subite et abondante de graphite.

Dans la métallurgie des alliages autres que les alliages ferro-métalliques, le *nickel* est ajouté directement ou à l'aide d'un alliage fabriqué, d'autre part, par une incorporation directe antérieure de cet élément.

L'*aluminium* est presque toujours introduit indirectement à l'aide d'une réaction chimique ou électrolytique le mettant en liberté ; les composés traités sont le plus souvent le *fluorure double de sodium et d'aluminium*, le *chlorure d'aluminium*, ou l'alliage *silicium-aluminium*, etc.

---

## CHAPITRE II

### BRONZES ET LAITONS

Nous examinerons successivement les *bronzes* et les *laitons* ; ce sont des alliages connus depuis fort longtemps et les plus importants en raison de leurs emplois si variés.

Dans les *bronzes* et dans les *laitons*, le *cuivre* est l'élément dominant ; en constituant ces alliages, on a pour objet d'agir sur la *fusibilité* et la *dureté* de ce métal.

Les métaux qu'on allie dans ce but avec le cuivre sont l'*étain* ou le *zinc* ou les deux à la fois.

Mais il convient d'ajouter que si, d'une manière générale, l'alliage *cuivre-étain* constitue le *bronze*, et l'alliage *cuivre-zinc*, le *laiton* ; en réalité, on donne aussi les noms de *bronzes* et de *laitons* à des alliages dont la composition n'est point aussi exclusive.

Afin de ne pas obscurcir dès l'origine cette

question fort complexe, nous procéderons tout d'abord du simple au composé ; c'est pour ce motif que nous n'entreprendrons pas pour le moment l'étude de l'action exercée sur les propriétés du cuivre quand, concurremment avec les métaux susvisés, on lui associe d'autres métaux ou métalloïdes.

Avant de traiter la question des *bronzes* et des *laitons* proprement dits, il est nécessaire d'examiner, à un point de vue général, comment l'étain et le zinc modifient les propriétés du cuivre lorsqu'on les allie séparément ou simultanément à ce métal.

## I. NOTIONS PRÉLIMINAIRES

**1. Alliages de cuivre et d'étain.** — Le *cuivre* et l'*étain* peuvent s'allier en toutes proportions : les alliages ainsi formés sont plus ou moins *durs* et *cassants*.

Les considérations qui suivent ne s'appliquent qu'au *métal naturel*, comme il est d'ailleurs le plus généralement employé dans les usages industriels ; il sera nécessaire d'indiquer plus tard comment la *trempe* peut modifier à leur avantage les propriétés du métal naturel.



Le tableau établi ci-après (p. 30) indique comment varient, avec les différentes quantités d'étain associées au cuivre, les diverses propriétés de ces alliages.

En général, on peut retenir que la *dureté*, l'*élasticité*, la *fragilité* et la *sonorité* augmentent avec la teneur en étain, tant que cette teneur ne dépasse pas 35 à 40 %. Au delà, les alliages deviennent de plus en plus faciles à limer ; ils résistent de mieux en mieux à l'action d'un poinçon et acquièrent une grande *ténacité*.

**2. Alliages de cuivre et de zinc.** — Le *cuivre* et le *zinc* peuvent s'allier presque en toutes proportions.

Ces alliages, moins bons conducteurs de la chaleur et de l'électricité que le cuivre, sont jaunes, *très malléables* et *ductiles à froid*, mais *cassants à chaud*, même au dessous du *rouge*.

Il résulte de cette dernière propriété qu'il est nécessaire de les travailler à froid, comme le cuivre, et, si le travail est long, de l'interrompre par des recuits afin de corriger l'érouissage provenant d'une trop grande déformation.

Tous les alliages qui ne renferment pas moins de 30 % de cuivre peuvent cristalliser par refroidissement lent ; ceux qui contiennent de 42 à 60 % de ce métal ont une grande tendance à

TABLEAU A. — Alliages cuivre-étain

Composition	Couleur d'une surface polie	Nature de la cassure	Texture	Propriétés mécaniques	Emplois
Cu — Sn					
99/1	Rouge pâle	Grenue avec bulles	Violet clair	Métaux nerveux, peu malléables à froid mais malléables à chaud au rouge cerise.	De travail, Mounates, mécanique } bronzes mécaniques. } faciles.
95/5	Jaune rougeâtre	Grenue avec arrachements	Violet très clair		
90/10	Jaune pâle	Idem	Jaune terne	De plus en plus secs et de moins en moins faciles à limer.	Trop durs } Cloches, } et trop } tam-tams, } cassants } cymbales, } comme } miroirs té- } métaux } lescopiques } mécaniqs }
85/15	Idem	Idem	Idem		
80/20	Jaune clair	Lamelles presque sans grains, quelques arrachements.	Jaune gris	Très fragile, difficilement attaqué à la lime. Commence à se laisser limer. Le travail à la lime redvient facile. Reprennent de la ténacité; peuvent servir comme métaux à frottement et métaux blancs.	
75/25	Jaune pâle passant au blanc	Unie, sans grains ni arrachement	Gris terne		
65/35	Brillant d'un blanc gris	Moins unie, sans grains ni arrachements	Gris blanc	Le travail à la lime redvient facile. Reprennent de la ténacité; peuvent servir comme métaux à frottement et métaux blancs.	
50/50	Brillant d'un blanc terne	Surface creusée comme par empreinte	Idem		
Alliages intermédiaires	//	Lamelles	//		
10/90	Blanc terne	Sèche et granuleuse	Blanc gris		
1/99	Idem	Idem	Idem		

prendre une structure fibreuse qui disparaît d'ailleurs quand l'alliage devient de plus en plus riche en cuivre.

La *couleur* d'abord rouge, passe au jaune et devient blanche à mesure que la proportion de zinc augmente.

La *dureté* et la *fragilité* augmentent avec la teneur en zinc et l'alliage est très cassant et extrêmement fragile quand les corps composants sont en proportions à peu près égales.

Moins l'alliage renferme de zinc, plus il s'améliore, mais il devient alors peu économique.

Les alliages *cuivre-zinc* (tableau B, p. 32) deviennent d'autant plus difficiles à fabriquer qu'ils contiennent plus de zinc, car ce métal se volatilise en forte proportion.

### 3. Alliages de cuivre, de zinc et d'étain.

— Ces trois métaux peuvent être associés en toutes proportions, ou à peu près, donnant naissance à des alliages industriels que le commerce désigne sous les noms de *bronze* ou de *laiton* suivant qu'ils se rapprochent de l'un ou de l'autre des alliages *cuivre-étain* ou *cuivre-zinc*.

Comme dans les alliages de ces deux séries, les alliages *cuivre-étain-zinc* donnent des produits d'autant plus nerveux, malléables, colorés,

TABLEAU B. — Alliages cuivre-zinc

Composition	Couleur d'une surface polie	Nature de la cassure	Texture	Propriétés mécaniques	Emplois
Cu — Zn					
99/1	Rouge pâle	Arrachements, Rouge éclatant	Violet	Nerveux, tenaces, très malléables et très ductiles, mais peu élastiques.	
90/10	Jaune rouge	Grain fin, Jaune orange	Violet moins sombre	Moins durs, moins résistants, moins sonores et moins bons aux frottements que les alliages Cu + Sn à même teneur en cuivre.	Similor
80/20	Jaune foncé	Grain plus gros, Jaune d'or	Violet passant au gris terne		
75/25	Jaune d'or foncé	Grain fin, Jaune d'or	Violet clair marbré de jaune		
65/35	Jaune avec reflet vert	Lamelles convergentes, Jaune orange	Jaune vert clair	Alliages industriels.	Laitons ou cuivre jaune
50/50	Jaune rouge pâle	Facettes avec arrachement, Jaune d'or foncé	Jaune passant au gris terne		
40/60	Jaune passant au blanc	Unie, Blanc éclatant	Jaune terne et pâle	Mauvais alliages, cassants, secs et durs au marteau et à la lime.	Ces métaux, au moins pour les teneurs supérieures en zinc, reçoivent souvent le nom de bronzes et peuvent être considérés comme des intermédiaires entre les bronzes et les laitons, sous la réserve qu'ils contiennent de l'étain, ce qui est le cas à peu près général.
20/80	Blanc gris terne	Grenue, Gris blanc	Gris noir très sombre		
10/90	Idem	Grenue av. demi-facette et demi-grain	Gris terne moins noir	Un peu plus solide mais toujours cassant.	
5/95	Terne avec reflet gris	Lamelles brillantes, gris bleu	Gris plus terne	Se rapprochent du zinc, mais sont plus doux, plus nerveux et surtout moins coûteux.	
1/99	État moins vif que le zinc	Cassure du zinc, mais à fond plus noir	Moins brillante que celle du zinc		

faciles à limer et à tourner que le cuivre s'y trouve en plus grande quantité.

Les alliages passent au blanc, deviennent secs, durs, cassants quand la proportion du cuivre s'abaisse au-dessous des deux tiers de la totalité des teneurs des éléments composants. Les composés dans lesquels le cuivre entre pour la moitié deviennent extrêmement durs et cassants.

Les séries les plus utiles, dans les alliages ternaires, *cuivre-étain-zinc*, sont celles qui s'étendent entre les alliages où la teneur en cuivre ne s'abaisse pas au-dessous des deux tiers de la totalité des teneurs des éléments composants.

## II. BRONZES

On désigne sous le nom de *bronzes*, les alliages de *cuivre* et d'*étain* dans lesquels le premier de ces métaux domine et où l'on trouve aussi souvent d'autres métaux ou métalloïdes.

Quelquefois même, on donne le nom de *bronze*, mais rarement, il est vrai à des alliages de *cuivre* sans *étain*.

Le *bronze* a-t-il été connu avant le fer ?

Cette question, qui a été pendant longtemps tranchée par l'affirmative, ne paraît pas aujourd'hui aussi simple.

Il semble contestable que le bronze ait été connu avant le fer ; on a bien trouvé, il est vrai, des objets en bronze dans des dépôts anciens où les objets en fer semblent ne pas exister, mais il est très rationnel d'admettre que le fer, avec sa grande facilité d'oxydation dans la terre humide, a dû se transformer en une masse soluble dont les traces ont disparu.

D'autre part, avec des minerais de fer riches et un feu de charbon de bois, on peut aisément obtenir, par une fusion réductrice, un fer impur mais forgeable.

Pour élaborer le bronze, il faut fabriquer séparément, par un travail assez complexe le *cuivre* et l'*étain*, les fondre ensemble dans des creusets réfractaires et les couler dans des moules façonnés.

Dans ces dernières années, d'ailleurs, le nombre des découvertes d'objets anciens en fer s'est considérablement accru ; on a même trouvé des armes et des outils en fer mêlés à des objets et à des ustensiles de pierre, alors qu'on attribuait à ces derniers une antiquité supérieure à celle du bronze lui-même.

**1. Composition des bronzes.**— Il semble qu'il y ait lieu d'établir une première distinction entre les *bronzes antiques* et les *bronzes modernes*.

a) *Bronzes antiques*. — Les *bronzes antiques* contiennent, en général, une proportion plus ou moins grande d'étain ; mais il est vrai de dire aussi que certains bronzes de l'antiquité ont une composition présentant une grande analogie avec notre cuivre brut actuel. Il est plus que probable que les éléments étrangers tels que l'*arsenic*, le *plomb*, l'*antimoine*, le *fer*, etc., associés au cuivre n'étaient pas incorporés intentionnellement dans l'alliage et que leur présence était due à un mauvais affinage des matières premières dont se servaient les anciens.

A. Ledebur, le savant professeur à l'École des mines de Freiberg, donne, pour quelques bronzes antiques, les compositions indiquées dans le tableau de la p. 36.

Puis, au fur et à mesure que l'art du traitement des métaux se perfectionna, les anciens durent reconnaître que le cuivre acquiert ses qualités essentielles, et notamment la dureté, par l'adjonction d'une certaine quantité d'*étain*.

Et comme les anciens, ajoute Ledebur, ne distinguaient pas nettement le *plomb* de l'*étain* et ne considéraient ce dernier que comme une

## Bronzes antiques

Désignation des métaux	Cuivre	Étain	Arsenic	Plomb	Fer	Antimoine	Or
Bronze trouvé dans un palais à Ninive . . . .	88,0	0,18	0,60	3,30	4,10	3,90	"
Pointe de lance venant de Chypre . . . . .	97,20	traces	1,30	0,10	1,30	"	0,30
Lame d'un couteau égyptien . . . . .	97,1	0,24	2,30	"	0,40	"	traces

*Les Alliages métalliques.* — A. LEDEBUR.

modification allotropique du plomb, ils furent dès lors tentés de remplacer l'étain, dans leurs bronzes, par un métal plus commun et mieux à leur portée. C'est ainsi qu'on peut s'expliquer la composition de certains bronzes antiques, dans lesquels la teneur en plomb est si élevée qu'on ne saurait admettre que cet élément n'ait pas été intentionnellement dans ces métaux.

Nous donnons dans le tableau C (p. 38) et d'après



l'ouvrage précité, quelques compositions de bronzes antiques où l'on trouve le métal qui, par son association au cuivre, constitue le bronze proprement dit, c'est-à-dire l'étain et où l'on remarquera également la présence du plomb en quantités très notables, surtout dans les vieux bronzes grecs et dans ceux de l'époque romaine.

Il y a lieu de noter en outre que, dans ces derniers, on constate la présence du *zinc*.

b) *Bronzes modernes*. — Aujourd'hui, comme dans l'antiquité, le cuivre et l'étain, mais le cuivre toujours en quantité prépondérante, forment la base du bronze.

Il convient d'ajouter que les *bronzes modernes* ont des compositions extrêmement variables; presque tous contiennent, en plus de l'étain, du *zinc* en plus ou moins grande proportion.

L'introduction du zinc, qui est un désoxydant énergique, a pour objet d'épurer les matières fondues; on le remplace même depuis un assez grand nombre d'années, par des épurateurs encore plus actifs, tels que le *phosphore*, le *manganèse*, le *silicium*, etc.

**2. Étude des bronzes modernes.** — Nous diviserons les bronzes en trois grandes classes, savoir :

Les *bronzes d'art*.

TABLEAU C. — Bronzes antiques.

Désignation des métaux	Cuivre	Étain	Zinc	Plomb	Fer	Nickel	Argent	Phosphore
<i>Bronzes préhistoriques</i>								
Hache du Limbourg . . . . .	83,65	15,99	"	"	"	0,63	"	0,05
Épée de Styrie . . . . .	85,05	14,38	"	"	"	traces	"	0,10
Aiguille de Fionie . . . . .	91,33	8,10	"	"	"	0,57	"	"
<i>Vieux bronzes égyptiens</i>								
Poignards . . . . .	85,90	14,00	"	"	1,00	"	"	"
Pointe de lance . . . . .	76,60	22,20	"	"	"	"	"	"
<i>Vieux bronzes de l'Hellade ou pays voisins</i>								
Poignard de Chypre . . . . .	88,70	8,50	"	1,50	0,50	0,30	"	"
Coupe de Ninive . . . . .	80,80	18,4	"	0,40	0,20	0,20	"	"
Pièce de monnaie athénienne . . . . .	76,41	7,05	"	16,54	"	"	"	"
<i>Bronzes de l'époque romaine et autres moins anciens</i>								
Statue de la vicloire de Brescia . . . . .	80,80	9,40	1,90	7,7	"	"	"	"
Mors de cheval . . . . .	44,40	5,20	6,00	14,20	0,20	"	"	"
Vase grec . . . . .	76,10	15,60	8,20	"	"	"	"	"
Monnaie à l'effigie de Néron . . . . .	81,10	1,10	17,80	"	"	"	"	"

Les Alliages métalliques. — A. LEDEBUR.

Les bronzes spéciaux.

Les bronzes industriels ou mécaniques.

Les bronzes industriels ou mécaniques ayant des emplois extrêmement variés et importants, nous consacrerons à leur étude spéciale le paragraphe suivant (§ 3).

a) *Bronzes d'art.* — Ces bronzes datent des temps les plus reculés de l'histoire de l'humanité.

La Grèce et l'ancienne Rome nous ont laissé des chefs-d'œuvre admirables.

C'est l'Italie, au siècle de la Renaissance italienne, qui remit en honneur le travail artistique du bronze dont les procédés s'étaient perdus après l'invasion de l'empire romain.

Le métal à employer pour la statuaire doit être très fluide à la coulée de manière à pouvoir remplir les moindres sinuosités ou replis des moules ; en outre, son grain doit être tel que la retouche au burin et au ciseau soit possible après la coulée.

La présence d'une certaine quantité de zinc est utile pour assurer au métal la fluidité désirable, mais il faut craindre d'en mettre un excès pour éviter les soufflures et pour ne pas diminuer la dureté de l'alliage.

En outre, les bronzes trop riches en zinc ne

peuvent prendre, sous l'action du temps et des agents atmosphériques, cette belle *patine verte* succédant à la couleur dorée ou rouge jaunâtre du métal nouvellement fondu et qui est si goûtée des connaisseurs.

Il semble que la composition moyenne suivante soit celle qui se rapproche le plus de celle des bronzes artistiques des siècles passés :

*Cuivre* : 85 %.

*Étain* : 8 %.

*Zinc* : 3 %.

*Divers, entre autres plomb* : 4 %.

Le plomb intervient pour augmenter la fusibilité de l'alliage et faciliter le travail au burin, les copeaux détachés par l'outil étant nettement séparés du métal ciselé et ne restant pas collés aux arêtes.

• Certains *bronzes d'art* (reproductions, etc.) sont de qualité commune ; dans ce cas, on a forcé la quantité de zinc pour la porter à 35 à 40 %, ces bronzes méritant alors plutôt le nom de *laitons*.

Les *bronzes d'art* destinés à la dorure doivent, indépendamment de la fusibilité, de la fluidité et de la facilité de ciselage, présenter un degré de *compacité* réduisant au minimum la quantité d'or à employer pour la dorure ; l'expé-

rience seule a permis de fixer les meilleurs alliages sous ce rapport. On se sert, dans ce but, de mélanges *ternaires* ou *quaternaires* dont les compositions sont comprises dans les limites suivantes :

Cuivre . . . . .	70 à 82 0/0
Étain . . . . .	2 à 3
Plomb . . . . .	25 à 18
Zinc . . . . .	3 à 1,50

b) *Bronzes spéciaux*. — Nous entendons, sous cette dénomination, les *bronzes monétaires*, les *bronzes pour miroirs de télescopes* et ceux pour *instruments sonores*.

Nous ne saurions décrire en détail les diverses compositions admises pour la monnaie de billon en bronze.

L'antiquité a mis en usage, en même temps que des monnaies en cuivre presque pur, du billon de bronze ; la royauté française confectonna des *sols royaux* en cuivre ; il y eut, sous la première République, des sous d'un blanc jaunâtre (*cuivre* : 86 ; *étain* : 14) et des sous jaunes (*cuivre* : 96 ; *étain* : 4).

On s'est arrêté, en France, depuis 1852, à la composition bien connue (*cuivre* : 95 ; *étain* : 4 ; *zinc* : 1) ; avec 4 0/0 d'étain, on réalise la dureté nécessaire à une monnaie destinée à

une circulation intensive, sans que cette dureté soit néanmoins trop grande pour nuire à la netteté de l'empreinte ; quant au zinc, sa présence facilite, comme on sait, la fusibilité de l'alliage.

Les bronzes pour miroirs de télescopes doivent pouvoir se polir facilement et présenter, après le polissage, une surface presque blanche d'une grande clarté. C'est à la présence exclusive de l'étain qu'on a recours pour ce double objet en l'alliant au cuivre dans les proportions suivantes :

*Cuivre* : 66.

*Étain* : 33.

Le métal pour cloches doit être dur pour assurer la sonorité désirable ; l'étain est exclusivement employé dans l'alliage avec le cuivre. La proportion de ces deux corps, adoptée depuis des siècles, est de 18 à 25 % d'étain pour 82 à 75 % de cuivre.

**3. Bronzes industriels ou mécaniques.** — D'une manière générale, la composition des *bronzes mécaniques* varie dans de grandes limites et il paraît très difficile, au premier abord, d'adopter une classification.

Celle qui paraît la plus rationnelle est la suivante :

*Bronzes constitués presque toujours par l'alliage ternaire : cuivre, étain, zinc.*

*Bronzes obtenus par désoxydation et contenant une certaine proportion du désoxydant.*

*Bronzes contenant, indépendamment des éléments normaux qui sont le cuivre, le zinc ou l'étain, d'autres éléments incorporés dans le métal sans qu'ils aient joué un rôle chimique prépondérant dans son élaboration,*

*a) Bronzes à alliage ternaire.* — Si l'on en excepte le bronze à canons <sup>(1)</sup> qui contient seu-

(1) La composition des divers bronzes à canons est la suivante :

So à 9½ de cuivre + 20 à 6 % d'étain.

Si l'on admet que ce bronze a été élaboré dans des conditions satisfaisantes, les caractéristiques du métal à l'essai de traction seront les suivantes, sur barreau de 100 millimètres ; entre repères et de 30 millimètres de diamètre :

E = 10 à 12 kilogrammes.

R = 28 à 32 kilogrammes.

A % = 40 à 60.

Nous admettrons ces caractéristiques moyennes pour un bronze mécanique qu'on est convenu d'appeler de bonne qualité ; nous verrons, dans la suite, comment ces caractéristiques se modifient suivant les traitements métallurgiques adoptés ou suivant les compositions des différents bronzes.

lement du cuivre et de l'étain et les métaux de la série dits malléables, presque tous les *bronzes de machines* contiennent les trois éléments : *cuivre, étain et zinc* en proportions très variables dépendant précisément de leur utilisation.

L'emploi du bronze, au lieu du fer, dans un grand nombre de pièces de machines répond au double objectif suivant qui est de s'opposer à l'oxydation au contact de l'eau ou de l'air humide (*organes de pompes, robinets, valves, etc.*) et de permettre le remplacement de l'une seulement des pièces frottantes dans les contacts avec le fer ou l'acier (*coussinets, etc.*).

Il est inutile de détailler ici la composition des alliages répondant aux conditions si variées imposées aux pièces de machines ; nous nous contenterons de donner seulement quelques indications générales (tableau D, p. 45).

*b) Bronzes obtenus par désoxydation.* — Le cuivre et l'étain étant très oxydables, on a eu l'idée d'ajouter dans le bain métallique, immédiatement avant la coulée, des désoxydants énergiques réduisant les oxydes de cuivre et d'étain dont la présence dans le bronze est nuisible à ses qualités.

Les désoxydants employés principalement sont le *phosphore*, le *manganèse* et le *silicium* ;



d'où les bronzes *phosphoreux*, *manganésés* et *silicieux*.

TABLEAU D

Désignation	Cu	Sn	Zn
Bronzes pour pièces de frottement dures . . . . .	85	17 à 18	1 à 2
Bronzes pour pièces de frottement douces . . . . .	83	15	2
Bronzes pour garniture hydraulique. . . . .	86	13	1
Bronzes pour pièces mécaniques . . . . .	88	10	2
Bronzes pour robinetterie de vapeur. . . . .	88	8	4
Bronzes pour pièces malléables. . . . .	92	8	"
Bronzes pour pièces très malléables . . . . .	94	6	"
Bronze tenace américain . . . . .	58,2	2,3	39,5
Bronze tenace américain plus ductile. . . . .	55	0,5	44,5

a) *Bronzes phosphoreux*. — Les premiers essais de fabrication du bronze phosphoreux ont été faits il y a près de cinquante ans.

C'est généralement par l'intermédiaire du *phosphure de cuivre* que s'effectue l'introduction du phosphore dans le bain métallique ; sous cette

forme, on arrive sans grandes difficultés à pouvoir compter sur un alliage d'une teneur en phosphore connue et invariable.

Pour préparer ce composé, on chauffe dans un creuset en plombagine, jusqu'à la température de fusion pâteuse du cuivre et pendant 16 heures, un mélange de charbon de bois, de tournures de cuivre et de phosphate acide sirupeux mélangé à  $\frac{1}{5}$  de son poids de charbon et porté au rouge sombre (pâte à phosphore). Après refroidissement, on retire du phosphore de cuivre à 10 ou 12 % disséminé dans la masse charbonneuse; ce produit prend aussi le nom de *cuivre phosphaté*. Au lieu de cuivre phosphaté, on peut employer de l'*étain phosphaté* qui se prépare en dissolvant du phosphore dans de l'étain fondu; ce produit blanc, cristallisé en gros cristaux a une teneur de 9 % environ en phosphore.

L'emploi de ces composés riches en phosphore présente l'avantage d'éviter les trop grandes pertes en phosphore qui se produiraient nécessairement si l'on cherchait à incorporer directement cet élément dans l'alliage, tout en donnant le moyen de pouvoir compter sur un dosage régulier.

Pour préparer le bronze phosphoreux, on fond

d'abord dans un creuset en graphite les éléments constitutifs du bronze de façon à former l'alliage ternaire *cuivre-étain-zinc* dans des proportions déterminées suivant l'usage auquel sont destinées les pièces de machines à confectionner. On ajoute ensuite la quantité nécessaire du produit phosphaté en ayant soin d'introduire dans le bain quelques morceaux de charbon de bois recouvrant sa surface afin d'éviter l'oxydation.

Pour éviter les liquations dans le moule, on ne procède à la coulée qu'après avoir pris le soin de brasser le métal fondu et de l'avoir refroidi en jetant au dernier moment des débris de lingots, jets de coulée, etc.

En coulant ainsi le métal lorsqu'il est voisin de son point de solidification, on est à peu près certain d'obtenir dans le moule un métal compact et homogène se prenant en masse dans un temps très court.

La quantité de phosphore qui reste incorporée à l'alliage est relativement faible et ne dépasse pas quelques millièmes.

Le bronze phosphoreux sert surtout à la fabrication des pièces demandant de la dureté, de la résistance au frottement et de l'inoxidabilité.

Nous citerons parmi ces pièces :

Les hélices de navire ;

Les fils téléphoniques ;  
 Les tiroirs de locomotives ;  
 Les coussinets pour bielles ou pour essieux de wagons ;  
 Les tiges de piston pour cylindres hydrauliques, etc., dont les teneurs varient :

Pour le cuivre de. . . . .	75 à 85 %
Pour l'étain de. . . . .	8 à 12 %
Pour le zinc de. . . . .	3 à 15 %

Les propriétés mécaniques des bronzes phosphoreux sont, sans doute, dans un grand nombre de cas, supérieures à celles des bronzes mécaniques ordinaires qu'on choisirait pour la même utilisation, mais il importe de se mettre en garde à ce sujet contre les chiffres donnés souvent sans un contrôle suffisant.

Il n'est pas inutile de remarquer que les caractéristiques des bronzes aux différents efforts sont rarement données par les fabricants ; comme pour les aciers, il est nécessaire d'être fixé sur les valeurs de E, R, A %, soit à la traction, soit à la flexion, en les complétant par les résultats des essais au choc et à la torsion pour les pièces de machines. Quoi qu'il en soit, il semble admis aujourd'hui que le bronze phosphoreux peut atteindre assez facilement les

valeurs suivantes pour les caractéristiques de l'essai de traction :

$R = 20$  à  $40$  kilogrammes et même  $65$  à  $70$  kilogrammes pour certaines qualités ;

$A = 2$  à  $50$  ‰.

Il semble admis aujourd'hui que ce métal résisterait, dans des conditions très avantageuses aux essais répétés de flexion et de traction et à ceux de torsion dans les deux sens.

Si l'on ajoute que le bronze phosphoreux présente une homogénéité, une ténacité, une dureté facilement graduées, une usure peu rapide et de beaux frottements, on comprendra aisément que ce métal se soit répandu dans les usages industriels.

Il reste entendu, et cette remarque concerne tous les bronzes, qu'il ne s'agit que du métal naturel ; les traitements métallurgiques à chaud ou certaines opérations mécaniques à froid pouvant modifier dans de très larges limites les propriétés mécaniques considérées.

β) *Bronzes au manganèse.* — Le manganèse ajouté aux alliages binaires *cuivre-étain* ou *cuivre-zinc*, ou à l'alliage ternaire *cuivre-étain-zinc* ou même au *cuivre pur*, joue le même rôle que le *phosphore* ; mais tandis que l'addition de ce dernier élément est calculée de telle

sorte qu'il n'en reste, dans le produit final, qu'une teneur de quelques millièmes à peine ou même moins, le manganèse peut être ajouté dans une proportion telle qu'il en reste une quantité souvent très notable.

Le manganèse pur étant difficile à obtenir, s'oxydant et s'effritant très rapidement à l'air, c'est sous la forme d'un produit manganésé qu'on en assure l'incorporation dans le bain métallique, soit sous forme de *ferro-manganèse*, soit sous forme de *cupro-manganèse*.

Nous ne reviendrons pas sur le ferro-manganèse dont il a été précédemment question à l'étude des alliages ferro-métalliques ; il nous suffira de donner quelques indications au sujet du cupro-manganèse employé de préférence, afin d'éviter l'introduction du fer et du carbone dans l'alliage manganeux à élaborer.

Le cupro-manganèse s'obtient le plus souvent en fondant dans des creusets de graphite, à très haute température, un mélange de *cuivre*, d'*oxyde de manganèse* et de *charbon* ; on réalise ainsi des produits dont la richesse en manganèse peut atteindre 30 %.

On a pu aussi fabriquer des cupro-manganèse en réduisant par le charbon un mélange d'*oxyde de cuivre* et d'*oxyde de manganèse*.

Enfin on a pu obtenir le cupro-manganèse par voie indirecte en associant finalement avec le cuivre le manganèse raffiné tiré de la *pyrolusite* traitée préalablement pendant 5 à 6 heures environ, dans des creusets en plombagine, à haute température, avec un mélange intime de charbon et de matières très basiques.

Le manganèse ainsi élaboré est du manganèse *brut* qu'on raffine en le refondant avec un fondant approprié. Une nouvelle fusion de ce manganèse raffiné avec du cuivre donne le cupro-manganèse riche (à près de 30 % de manganèse) qui servira dans la fabrication des bronzes manganésés.

L'alliage manganeux s'ajoute préalablement fondu au bain métallique en fusion recouvert d'une couche de charbon. Souvent même, on a eu soin d'ajouter au bain quelques bases alcalines destinées à faire passer au laitier les oxydes de manganèse résultant de l'action chimique produite par le manganèse.

En somme, tout le secret de la fabrication consiste à éviter que le manganèse ne s'oxyde sous l'influence de l'air atmosphérique et qu'une fois oxydé par son action sur l'oxygène du bain il ne reste incorporé au métal final.

L'action du ferro-manganèse ou du cupro-

manganèse est donc identique à celle qui se passe dans l'élaboration des aciers lorsqu'on procède aux additions finales de fontes manganésées.

Il paraît difficile d'établir une classification des métaux compris sous la dénomination générale de bronzes manganésés si l'on se reporte aux indications données plus haut ; puisque, non seulement on peut associer le manganèse aux alliages binaires et ternaires, mais, qu'en outre, la teneur de ce métal peut varier dans de très grandes limites et atteindre parfois jusqu'à 13 ou 15 % ou même plus.

Nous devons nous borner, par suite, à signaler les améliorations que le manganèse apporte aux propriétés générales des métaux qu'on peut appeler *bronzes* lorsqu'ils sont destinés à des emplois mécaniques.

En général, les bronzes manganésés industriels peuvent supporter le travail à chaud (*forgeage* ou *laminage*) au rouge cerise ou au rouge cerise clair suivant leur composition ; en ce qui concerne le travail à froid, aucune remarque spéciale n'est à formuler.

Une des caractéristiques principales des bronzes manganésés consiste en ce que la limite élastique de traction Est très notablement supérieure



à celle des bronzes ordinaires, puisqu'elle peut atteindre la valeur de 25 kilogrammes par millimètre carré de la section primitive du barreau. Par contre, l'allongement  $\Lambda$  % est bien inférieur à celui des bronzes ordinaires.

La résistance à la rupture par traction R peut atteindre facilement près de 40 kilogrammes et se trouve, par suite, supérieure à celle des bronzes non manganésés.

Il convient d'ajouter que, d'après des expériences sur lesquelles nous ne pouvons insister en raison du cadre restreint de ce volume, les caractéristiques dont il s'agit s'améliorent dans une très forte mesure si l'on soumet les bronzes manganésés à l'opération du forgeage ou du laminage à chaud.

S'il est vrai que la limite élastique E reste plutôt stationnaire et décroît très légèrement, par contre, la charge de rupture et l'allongement croissent très notablement.

Pour toutes ces causes, et en raison de leur peu d'aptitude à l'oxydation, on conçoit combien ces métaux peuvent répondre à de nombreux usages industriels.

$\gamma$ ) *Bronze silicieux.* — Le *silicium*, comme le phosphore et le manganèse, est introduit dans les bronzes en fusion pour les désoxyder,

mais les bronzes au silicium ainsi obtenus sont le plus généralement des alliages de cuivre et de silicium, sans étain ni zinc, avec traces d'autres éléments étrangers introduits par les éléments eux-mêmes qu'on veut associer.

Le bronze silicieux véritable, renfermant de l'étain, n'a pas trouvé jusqu'ici d'emplois bien définis ; l'alliage de cuivre et de silicium, le plus souvent livré dans le commerce sous le nom de *bronze silicieux*, possède des propriétés électriques et mécaniques fort précieuses depuis qu'on a appris à le tréfiler et qu'on l'a appliqué aux canalisations aériennes.

Deville et Caron avaient préparé, en 1857, l'alliage *cuivre-silicium* en fondant au creuset le cuivre avec de l'hydrofluosilicate de potasse ou de soude.

En 1880, Lazare Weiller, d'Angoulême, obtint un *cupro-silicium* à 10 ou 12 % de silicium servant à préparer les bronzes silicieux.

La résistance à la rupture par traction des bronzes silicieux varie dans des limites assez étendues, entre 40 et 70 kilogrammes par millimètre carré de la section primitive du barreau, suivant que le métal a été essayé à l'état naturel ou à la suite d'un travail mécanique l'ayant écroui.

c) *Bronzes à éléments autres que les éléments normaux des bronzes proprement dits.* — Nous ne citerons, parmi ces alliages, que le *bronze d'aluminium* qui est un métal analogue au bronze *cuivre-étain*, mais dans lequel l'aluminium remplace l'étain.

L'aluminium ajouté au cuivre lui donne des propriétés du même ordre que celles qui résultent de l'addition de l'étain, mais ces propriétés sont *exaltées*.

Le bronze ainsi constitué, est plus dur que le bronze d'étain correspondant, mais il est moins malléable et résiste moins bien aux efforts de flexion.

Le bronze d'aluminium est employé dans la construction des petites pièces de machines exigeant une grande dureté, et comme la présence de l'aluminium modifie heureusement la couleur du cuivre en la faisant passer au jaune plus ou moins pâle ou au jaune d'or, suivant les teneurs en cet élément, on se sert assez souvent de cet alliage pour reproduire des objets d'art ou d'ornementation, mais la couleur ainsi recherchée s'altère rapidement sous l'influence des divers agents atmosphériques.

La quantité d'aluminium allié au cuivre dépasse rarement 10 %; pour des teneurs supé-

rieures, les alliages obtenus deviennent très durs et, par suite, cassants.

La préparation des bronzes d'aluminium a pris un développement assez grand, dans ces dernières années, depuis que l'emploi des méthodes électrolytiques a permis de les produire directement, sans faire intervenir la fabrication préalable de l'aluminium (1).

En plus de l'action modificatrice prépondérante qu'il exerce par sa présence sur les propriétés du cuivre, on peut dire aussi que, comme le *phosphore*, le *manganèse* et le *silicium*, l'*aluminium* réduit dans le bain métallique en fusion les oxydes de cuivre formés.

**4. Traitements métallurgiques des bronzes.** — Nous distinguerons dans cette étude :

La *fusion* et la *coulée*.

Les *opérations de trempe* et de *recuit*.

a) *Fusion et coulée*. — La fusion des bronzes s'effectue au creuset ou au four à réverbère suivant l'importance de la coulée.

Dans le cas d'un alliage binaire, on associe

(1) Nous renvoyons, pour l'étude de ces divers procédés, aux volumes suivants de cette Encyclopédie : I. *L'Électro-métallurgie* et II. *Les fours électriques* par A. MINET.

d'abord les deux métaux par quantités à peu près égales, pour refaire avec l'alliage ainsi obtenu un nouvel alliage par l'addition du restant du métal en excès. On opère de même pour un alliage ternaire ou supérieur, surtout lorsqu'il s'agit d'associer des métaux à points de fusion très différents et en proportions très inégales (1).

Bien que cette façon de procéder paraisse compliquée, elle présente le double avantage, d'une part, d'obtenir des alliages d'une plus grande homogénéité par la formation d'alliages intermédiaires dont les points de fusion sont plus rapprochés les uns des autres que ceux des métaux proprement dits et que, d'autre part, les métaux oxydables ou volatilissables échappent plus facilement à ces transformations à l'état d'alliage qu'à l'état pur.

Le chargement des creusets et des fours à reverbère peut se faire exclusivement à l'aide de métaux neufs ou en utilisant en partie des

---

(1) Le cuivre fond à	1 050°
L'étain	// 235°
Le zinc	// 402°
Le plomb	// 330°
Le nickel	// 1 500°
L'antimoine	// 450°

déchets de fabrications antérieures, tels que masselottes, copeaux d'usinage, etc. Dans ce cas, il y a lieu de compter sur la présence, dans le produit final, des impuretés que ces déchets peuvent contenir.

Le brassage du bain en fusion à la perche a pour but de réaliser, par les gaz résultant de la distillation du bois, la réduction des oxydes et, en particulier, de l'oxyde de cuivre. Ce procédé a été l'objet de nombreuses critiques qui paraissent aujourd'hui complètement justifiées, car il ne tend que trop, par l'abondance des gaz engendrés, à rendre le bronze souffleur. Il semble que le brassage à la perche ne doit être effectué que dans un temps très réduit suffisant pour mélanger le bain liquide et qu'il faille surtout compter, pour la réduction des oxydes, sur l'action de l'étain dont l'oxyde formé, insoluble dans le métal, surnage sous forme de scorie ou sur celle des réactifs précédemment signalés tels que le *phosphore*, le *manganèse*, le *silicium* et aussi l'*aluminium*.

L'alliage à couler étant fondu, il est nécessaire de ne pas le surchauffer, il suffit qu'il soit parfaitement liquide, ce qu'on reconnaît en le brassant pendant quelques instants avec une perche.

Dans certaines fonderies, on apprécie la tem-

pérature du bain en y plongeant un barreau de cuivre qui, pour un titre d'étain déterminé, se dissout d'autant plus vite que la température est plus élevée.

La coulée s'effectue dans des *moules en sable* lorsque la pièce qu'on se propose de fabriquer doit être obtenue avec ses *formes presque définitives*, ainsi qu'il arrive pour la fonte.

La coulée s'effectue dans des *lingotières* métalliques quand on veut avoir un lingot qui devra être travaillé par *forgeage, laminage ou tréfilage*.

Pour obtenir une texture régulière dans les lingots, il est nécessaire que la solidification de l'alliage soit aussi rapide que possible ; il faudra, pour atteindre ce résultat, couler dans une lingotière dont les parois soient assez épaisses pour absorber rapidement la chaleur cédée par le métal fondu.

Comme pour les lingots d'acier, on pourra ménager une masselotte aux lingots de bronze ; à cet effet, on prolongera la lingotière métallique en fonte par une lingotière ayant la hauteur de la masselotte qu'on veut obtenir et constituée par une mince paroi de métal revêtue intérieurement d'un enduit réfractaire assez épais. En opérant ainsi, et pourvu qu'on coule assez chaud,

le métal des couches supérieures se refroidissant moins vite, restera plus longtemps liquide en abreuvant le creux formé par le retrait du métal qui se solidifie dans la lingotière.

Le lingot obtenu sera plus compact et plus homogène.

b) *Opérations du recuit et de la trempe.* — Le recuit au rouge cerise clair améliore les propriétés mécaniques des bronzes comme il arrive pour les aciers.

La limite élastique de traction E diminue légèrement, mais la résistance à la rupture R et l'allongement pour cent augmentent très notablement.

En outre, la texture devient bien plus régulière.

Il est bon, comme pour les aciers, de laisser refroidir les bronzes très lentement après le recuit dans des matières peu conductrices de la chaleur, chaux, sable, etc.

On est donc autorisé à penser que l'on peut appliquer aux bronzes une partie des conceptions de la « Théorie cellulaire des aciers » se rapportant à la répartition régulière du ciment à travers les grains simples, la dislocation des grains composés ayant pu s'opérer (1).

---

(1) L. GAGES. — *Travail des Métaux dérivés du fer.*



La *trempe* à l'eau au rouge cerise améliore, comme pour les aciers, la texture du bronze et ses caractéristiques principales à la traction, en diminuant, il est vrai, l'allongement pour cent, mais en augmentant la limite d'élasticité E et la résistance à la rupture R.

Stamfield (1), dans l'étude de la fusibilité des bronzes, a observé des temps d'arrêt pendant leur refroidissement, semblant indiquer des transformations successives du métal solide, comme on en observe dans les aciers (*Royal Society*, Londres, février 1901). Il est probable que l'attention des savants se fixera sur ce point spécial et que des études parallèles à celles qui ont été faites sur les aciers seront entreprises au sujet des courbes de refroidissement des bronzes et que des résultats précis seront fournis par les trempes effectuées entre les divers points de transformation.

La courbe de refroidissement établie par Stamfield (*fig. 1*) se rapporte à l'alliage de composition atomique  $\text{Cu}_{81}\text{Sn}_{19}$  et de composition pondérale :

Cu...69,36  
Sn...30,44.

---

(1) HEYCOCK et NEUVILLE. — *Sur la trempe du bronze*. Bulletin de la Société d'Encouragement pour l'Industrie nationale. Août 1901.

Le temps d'arrêt principal MNO correspond à la solidification de l'alliage ; les temps d'arrêt

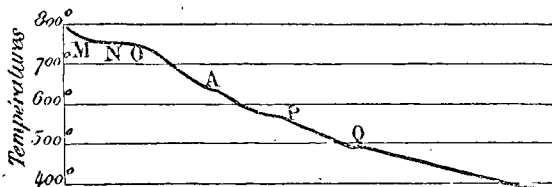


Fig. 1

secondaires A, P, Q à des transformations ultérieures dans le métal solide.

### III. LAITONS

L'étude des laitons comprendra celle des *laitons* proprement dits et celle d'autres alliages dérivant des laitons, mais dans lesquels on a incorporé, pour en modifier les propriétés mécaniques ou pour en faciliter le travail soit à chaud, soit à froid, des éléments tels que le *fer*, le *nickel*, etc.

**1. Laitons proprement dits.** — Les laitons proprement dits sont des alliages à base de *cuivre* et de *zinc*.

Le zinc rend le cuivre plus fusible ; il augmente comme l'étain, et dans une plus grande

mesure, ses qualités de résistance et de dureté, tout en diminuant moins sa malléabilité.

Il en résulte que le travail à froid au laminoir, à la filière, etc., est le plus généralement employé pour le traitement du laiton, sous la réserve de pratiquer en temps opportun, dans l'intervalle des différentes passes de la fabrication, les opérations de recuit nécessaires.

Enfin, le zinc étant d'un prix bien inférieur à celui de l'étain, on comprend aisément pourquoi le laiton a pu se prêter à un grand nombre d'emplois industriels.

Il n'en reste pas moins établi que ces alliages, *laitons* et *bronzes*, ne sauraient être substitués les uns aux autres, chacun d'eux répondant à des propriétés mécaniques bien déterminées.

Nous ajouterons toutefois que l'*étain* rentre souvent en proportion quelquefois appréciable dans les laitons du commerce ; aussi, pour certains d'entre eux est-il difficile d'établir la ligne de démarcation les séparant des *bronzes*.

Le laiton est connu depuis fort longtemps et bien que les Romains n'aient pas élaboré le zinc à l'état pur, ils obtenaient cet alliage en fondant le cuivre en présence de la *calamine* et du *charbon*.

On prépare aujourd'hui le laiton au creuset

ou dans des fourneaux à réverbère organisés spécialement pour éviter l'oxydation et la volatilisation du zinc.

En général, le cuivre et le zinc sont placés dans les creusets en couches alternées, le tout étant recouvert d'une couche de charbon en poudre. Quelquefois, lorsqu'on utilise des déchets de fabrication, le cuivre est d'abord fondu avec ces déchets et l'addition du zinc, préalablement réchauffé, ne se fait qu'en fin d'opération.

La perte en zinc sur laquelle il faut compter nécessairement est, en général, de 2 à 3 % du poids total de l'alliage à fondre et de 5 à 8 % de la proportion de zinc à incorporer au cuivre.

Le laiton se coule dans des moules en sable ou dans des lingotières métalliques constituées par deux plaques de fer assemblées et qu'on peut aisément séparer pour le démoulage.

Les laitons *ordinaires* contiennent de 15 à 30 % de zinc ; le plus résistant est celui qui sert à faire les douilles de cartouches et qui est connu sous le nom de *laiton de guerre*, il contient 33 % de zinc et est préparé avec des soins tout particuliers ayant pour objet d'en faciliter la coulée.

Ce métal est particulièrement sensible à l'érouissage et au recuit ; en prolongeant le travail à froid, on peut l'amener à des résistances de rupture à la traction de plus de 60 kilogrammes par millimètre carré de section primitive du barreau d'essai, mais il est alors cassant et ne peut reprendre sa malléabilité que par un recuit approprié. Comme il arrive avec l'acier, un recuit effectué à trop haute température, ou prolongé trop longtemps, rend le laiton cristallin.

On dit alors qu'il est *brûlé*.

Pour les teneurs peu supérieures à 35 % de zinc, on diminue la faculté que possède le laiton de se laisser laminé à froid. L'alliage à 40 % de zinc, est à la limite supérieure qui rend le laminage encore possible ; cet alliage est connu dans l'industrie sous le nom de *laiton malléable* ou de *métal de Müntz* et sert au doublage des navires.

Pour des teneurs en zinc, supérieures à 40 % et voisines de 50 %, les laitons deviennent cassants et fragiles.

Les laitons à haute teneur en zinc (voisine de 60 %) ne sont employés comme alliages très durs (locomotives, etc.) que lorsqu'on incorpore à l'alliage 10 à 12 % d'étain, mais alors ce

ne sont plus des laitons, mais bien des bronzes (1).

**2. Métal delta.** — Le *métal delta* a été produit industriellement, il y a une vingtaine d'années, par A. Dick. Ce métal est un véritable laiton contenant 55 % de cuivre et 41 % de zinc, avec *une certaine quantité de fer* variant de 1 à 4 %, des traces de manganèse et de plomb et, quelquefois, de nickel et de cobalt.

Fusible à 950°, le métal delta est très fluide à cette température et se moule facilement. Au rouge sombre, soit entre 500 ou 600°, il est très malléable et peut être martelé ou laminé. Traité à chaud, mécaniquement, à une température plus élevée, cet alliage s'égrène sous l'action des engins de forgeage ; d'autre part, au-dessous du rouge, il se crêpe sous le marteau. Au cas où on lui fait subir un travail à froid, il importe de procéder à des déformations très faibles entre lesquelles on fera des recuits appropriés.

---

(1) Sous la dénomination de *tombac* (originaire du Siam au xvii<sup>e</sup> siècle, de *tambaya* : cuivre), on comprend les alliages de cuivre et de zinc d'une teneur maxima ou inférieure à 18 %.

La couleur de ces alliages varie du jaune d'or au rouge brun ; ils s'emploient dans la fabrication des objets en *similor* obtenus par voie d'étampage (objets d'ornement, clinquant, boutons, etc.) et souvent dorés. La teneur en zinc ne descend jamais en dessous de 8 à 10 %.

Le métal delta peut se souder à lui-même au moyen du chalumeau oxhydrique ou des procédés électriques, mais non par les moyens ordinaires ; par contre, il peut être *brasé*, comme tous les alliages renfermant du cuivre, avec quelques précautions pour éviter de le brûler.

En résumé, le métal delta est employé :

a) *Sous forme de moulages, d'un grain fin et serré et presque inoxydables (cylindres, engrenages, hélices, pistons, valves, etc.) ;*

b) *Sous forme de pièces forgées d'une résistance très notablement supérieure à celle du métal naturel (tiges de pompe, tiges de soupape, boulons, goupilles, tirants de chaudières, etc.) ;*

c) *Sous forme de pièces matricées ou étampées encore plus résistantes que les pièces simplement forgées (robinetterie, serrurerie, horlogerie, etc.) ;*

d) *Sous forme de fils, plaques minces, etc., obtenues par un travail d'étirage ou de laminage à froid consécutif au travail de transformation à chaud, soit au marteau, à la presse ou au laminoir.*

La résistance à la rupture par traction du métal naturel est d'environ 35 à 40 kilogrammes ; elle peut atteindre 55 à 60 kilogrammes après un travail mécanique à chaud bien conduit.

L'allongement est de 20 % environ dans le métal naturel, et s'élève de 25 ou 30 % après forgeage ou laminage à chaud ; par contre, cet allongement peut être réduit à 10 % après un travail à froid ayant produit un fort écrouissage.

Pour préparer le métal delta, on constitue d'abord un alliage de zinc et de fer où ce dernier métal entre à saturation. En ajoutant cet alliage en proportion convenable dans un bain de cuivre pur ou déjà combiné avec du zinc, on peut faire passer dans le produit final, une quantité bien déterminée de fer.

Tout le secret de la fabrication consiste à éviter l'oxydation des divers éléments incorporés et notamment du fer ; il est probable que c'est sur l'action d'additions ayant pour but de provoquer les réactions nécessaires qu'il y a lieu de compter pour atteindre ce résultat. C'est pour cela que l'addition de cuivre phosphoré dans l'alliage est couramment pratiquée ; il est certain qu'une faible addition d'aluminium contribuerait également à faire disparaître les produits oxydés.

**3. Maillechort.** — Le *maillechort* doit être considéré comme un laiton additionné de *nickel* ; ce n'est que vers 1824, époque à laquelle la



production industrielle de ce dernier métal fut établie, que sa fabrication se vulgarisa.

Cet alliage reçut des noms différents suivant les pays ; en France, les inventeurs Maillet et Chorier lui laissèrent leur nom, on l'appelle aussi *argentan*, *nouvel argent*, *melchior*, etc.

Selon l'emploi auquel les alliages compris sous la dénomination de *maillechort* sont destinés, leur teneur en nickel varie entre 10 et 25 %.

Une forte teneur en *nickel* augmente le prix de revient de ces métaux et leur donne une grande dureté en élevant très notablement aussi leur température de fusion.

Le zinc abaisse le point de fusion et diminue le prix de revient : la teneur en cet élément varie entre 20 et 40 %.

Certains de ces alliages sont soumis à l'*argenture*, depuis que les procédés galvanoplastiques ont été si perfectionnés.

Enfin, il y a lieu de signaler, pour mémoire, certains maillechorts du commerce très pauvres en nickel pour des fabrications d'ustensiles communs ; ce ne sont à proprement parler, que des laitons additionnés d'un peu de nickel.

La fusion du maillechort s'effectue *au creuset* à haute température. Plusieurs procédés peuvent être employés pour le chargement des creusets ;

ou bien on commence par fondre la totalité du cuivre et du nickel en ajoutant en fin d'opération le zinc préalablement dégourdi, ou bien on charge les creusets de couches alternatives de zinc et de nickel placées entre une couche inférieure et une couche supérieure de cuivre, en continuant à introduire, pendant la fusion, le reste du cuivre et du nickel, quitte à jeter en fin d'opération un peu de zinc, pour contribuer à la fusibilité de l'alliage.

Quelquefois, on fabrique d'abord l'alliage binaire cuivre-zinc et on en incorpore les fragments dans un bain en fusion de cuivre et de nickel en proportion voulue.

L'alliage est coulé dans des moules en fonte le donnant, après refroidissement, sous forme de plaques destinées à être laminées en tôles plus ou moins épaisses ; c'est de ces tôles que la fabrication tirera par voie d'étampage ou de matriçage à froid, ou encore par voie d'usinage, les objets à produire.

Le métal s'érouissant facilement, il est nécessaire, comme pour le laiton de recourir, entre certaines passes de la fabrication, à des recuits ; ces recuits ont l'inconvénient de favoriser l'oxydation du maillechort, aussi les usines ont-elles essayé des procédés spéciaux pour y

obvier consistant surtout à faire réchauffer l'alliage dans des bains salins portés à la température requise.

La charge de rupture à la traction du maillechort de bonne qualité peut atteindre 70 kilogrammes par millimètre carré de la section primitive du barreau d'essai ; elle est donc supérieure à celle du laiton de qualité correspondante.

Enfin, il convient d'ajouter que lorsqu'on voudra obtenir du maillechort sous forme de moulage, il sera nécessaire d'ajouter à l'alliage des éléments tels que le plomb ou l'étain destinés à augmenter sa fusibilité (1).

---

(1) On signalera, pour mémoire, les essais d'incorporation au maillechort d'éléments tels que le *manganèse*, le *cadmium*, etc.

## CHAPITRE III

---

### ALLIAGES BLANCS DITS ANTIFRICTION

Nous aurons recours pour traiter ce sujet à l'étude si complète de G. Charpy sur les alliages blancs dits *antifricition* <sup>(1)</sup>.

Ces alliages sont d'un emploi très fréquent dans l'industrie et la multiplicité de leurs formules montre à l'évidence qu'on est loin d'être fixé sur leurs propriétés fondamentales et surtout sur leur appropriation dans tous les cas de la pratique. Avant d'indiquer les différents alliages *antifricition* les plus employés, il paraît nécessaire de spécifier les qualités qu'il convient de rechercher dans ces métaux.

**1. Qualités à rechercher dans un alliage antifricition.** — Il semble tout d'abord établi

---

(1) Travaux de la Commission des alliages. — *Recherches expérimentales sur les alliages métalliques ; étude sur les alliages blancs dits antifricition* (Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale, juin 1898).

que si l'on avait des tourillons exactement ajustés et parfaitement graissés, il y aurait peu d'intérêt à employer pour les coussinets un métal ou un autre. Lorsqu'un fonctionnement anormal se produit, c'est qu'il y a discontinuité dans la couche d'huile existant entre le tourillon et le coussinet ; dans ce cas, la nature des métaux en contact intervient dans le phénomène considéré.

Les expériences de G. Rennie, en 1820, confirmées par les conceptions théoriques plus récentes de Mallard sur les relations des faces de clivage dans les cristaux avec les variations de la dureté, ont montré que pour atténuer le frottement et faire disparaître les grippements, l'emploi des *corps durs* pour les surfaces frottantes paraissait devoir s'imposer.

Admettons pour l'instant ce résultat.

Il faudra, en employant des métaux durs, que les surfaces en contact soient régulières de façon que la charge soit également répartie et non concentrée en certains points ; or, en pratique, il n'en sera pas toujours ainsi, car un arbre neuf placé dans un coussinet neuf ne peut y être mathématiquement ajusté.

Dans ce cas, le métal étant dur et ne cédant pas, il en résultera, aux points où s'exercent les

frottements, des pressions considérables pouvant amener le chauffage et le grippement. Il faudrait donc que le métal du coussinet ait une certaine plasticité et pût se mouler sur l'arbre pour augmenter la surface de contact.

On est donc conduit à adopter pour les alliages destinés à la confection des coussinets et des pièces frottantes deux qualités en apparence contradictoires, la *plasticité* et la *dureté*.

C'est pour atteindre ce résultat, auquel l'expérience avait d'ailleurs conduit en dehors de toute considération théorique, qu'on a adopté des métaux formés de *grains durs englobés dans un alliage plastique*.

La portée ne se fait ainsi que sur les grains durs qui ont un coefficient de frottement peu élevé et sur lesquels le grippement ne peut se produire que difficilement ; en outre, la plasticité du ciment permet au coussinet de se mouler sur l'arbre, ce qui évite les surpressions locales occasionnant le plus souvent les accidents.

**2. Principaux alliages antifricition.** — Les avantages des alliages blancs pour la confection des coussinets ont été reconnus à la suite d'expériences faites notamment par la C<sup>ie</sup> des chemins de fer P.-L.-M. et dont les résultats ont été publiés dans un travail paru en 1894 dans la

*Revue générale des chemins de fer* et dû à l'Ingénieur Chabal.

« Les coussinets en métal blanc chauffent beaucoup moins que les coussinets en bronze.

« Aux vitesses de 30 à 40 kilomètres, les coussinets en métal blanc donnent une résistance moindre que les coussinets en bronze. La substitution du métal blanc au bronze donne une diminution de 20 % sur la résistance pour des wagons houillers à pleine charge formant des trains de 300 tonnes et roulant à des vitesses de 27 à 42 kilomètres à l'heure.

« D'après les essais faits sur véhicules isolés, on trouve que le gain que donne cette substitution diminue quand la vitesse croît, surtout si ces véhicules sont chargés pour la petite vitesse, et peut même, dans ce dernier cas, devenir une perte aux grandes vitesses, mais que, pour ces véhicules chargés pour la grande vitesse, le gain reste toujours d'au moins 5 %, ce qui implique un gain plus marqué pour le cas de véhicules roulant dans un train.

« L'usure des coussinets régulés est beaucoup moindre que celle des coussinets en bronze (0,4 en moyenne) ».

On peut dire que l'accord s'est fait, à peu près dans toutes les industries, sur l'emploi des mé-

taux blancs comme *antifriction*, mais il est loin d'en être ainsi en ce qui concerne les formules choisies pour ces alliages.

a) *Alliages cuivre-étain-antimoine*. — Ces alliages, à teneurs les plus variées en ces éléments, paraissent les plus répandus.

*Pour les coussinets assez fortement chargés, coussinets de wagons ou coussinets ordinaires, on trouve assez souvent les compositions suivantes :*

Désignation	Sn	Cu	Sb
Coussinets ordinaires . . . . .	96	4	8
Coussinets de wagons (chemins de fer russes) . . . . .	90	2	8
Constructions navales . . . . .	88,8	3,7	7,4
Coussinets de wagons (C <sup>ie</sup> de l'Est).	83,33	5,55	11,11

*Pour les coussinets faiblement chargés, les teneurs en antimoine et en cuivre augmentent à peu près parallèlement, on trouve ordinairement les compositions suivantes :*

Sn	Cu	Sb	Pression
85	5	10	} Faibles ou très faibles pressions
76	7	17	
73	9	18	





b) *Alliages plomb-étain-antimoine.* — Ces alliages peuvent être employés comme *anti-friction* et sont nettement supérieurs aux alliages binaires de plomb et d'antimoine proposés quelquefois pour cet usage.

La proportion d'étain doit être supérieure à 10 %, mais il est inutile qu'elle dépasse 20 %.

La proportion d'antimoine peut varier de 10 à 18 % environ.

La proportion de plomb est presque toujours plus élevée.

Nous citerons parmi ces alliages :

Désignation		Pb	Sn	Sb
C <sup>ie</sup> de l'Est	Garnitures métalliques des tiges de piston . . . . .	80	12	7
	Garnissage des colliers d'excentrique . . . . .	70	10	20

Une faible proportion d'antimoine réalise une plus grande plasticité, une plus forte proportion augmente la quantité des grains durs englobés dans la matière plastique.

c) *Alliages plomb-cuivre-antimoine.* — Les alliages de *plomb* et de *cuivre* n'existent pas à

proprement parler ; les deux métaux ne peuvent se mélanger qu'en proportions très faibles et quand on fond du plomb avec du cuivre, le liquide se sépare généralement en deux couches : l'une formée de plomb contenant un peu de cuivre, l'autre formée de cuivre contenant un peu de plomb.

Le cuivre et l'antimoine, par contre, s'allient en toutes proportions pour former un composé défini dur, coloré en violet et de formule  $Sb.Cu^2$ .

Les alliages *plomb-cuivre-antimoine* se forment en ajoutant aux divers alliages *plomb-antimoine* des quantités déterminées de *cuivre*.

Une trop forte proportion de cuivre occasionne des liquations et la présence dans l'alliage de grains isolés de  $Cu$ ,  $Sb$  et de  $Sb.Cu^2$  qui en compromettent l'homogénéité.

La composition de ces alliages ternaires ne peut varier que dans des limites peu étendues.

En ajoutant aux alliages de *plomb* et d'*antimoine*, contenant de 15 à 20 % d'antimoine, une proportion de cuivre qui ne doit pas dépasser 10 %, on obtient d'excellents métaux antifriction comparables aux alliages *étain-cuivre-antimoine* précédemment étudiés.

Nous citerons l'alliage suivant utilisé par la

Compagnie de l'Est pour garnir les coussinets de locomotives et de tenders :

Pb = 65 %;    Cu = 10 %;    Sb = 25 %.

d) *Alliages zinc-étain-antimoine.* — Ces alliages présentent, en général, une résistance très remarquable à la compression; la présence de l'étain pallie dans une large mesure à la très grande fragilité des alliages de zinc et d'antimoine.

Ceux dont l'emploi est à recommander, si l'on s'en tient aux résultats des expériences dont ils ont été l'objet, contiendraient de 10 à 15 % d'étain et de 10 à 15 % d'antimoine. Leur prix de revient serait peu élevé puisque le zinc serait l'élément principal, mais il est à craindre que leur préparation ne soit rendue difficile à cause de l'oxydabilité de ce métal surtout en présence de l'antimoine.

e) *Alliages cuivre-étain-plomb.* — Ces alliages rentrent, en somme, dans la classe des bronzes; nous ne saurions les passer sous silence tant à cause de leur emploi encore fort répandu que pour l'étude de l'influence du plomb sur les propriétés du bronze *cuivre-étain* proprement dit.

L'introduction du plomb dans le bronze aug-

mente sa plasticité dans une très large mesure, ce métal peut lui être incorporé jusqu'à une teneur maxima de 15 % environ ; pour des teneurs supérieures, en effet, on s'expose à des liquations importantes enlevant au métal toute homogénéité.

Les bronzes, d'après l'étude de Charpy que nous avons mise à contribution pour ces données si intéressantes sur le métal antifriction, paraissent donc inférieurs aux métaux blancs pour deux raisons :

1° Ils sont moins plastiques et se moulent moins bien sur l'arbre, leur résistance plus élevée ne peut d'ailleurs servir à augmenter la charge que supporte le coussinet, car on arrive ainsi à gêner le graissage et on facilite l'échauffement ;

2° Par suite de leur constitution inverse de celle des métaux blancs (*grains de cuivre plastiques englobés dans un alliage dur*), les bronzes ont beaucoup plus de tendance à gripper et cet accident a, entre autres inconvénients, celui de produire sur l'arbre une détérioration notable.

En terminant ce chapitre, nous devons signaler les emplois si variés que l'industrie peut donner à ces métaux, en dehors de l'usage spécial

dont l'étude vient d'être faite, pour la confection d'objets ou ustensiles de toutes sortes. Il ne paraît pas possible, sans sortir des limites qui nous sont imposées, d'entrer dans le détail de ces applications.

---

## CHAPITRE IV

### ALLIAGES DES MÉTAUX RARES OU PRÉCIEUX, AMALGAMES

Ce dernier chapitre du titre premier a pour objet d'étudier :

Les *alliages d'or* ;

Les *alliages d'argent* ;

Les *alliages de platine, de palladium, etc.* ;

Les *amalgames*.

**1. Alliages d'or.** — L'or pur est d'une belle couleur jaune, sa densité est 19,5 ; il fond au rouge vif à 1 045° et émet des vapeurs à une température élevée.

C'est *le plus malléable* de tous les métaux : on peut le réduire en feuilles dont l'épaisseur ne dépasse pas  $\frac{1}{10\ 000}$  de millimètre et qui laissent passer une lumière verte ; mais, s'il est très malléable, par contre, sa dureté et sa résistance à l'usure sont insuffisantes pour les emplois auxquels on le destine.

De là, la nécessité de constituer des alliages d'or; l'emploi de l'or pur étant excessivement rare.

L'or est presque toujours allié au *cuivre*, quelquefois à l'*argent* et au *palladium*.

Les alliages avec le cuivre sont les suivants :

Désignation	Or	Cuivre
<i>Monnaies</i> . . . . .	900	100
<i>Médailles</i> . . . . .	916	84
<i>Bijoux et orfèvrerie</i> }	920	80
	840	160
	750	250

( Les *souverains* anglais sont plus riches ; ils contiennent  $\frac{1}{12}$  de cuivre pour  $\frac{11}{12}$  d'or )

On accorde une tolérance de 0,002 sur le titre des monnaies et de 0,003 sur celui des bijoux.

Les alliages d'or et de cuivre ne sont pas exclusivement préparés aux teneurs ci-dessus ; la fabrication des objets d'art conduit à observer le jeu des nuances.

Les alliages d'or et de cuivre donnent l'*or rouge*, l'alliage avec l'argent donne l'*or vert* ; en combinant ces trois métaux, on obtient des couleurs intermédiaires.

Nous empruntons à l'ouvrage déjà cité de



A. Ledebur, *les Alliages métalliques*, les données suivantes <sup>(1)</sup> :

*Or très rouge* : parties égales d'or et de cuivre ;

*Or rouge pâle* : 60 parties d'or, 20 de cuivre et 20 d'argent ;

*Or jaune* : 50 parties d'or, 12 et demi de cuivre et 37 et demi d'argent ;

*Or jaune très pâle* : 33 parties et demi d'or et 67 et demi d'argent ;

*Or verdâtre* : 2 à 3 parties d'or et 1 partie d'argent.

Pour certaines pièces à préserver de l'oxydation, on allie à l'or le *palladium* avec ou sans argent (pièces d'horlogerie), ou le palladium avec cuivre et argent.

L'or est quelquefois ajouté dans une proportion de 0,2 % à 2 et demi à 3 % dans les bronzes d'aluminium employés pour les objets d'art, afin d'agir sur la coloration.

Enfin, l'or sert à dorer le bronze, le laiton, etc., pour leur donner l'éclat qui leur manque et leur assurer une inaltérabilité relative, dans la fabrication des objets communs d'orfèvrerie et de bijouterie.

Il ne nous appartient pas de décrire les diffé-

---

(1) A. LEDEBUR. — *Journal polytechnique de Dingler*, vol. 167, p. 288.

rents procédés de dorure ; nous nous contenterons de les signaler.

Ces procédés sont les suivants :

*Dorure au mercure.*

*Dorure galvanique.*

*Dorure au trempé.*

**2. Alliages d'argent.** — L'argent pur est blanc et remarquable par son éclat qui ne se ternit au contact de l'air que si celui-ci renferme des traces de gaz sulfhydrique. La densité de l'argent est 10,5.

C'est, après l'or, le métal le plus malléable ; on le réduit en feuilles minces ou en fils fins.

Il fond à 954° et se volatilise lorsqu'on le fond au chalumeau oxhydrique.

Comme pour l'or, on lui donne la dureté qui lui manque en l'alliant avec le cuivre.

Les alliages d'argent avec le cuivre sont employés à la fabrication des monnaies, des objets de bijouterie et d'orfèvrerie.

Les principaux et les plus précieux d'entre eux sont indiqués dans le tableau de la page suivante.

On accorde une tolérance de  $\frac{2}{1000}$  au-dessous du titre pour les monnaies et médailles, de  $\frac{5}{1000}$  pour la vaisselle, l'argenterie et la bijouterie.

Les alliages moins précieux sont composés d'*argent*, de *cuivre* et de *nickel* et se préparent en ajoutant l'argent à la teneur voulue dans un bain de maillechort fondu.

Désignation	Argent	Cuivre
<i>Monnaies</i> { Pièces de 5 fr. . . . .	900	100
"    { " 2 fr., 1 fr. et 0 <sup>fr</sup> ,50.	835	165
<i>Médailles, vaisselle, argenterie</i> . . .	950	50
<i>Bijouterie, vaisselle au 2<sup>e</sup> titre</i> . . .	800	200

La composition de ces alliages employés surtout à la confection des couverts de table est en général :

*Argent* : 30 à 40 % ; *cuivre* : 60 à 40 % ;  
*nickel* : 5 à 3 % , avec des traces de zinc.

L'alliage d'argent pour *soudure* se prépare ordinairement en fondant ensemble des déchets de laiton et d'argent dans la proportion de 7 parties d'argent et de 5 à 3 % de laiton.

Enfin, nous signalerons pour mémoire les procédés d'*argenture* ayant pour objet de recouvrir d'une mince couche d'argent un assez grand nombre de métaux, et particulièrement le laiton et le maillechort, pour leur communiquer ainsi la couleur, l'éclat et l'inaltérabilité du métal précieux.

Le procédé d'argenture le plus employé aujourd'hui est l'*argenture galvanique*.

Pour les objets communs (agrafes, boutons, etc.), on peut les argenter légèrement et à bon compte en les plongeant pendant quelques instants dans un liquide bouillant obtenu en projetant dans l'eau une petite quantité d'une pâte formée de 4 grammes de chlorure d'argent.

**3. Alliages de platine, de palladium, etc.** — Le platine fondu est blanc grisâtre ; pur, il est malléable, ductile et d'une ténacité presque égale à celle du fer.

La densité du métal martelé ou laminé est 21,5.

La température de fusion du platine est d'environ 1775°.

Le platine ne s'oxyde à aucune température.

Il fournit des alliages très-fusibles avec le *plomb*, l'*étain*, l'*argent*, etc. ; mais il est certain que les différents alliages formés avec le platine n'ont de raison d'emploi que lorsqu'il s'agit principalement d'obtenir un métal plus fusible que le platine tout en conservant dans une large mesure ses propriétés d'inoxidabilité.

Le platine est allié à 75 % de *cuiivre* pour la confection de certaines pièces de bijouterie dont la coloration se rapproche de celle de l'or.

Il peut être allié également au *cuivre*, au *nickel*, au *cadmium*, etc., pour certaines pièces d'horlogerie.

L'alliage *platine-iridium* ou *platine-rhodium* sert à la fabrication de fils ou couples thermo-électriques, etc.

Enfin, allié à l'or ou à l'argent, le platine trouve son emploi dans certains usages très-spéciaux qui ne sauraient être spécifiés dans le cadre limité de ce volume.

**4. Amalgames.** — Les alliages de mercure portent le nom d'*amalgames*.

Le mercure s'allie directement avec la plupart des métaux ; il est sans action sur le fer, le manganèse, le nickel, le cobalt, l'aluminium et le platine.

Le potassium et le sodium se dissolvent dans le mercure avec dégagement de chaleur, et des alliages cristallisés se séparent lorsqu'on laisse refroidir et que l'on décante l'excès du liquide.

On étame les glaces avec un amalgame d'étain qui porte le nom de *tain* ; cet alliage comporte environ 23 % d'étain et 70 % de mercure.

Le mercure allié à 25 % d'étain et 25 % de zinc est employé pour la confection des coussinets à frottement des machines électriques.

Enfin, certains mastics sont constitués par des amalgames de *cadmium* ou de *cadmium* et d'*étain*.

Etc.

---

## TITRE II

---

### THÉORIE DES ALLIAGES

---

Les notions théoriques concernant les alliages sont contenues dans de nombreux mémoires qui ont été publiés, dans ces dernières années, par le *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'Industrie nationale*. C'est à ces importants travaux que nous aurons recours pour exposer les idées qui sont admises aujourd'hui sur la constitution de ces métaux.

L'étude théorique des alliages est trop intimement liée à celle des dissolutions salines pour qu'il soit permis de passer cette dernière sous silence ; le chapitre qui lui est consacré servira d'introduction naturelle à l'exposé des données acquises sur les alliages métalliques.

---

## CHAPITRE PREMIER

---

### ÉTUDE ABRÉGÉE DES PHÉNOMÈNES DE DISSOLUTION

Il importe, comme on l'a dit ci-dessus, d'analyser brièvement tout d'abord les lois qui régissent les phénomènes des dissolutions salines.

#### I. COURBES DE SOLUBILITÉ

Les acides et les bases s'emploient le plus souvent en dissolution aqueuse ; c'est au sein de l'eau que ces corps réagissent. L'action exercée par l'eau sur les sels prend dès lors une importance exceptionnelle ; car l'eau n'est pas seulement, en effet, un *dissolvant*, mais elle constitue aussi un agent chimique qui intervient directement dans les réactions.

La *solubilité* d'un sel dans l'eau varie, en général, avec la température ; pour le plus grand



nombre, elle augmente quand la température s'élève ; quelquefois, cependant, il peut en être autrement ainsi qu'il arrive pour le sel marin qui est à peu près également soluble dans l'eau à toute température.

Quand l'eau a dissous toute la quantité de sel qu'elle peut contenir à une température donnée, elle est dite *saturée*.

**1. Construction des courbes de solubilité.** — On définit la solubilité d'un sel à une température donnée, par *le poids de ce sel qui se dissout dans un poids d'eau invariable que l'on représente par 100.*

La connaissance de la solubilité des principaux sels est importante ; elle est souvent utilisée, soit pour préparer des sels peu solubles, soit pour séparer les uns des autres des sels inégalement solubles qui se trouvent mélangés.

Pour déterminer la solubilité d'un sel à une température donnée, le procédé le plus simple consiste à maintenir le liquide au contact d'un grand excès de sel dans un vase placé dans une étuve ou dans un bain-marie maintenus à la température constante à laquelle on se propose d'opérer. Si la quantité de sel employé est suffisante pour que les fragments dépassent le niveau du liquide, le liquide décanté au bout de quel-

ques heures renferme le poids maximum du sel qu'il peut dissoudre à cette température ; il est *saturé*. On évapore à sec un poids connu de ce liquide dans une capsulo tarée, et si le sel se dépose anhydre, l'excès de poids de la capsule est le poids de celui-ci ; on calcule par différence le poids de l'eau évaporée. Il est dès lors facile, en représentant par 100 le poids du liquide, de calculer le poids du sel qu'il maintenait en dissolution.

En répétant cette expérience à diverses températures aussi régulièrement espacées que possible, on dresse un tableau des solubilités qui permet de construire la *courbe de solubilité* (fig. 2).

L'eau saturée d'un sel peut encore dissoudre un autre sel ; ainsi, une dissolution saturée d'azotate de potassium peut dissoudre du chlorure de potassium ou du chlorure de sodium.

**2. Hydrates.** — Certains sels, à l'état cristallisé, sont anhydres ; tel, par exemple, l'azotate de potassium,  $\text{AzO}^3\text{K}$ .

Il est d'autres sels qui, à l'état cristallisé, sont hydratés et perdent cette eau quand on les dessèche dans le vide sec ou lorsqu'on les chauffe à des températures généralement peu supérieures à  $100^\circ$ , mais qui, dans quelques cas, peuvent atteindre  $300^\circ$ . Cette eau qui peut être

ainsi éliminée sans que les propriétés chimiques du sel soient profondément modifiées et que le sel reprend d'ailleurs dès qu'on le met au contact de l'eau, est l'eau de cristallisation.

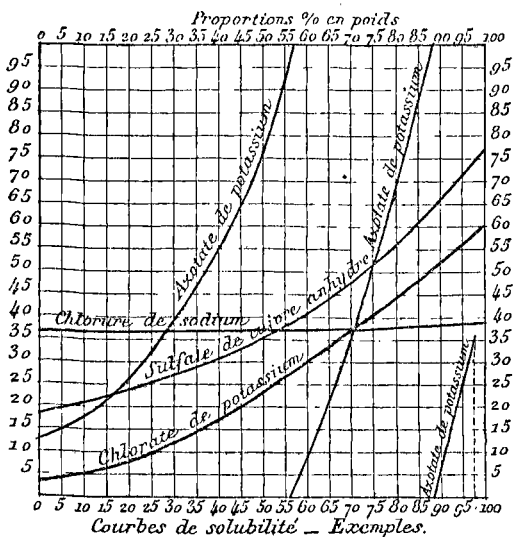


Fig. 2

Un même sel anhydre peut d'ailleurs se combiner avec des proportions d'eau différentes suivant la température à laquelle la cristallisation se produit et la forme cristalline du sel dépend de son état d'hydratation.

Quelques sels très riches en eau de cristallisation fondent quand on les chauffe, avant de se déshydrater ; ils éprouvent la *fusion aqueuse*. Puis, la matière se dessèche et, si le sel fond lorsqu'il est devenu anhydre, on dit qu'il subit la *fusion ignée*. Souvent, en perdant de l'eau sous l'action de la chaleur, le sel éprouve une altération profonde dans ses propriétés chimiques.

## II. CONGÉLATION DES DISSOLUTIONS SALINES

Les notions qui suivent sont de la plus haute importance et constituent, à proprement parler, la base de la théorie qui sera bientôt développée au sujet des alliages métalliques.

**1. Généralités sur les phénomènes de congélation.** — On sait que les solutions salines ne se congèlent pas à la température de zéro.

*Blagden* a démontré, en 1788, que l'abaissement du point de congélation de certaines dissolutions salines est généralement proportionnel à la quantité de matière dissoute. Cette loi a été l'objet d'études nombreuses, parmi lesquelles il convient de citer celles de *Despretz* (1839-

1840), de *Rossetti* (1869), de *de Coppet* (1871), de *Rüdorff* (1869) et de *Raoult* (1884).

Le premier résultat de ces études a été de montrer qu'il convient de distinguer entre les *dissolutions concentrées* et les *dissolutions très étendues*.

Pour les dissolutions très étendues, la loi de Blagden est toujours applicable; mais pour le cas des dissolutions concentrées, les relations observées sont beaucoup plus complexes.

C'est de ce dernier cas se reliant plus directement à notre sujet que nous nous occuperons presque exclusivement.

Les recherches de Guthrie (*Philosophical Magazine*, 4<sup>e</sup> série, t. XLIX et 5<sup>e</sup> série, t. II; 1875-1876) ont confirmé d'une manière générale les résultats obtenus par les expérimentateurs précités, mais elles ont éclairé la question d'un jour tout-à-fait nouveau.

**2. Cryohydrates.** — Les études de Guthrie ont porté d'abord sur les solutions de sel marin.

Quand on soumet au refroidissement une solution *étendue* de sel, la glace commence à se former à une température d'autant plus basse que le poids de sel dissous est plus grand; mais c'est de l'*eau pure* qui se congèle.

La liqueur se *concentre* donc à mesure que la

température s'abaisse et, à  $-22^{\circ}$ , elle se prend en masse.

Sa composition correspond alors à la formule  $\text{NaCl} + 10\text{H}^2\text{O}$ , et sa teneur en sel anhydre est de 23,8 %.

Quand on soumet au refroidissement une solution *concentrée* de sel marin, on obtient d'abord, à une température suffisamment basse, des cristaux de chlorure de sodium bihydraté  $\text{NaCl} + 2\text{H}^2\text{O}$  et, par conséquent, la liqueur perd de sa concentration jusqu'à  $-22^{\circ}$ ; la portion non encore solidifiée possède justement la composition  $\text{NaCl} + 10\text{H}^2\text{O}$  et se prend en masse par le refroidissement.

Ces faits s'expliquent en admettant l'existence d'un *cryohydrate* de sel marin à 10 molécules d'eau (*hydrate de congélation*), solide au-dessous de  $-22^{\circ}$ , et subissant à cette température la fusion aqueuse que certains hydrates définis ne subissent qu'à haute température.

Guthrie estime que l'existence du cryohydrate ou hydrate de congélation  $\text{NaCl} + 10\text{H}^2\text{O}$ , permet de saisir les particularités que présente l'emploi du mélange réfrigérant de neige et de sel marin. La température produite par le mélange serait justement  $-22^{\circ}$ , c'est-à-dire la température de fusion du cryohydrate; de telle

sorte que le degré de froid obtenu serait indépendant, dans de larges limites, de la proportion et de la température initiale des corps mêlés.

*Un cryohydrate peut être considéré comme résultant de la solidification d'une solution qui est en équilibre, à la fois, avec le sel solide et avec la glace pure.*

Nous reproduisons (fig. 3) le diagramme de

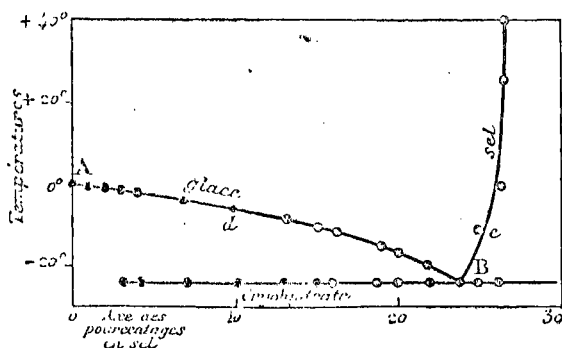


Fig. 3

Guthrie représentatif du refroidissement d'une dissolution de sel marin et dont les points correspondent aux arrêts d'un thermomètre plongé dans cette dissolution.

La courbe représentant le diagramme est à deux branches qui s'expliquent en voyant ce

qui se passe dans le refroidissement d'une dissolution de sel à deux titres différents. La température de la dissolution à 10 %, lentement refroidie, cesse de s'abaisser à  $-8^{\circ}$ , au point *d* de la branche AB, ce qui correspond à la congélation et à la séparation de l'eau sous forme de glace pure non salée; puis la température baisse jusqu'à  $-22^{\circ}$ , point où se solidifie le cryohydrate du sel. Plus la dissolution originale est concentrée, plus son point de congélation s'abaisse, mais le cryohydrate se congèle toujours à  $-22^{\circ}$ , et ce point coïncide, pour un titre de 23,5 % de sel, avec le point de congélation même de la dissolution.

La courbe de refroidissement du sel est très raide, car le point de fusion du sel pur est à  $700^{\circ}$ . Considérons, sur cette courbe, le point *e* représentatif d'une dissolution à plus de 23,5 %, soit à 25 % de sel; il s'en sépare d'abord du sel à  $-12^{\circ}$  puis le cryohydrate, sel et glace, toujours à  $-22^{\circ}$ , ce qui explique les deux branches du diagramme reliées par une droite.

On verra ultérieurement, dans le premier exemple, des phénomènes de ce genre se rapportant aux alliages métalliques; combien une pareille digression était indispensable.

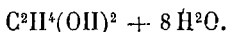
Enfin, nous ajouterons que les faits ci-dessus



signalés ne sont pas particuliers, bien entendu, au sel marin.

Tous les sels étudiés par M. Guthrie lui ont fourni des cryohydrates, contenant en général beaucoup plus d'eau que les hydrates des mêmes sels jusqu'alors connus. L'iodure de potassium que l'on ne connaît qu'à l'état anhydre, donne un cryohydrate à 8,5 molécules d'eau : le sulfate de sodium en donne un à 165 molécules.

En outre, les liquides peuvent aussi fournir des cryohydrates : le cryohydrate d'alcool solide ( $- 34^{\circ}$ ), correspond à la formule



La dissolution aqueuse saturée d'éther se solidifie à  $- 2^{\circ}$  en une masse homogène, combustible avec une flamme pâle.

En résumé, il importe de retenir que le corps qui, dans le cas du refroidissement des dissolutions salines, *se solidifie à la température la plus basse*, est le *cryohydrate*; ce corps a une constitution spéciale sur laquelle quelques notions sont données au § suivant.

D'une manière générale, et eu égard à la généralité de la théorie, Guthrie envisageant successivement la solidification des solutions salines dans l'eau, des mélanges de sels fondus

et enfin des *alliages métalliques* a proposé le nom d'*eutectique* pour caractériser les corps jouissant des propriétés des cryohydrates.

Ainsi, désormais nous pourrons confondre ces dénominations pour les dissolutions salines, sous réserve d'adopter exclusivement, pour les alliages métalliques à *point de fusion minimum*, le terme *eutectique* ci-dessus défini.

**3. Quelques mots sur la constitution des cryohydrates.** — Les constituants des cryohydrates ne sont pas dans la proportion des multiples simples de leurs poids atomiques ; mais leur composition n'en est pas moins bien fixée, ni leurs propriétés moins bien définies.

Ce sont des mélanges hétérogènes dans lesquels les corps sont juxtaposés dans un état de division extrême.

Offer a montré (*Berichte de l'Académie de Vienne*, 1880) que les cryohydrates, c'est-à-dire les mélanges des solutions salines aqueuses, ne forment jamais de cristaux bien nets et transparents, mais des masses opaques. L'alcool dissout la glace de ces cristaux, et laisse un réseau cristallin de sel solide.

En outre, la chaleur de dissolution d'un cryohydrate est la somme des chaleurs de dissolution de la glace et du sel, et son poids spé-

cifique est égal à la moyenne de ceux des constituants.

Les études de Ponsot, en 1895, corroborent les conclusions de Offer ; elles ont eu pour objet d'analyser au microscope la formation des cryohydrates ou cryosels <sup>(1)</sup>. En employant des sels colorés ou en utilisant les phénomènes de polarisation, Ponsot a pu constater que les cryohydrates étaient formés par des cristaux juxtaposés de glace pure et de sel solide, ce sel pouvant d'ailleurs être anhydre ou hydraté.

En préparant des lames minces, par usure, ne présentant qu'un ou deux dixièmes de millimètre d'épaisseur et susceptibles d'être examinées par transparence, G. Charpy a discerné, dans la plupart des cas, des cristaux transparents englobés dans un mélange relativement opaque, par suite des phénomènes de réfraction que produisent les cristaux très ténus dont il est formé ; ces cristaux peuvent d'ailleurs être distingués, sous de forts grossissements, dans les parties les plus minces de la plaquette.

---

(1) PONSOT. — *Recherches sur la congélation des solutions aqueuses étendues*. Thèse de doctorat, Paris, Gauthier-Villars, 1896.

---

## CHAPITRE II

—

### ANALOGIES DES PHÉNOMÈNES DE SOLIDIFICATION, DES ALLIAGES MÉTALLIQUES ET DES PHÉNOMÈNES DE CONGÉLATION DES DISSOLUTIONS SALINES

Les *alliages métalliques* en fusion correspondent aux dissolutions d'un sel ou d'un mélange de sels.

Les *combinaisons chimiques* des alliages métalliques correspondent aux hydrates cristallisés.

Les *alliages eutectiques* correspondent aux cryohydrates.

On sait que le cryohydrate se forme de lui-même quand on refroidit une solution de concentration quelconque, l'alliage eutectique se forme aussi de lui-même, lors du refroidissement d'un alliage de composition quelconque.

## I. COMBINAISONS DES ALLIAGES MÉTALLIQUES

II. Le Chatelier, dans une communication faite en 1895 à l'Académie des Sciences, a appelé particulièrement l'attention sur ces combinaisons chimiques des alliages métalliques, admises aujourd'hui sans contestation par tous les savants, mais signalées à peine dans les traités concernant ces métaux.

Lorsque deux métaux, par exemple, peuvent se mélanger en toutes proportions, il est nécessaire de distinguer comme il suit les alliages formés ; les uns sont de véritables combinaisons chimiques produites avec dégagement de chaleur par l'union de multiples simples des poids atomiques, ils correspondent aux hydrates ; les autres, qui forment la partie qui se solidifie la dernière quand on laisse refroidir un alliage quelconque, présentent une composition parfaitement constante, mais qui n'est pas, en général, exprimable par une formule simple, ce sont les eutectiques qui correspondent aux cryohydrates.

On trouvera, dans le *Bulletin de la Société d'encouragement* (avril 1895), les différentes méthodes indiquées par Le Chatelier, pour isoler

certains de ces alliages absolument définis, tels que  $\text{Sn.Cu}^3$ ,  $\text{Zn}^2.\text{Cu}$ ,  $\text{Al.Cu}$ ,  $\text{Cr.Zn}$ .

D'une manière générale, il est permis d'affirmer qu'il est possible d'isoler, dans tous les cas, les combinaisons définies des alliages métalliques, à condition de les produire en présence d'un excès du métal le plus attaquable et de traiter le culot métallique par un réactif approprié.

Ces combinaisons métalliques, ajoute II. Le Chatelier, sont dures et cassantes, comme les phosphures, les sulfures, les carbures, etc.; elles ne participent en rien à la malléabilité des métaux constituants.

*C'est ce fait qui donne l'explication de la dureté des alliages que l'on obtient en réunissant des métaux aussi mous que le cuivre, d'une part, et l'étain, le zinc, l'aluminium de l'autre.*

Ce résultat important est à retenir.

Nous citerons, à titre d'exemple, la méthode employée par Le Chatelier pour isoler  $\text{Sn.Cu}^3$ .

En fondant du cuivre avec un excès d'étain, et reprenant le culot par  $\text{H.Cl}$  concentré et froid, on isole des lamelles cristallines blanches, tout à fait inattaquables à l'acide. On obtient les meilleurs résultats en partant d'un alliage riche en étain : 2 parties de Sn pour 1 de Cu, par

exemple, et en soumettant les lamelles à une seconde attaque à l'acide, après les avoir finement broyées au mortier d'agate. La composition du résidu cristallin ainsi obtenu est, à très peu de chose près, celle qui répond à la formule  $\text{SnCu}^3$  (1).

## II. LES ALLIAGES EUTECTIQUES

L'étude microscopique des alliages eutectiques des métaux a fourni à Charpy des résultats identiques à ceux que l'étude microscopique des cryohydrates avait donnés à Ponsot.

Le premier de ces expérimentateurs a préparé 200 grammes environ de l'alliage eutectique d'étain et de bismuth en fondant ensemble de l'étain et du bismuth dans la proportion de 46,1 de bismuth pour 53,9 d'étain. Quand la plus grande partie de l'alliage est solidifiée par refroidissement lent, on décante la partie restée

---

(1) Cette combinaison  $\text{SnCu}^3$  est une de celles indiquées antérieurement par Calvert, Mathiessen, Riche, etc., comme résultant d'expériences relatives à certaines propriétés physiques : densité, conductibilité électrique, liquation, etc.

Par contre, les combinaisons  $\text{Sn.Cu}^2$  et  $\text{Sn.Cu}^4$  sembleraient ne pas avoir d'existence réelle.

liquide qui possède alors exactement la composition de l'alliage eutectique.

Cette partie décantée sert, après solidification, à l'étude de la structure. L'examen d'une plaquette polie et décapée à l'acide chlorhydrique très étendu qui ne dissout que l'étain, montre que les deux métaux sont simplement juxtaposés ; les cristaux sont excessivement ténus et ne se distinguent nettement qu'avec d'assez forts grossissements.

Les alliages eutectiques se présentent donc, à l'état solide, sous forme de simples mélanges de leurs constituants. L'état de division extrême de ces constituants suffit à leur donner des propriétés particulières ; on conçoit notamment pourquoi, dans un grand nombre de cas, ils présentent une cassure conchoïdale qui conduit, à première vue, à les considérer comme des corps homogènes.

Cela posé, prenons un cas simple pour concevoir la formation de l'alliage eutectique dans le phénomène de la solidification des alliages d'une série.

Considérons avec Osmond <sup>(1)</sup> les divers alliages

---

(1) OSMOND. — *La métallographie considérée comme méthode d'essai*. (Associat. intern. pour l'essai des mat., Congrès de Stockholm, 1897).



de l'argent avec le cuivre. La courbe de fusibilité de ces alliages (*fig. 4*) a été construite dès 1875 par Roberts-Austen, aussi exactement qu'il était possible de le faire à cette époque, contrôlée en partie par le même savant en 1891 à l'aide du pyromètre Le Chatelier et refaite de nouveau en 1897 par Heycock et Neville.

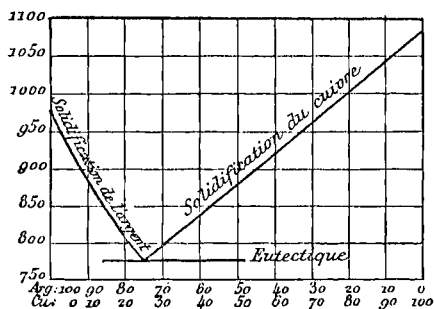


Fig. 4

Cette courbe est donc parfaitement connue ; elle se compose de deux branches inclinées partant des points de fusion respectifs du cuivre et de l'argent et se coupant à la température de 770°, pour une composition qui semble répondre à la formule  $\text{Ag}^3, \text{Cu}^2$ . Une troisième branche, horizontale, passe par le point de rencontre ; on apprendra plus loin qu'il faut en conclure que le cuivre et l'argent ne forment pas de composé défini ni de mélange isomorphe.

L'une des branches de la courbe correspond au début de la solidification du cuivre, l'autre au début de la solidification de l'argent et la branche horizontale à la solidification simultanée des deux métaux. En d'autres termes, suivant la composition de l'alliage, le métal en excès commence à se séparer de la dissolution à une température déterminée et continue à se précipiter jusqu'à ce que la partie restée liquide contienne 72 d'argent contre 28 de cuivre ; à ce moment le cuivre est saturé d'argent, l'argent est saturé de cuivre et les deux métaux se solidifient simultanément à température constante sous forme d'un mélange mécanique.

C'est l'*alliage eutectique*, le seul dont les lingots ne se liquatent pas, ainsi que *Levol* l'avait depuis longtemps montré (*Ann. de Phys. et Chimie*, 3<sup>e</sup> série, t. XXXVI, p. 193, 1852).

Cet alliage eutectique n'est pas homogène, on le sait ; la micrographie appliquée à une coupe bien polie de ce métal permet de reconnaître le cuivre distribué, soit en fines ponctuations, soit en lamelles droites ou courbes alternant avec les lamelles blanches de l'argent. Le corps ainsi formé n'est pas un composé chimique  $\text{Ag}^3\text{Cu}^2$ , mais bien un mélange.

Dans les autres alliages du groupe, selon que

la teneur en argent est supérieure ou inférieure à 72, il se dépose tout d'abord, soit des cristallites d'argent, soit des cristallites de cuivre qui grossissent jusqu'à ce que la partie restée fluide ait atteint la composition voulue; l'eutectique se solidifie alors à température constante en englobant les cristallites.

### III. EXAMEN PLUS GÉNÉRAL DU PHÉNOMÈNE DE SOLIDIFICATION DES ALLIAGES BINAIRES

On a vu que certains alliages étaient des composés absolument définis, véritables combinaisons chimiques; on a défini ensuite l'alliage dit eutectique qui n'est qu'un mélange.

Il reste à analyser le phénomène de la solidification d'un alliage dans un cas plus général.

Quelle est la nature des composés, définis ou non, combinaisons ou mélanges qui auront pu se former dans un alliage solidifié?

En d'autres termes, comment remonter de l'inspection des courbes de fusibilité à la connaissance de la constitution des alliages?

Comment reconnaître si ces alliages sont constitués par la simple juxtaposition de cristaux des deux métaux en présence, ou s'il s'est

formé des combinaisons chimiques définies, ou encore des mélanges isomorphes ?

Nous aurons recours, pour résoudre cette importante question aux remarquables études de Le Chatelier et de A. Charpy (*Bulletin de la Société d'encouragement*, mai 1895 et mars 1897).

Dans son mémoire sur la fusibilité des alliages métalliques, II. Le Chatelier rapporte à trois types les courbes de fusibilité normales des *alliages binaires*.

Les trois cas envisagés sont étudiés successivement ci-après.

**1. Les deux métaux en présence ne donnent ni combinaisons définies, ni mélanges isomorphes.** — Les expériences faites pour le cas semblable des solutions aqueuses (*cas d'une dissolution de sel marin précédemment étudié*) ou des mélanges de sels montrent que la courbe complète de fusibilité se compose de *deux branches* correspondant chacune au dépôt de l'un des corps et partant de son point de fusion propre.

Ainsi, les mélanges de chlorure de sodium et de carbonate de sodium donnent deux branches partant l'une du point de fusion du chlorure de sodium, 778°, et l'autre, du carbonate de sodium, 820°, et se rencontrent à la température de 620°

pour un mélange formé d'environ 1 partie de carbonate de sodium pour 2 parties de chlorure de sodium.

*Lorsque, pour un alliage métallique, on trouvera de même une courbe de fusibilité composée de deux branches seulement, on pourra en conclure que, pendant la solidification, les deux métaux isolés se sont simplement juxtaposés l'un à l'autre.*

On a vu précédemment que tel était le cas de la série des alliages *argent-cuivre*.

Nous citerons encore, comme rentrant dans cette catégorie, les alliages d'*étain* et de *bismuth*, de *plomb* et d'*antimoine*, de *plomb* et d'*étain*, de *zinc* et d'*aluminium*.

Il est enfin toute une série d'alliages dont l'importance industrielle est considérable et dont les courbes de fusibilité ne comprennent également que deux branches ; ce sont les *aciers*.

On trouvera dans un volume de l'Encyclopédie (L. GAGES. — *Travail des métaux dérivés du fer*), l'indication détaillée des analogies existant entre les courbes de fusibilité de ces métaux ferreux et celles des alliages du groupe *argent-cuivre*. Les mêmes remarques pourraient être reproduites en constatant l'analogie frappante existant entre

la constitution des aciers et celle des alliages d'étain et de bismuth notamment.

Il suffira de rappeler qu'aux hautes températures, l'acier est une solution du carbure  $\text{Fe}^3\text{C}$  dans une forme allotropique du fer : pendant le refroidissement lent, cette solution laisse déposer, soit du fer, soit du carbure quand elle est saturée de l'un ou de l'autre ; et elle atteint ainsi une composition déterminée, toujours la même, quel que soit le point de départ, la composition de l'*eutectique*.

La *perlite* des aciers correspond à l'alliage eutectique des alliages précédemment étudiés ; les aciers étant formés suivant les proportions de fer et de carbure de fer qu'ils contiennent, et après refroidissement lent, soit de ferrite et de perlite, soit de perlite pure ou d'un mélange de cémentite et de perlite.

**2. Les deux métaux en présence donnent une ou plusieurs combinaisons définies.** — Lorsque les corps mêlés peuvent se combiner, comme le font les sels avec l'eau et certains sels mêlés entre eux, la courbe de fusibilité est formée d'un nombre correspondant de branches distinctes qui se coupent à angle vif.

La branche de courbe relative aux combinaisons présente parfois une forme particulière

tout-à-fait caractéristique. Si la combinaison peut se fondre sans se décomposer en abandonnant un de ses constituants à l'état solide, condition réalisée pour quelques hydrates, la branche de la courbe de fusibilité présente un maximum de température correspondant à un mélange de composition identique à celle de la combinaison définie ou au moins très voisine.

Le Chatelier fait suivre ces considérations d'une remarque fort importante sur laquelle il convient d'insister.

*L'existence d'un semblable maximum dans la courbe de fusibilité d'un alliage pourra être considérée comme l'indice certain d'une combinaison définie ; mais la réciproque ne serait pas exacte, c'est-à-dire que l'absence du maximum ne prouve nullement l'absence de combinaison.*

Ainsi, ajoute Le Chatelier, le sulfate de sodium décahydraté présente une branche de solubilité sans maximum. On peut toujours concevoir l'existence théorique de ce maximum, mais il n'est pas toujours observable, parce que les diverses branches de la courbe de solubilité se rencontrent et se limitent en laissant le maximum en dehors de leur région utile. C'est ainsi que la branche du sulfate de sodium décahydraté

est limitée à 33°, par sa rencontre avec la branche du sulfate de sodium anhydre ; le maximum doit se produire à une température plus élevée à laquelle on ne peut pas faire cristalliser des solutions de sulfate hydraté.

Les maxima dont il vient d'être question se rencontrent dans les courbes de fusibilité de certains alliages de cette série, indiquant sans doute comme possible, l'existence de combinaisons définies. C'est ainsi que M. Roberts-Austen a caractérisé les deux combinaisons Sb. Al et Au. Al<sup>2</sup>, dont les points de fusion, voisins tous les deux de 1100°, sont supérieurs aux points de fusion de chacun des métaux constituants, fait assez rarement observé jusqu'ici.

H. Le Chatelier a également observé des maxima correspondant à des combinaisons définies dans les courbes de fusibilité se rapportant aux alliages *cuivre-étain*, *cuivre-antimoine*, *cuivre-aluminium*, ces combinaisons définies étant, comme l'indiquent les courbes de la *fig. 5*, Al. Cu<sup>3</sup>, Al<sup>2</sup>. Cu, Sn. Cu<sup>3</sup> et Sb. Cu<sup>2</sup>.

Enfin, M. Le Verrier signale dans les alliages *aluminium-étain* le composé défini Al<sup>4</sup>. Sn (équivalents).

Les alliages de *nickel* et d'*étain* ont une constitution analogue à celle des alliages de cuivre et



d'antimoine ; la grande dureté du composé défini explique que la présence de petites quantités d'étain augmente considérablement la dureté du nickel. Il serait en dehors du cadre de ce traité d'analyser ici la nature des divers alliages

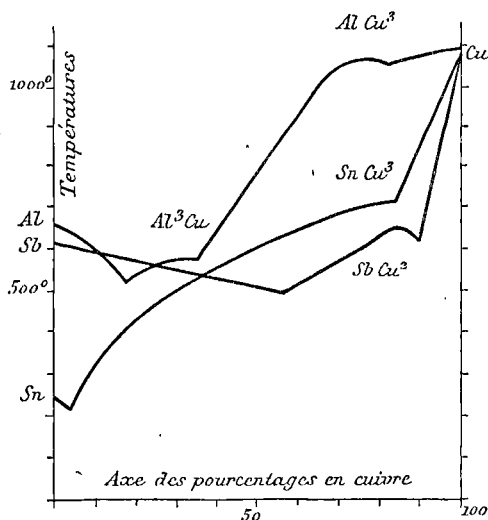


Fig 5

précités ; il convient toutefois de signaler la composition plus complexe de ces alliages eutectiques, puisqu'ils sont nécessairement formés avec les composés définis dont il vient d'être question.

**3. Les deux métaux en présence forment des mélanges isomorphes.** — Dans ce cas, la courbe de fusibilité est continue et se rapproche plus ou moins de la droite qui joint les points de fusion des deux corps isolés.

Ces alliages sont alors formés, quelle que soit leur composition, d'une seule espèce de cristaux occupant toute la masse; en général, la composition et les propriétés varient d'une façon continue dans chaque cristal.

On est donc amené à concevoir le phénomène de la façon suivante : au moment où la solidification commence, il se forme des arêtes cristallines du corps le moins fusible et les cristaux s'accroissent ensuite par dépôt d'un mélange des deux métaux dont la teneur en celui qui est le moins fusible augmente graduellement.

Les alliages de *bismuth* et d'*antimoine* étudiés par G. Charpy correspondent entièrement à des *mélanges isomorphes*.

S'il n'y a qu'un petit nombre de métaux susceptibles de former des *mélanges isomorphes*, il semble qu'il y ait plusieurs cas de composés définis de deux métaux isomorphes avec l'un d'eux.

Ce fait singulier a été signalé pour la première fois par Bakkhuis Roozeboom pour les mélanges de sels avec les mélanges de chlorure de fer et

de chlorure d'ammonium qui donnent une combinaison définie susceptible de se mélanger isomorphiquement avec le chlorure d'ammonium en excès, mais pas avec le chlorure de fer.

Les procédés de l'analyse micrographique ont conduit à prévoir, pour les métaux : un composé d'étain et d'antimoine contenant environ 50 % d'étain et isomorphe avec l'antimoine ; un composé d'antimoine et d'argent et isomorphe avec l'argent, etc.

#### IV. LE PHÉNOMÈNE DE LA LIQUATION

Le phénomène de la *liquation* dans le refroidissement des alliages à partir de leur point de fusion est bien connu, mais sa description, souvent confuse, et variable d'ailleurs avec les diverses associations de métaux considérées n'explique pas comment il se produit.

Le mécanisme de ce phénomène peut être indiqué très simplement en s'appuyant sur les théories qui ont été précédemment développées.

Voici comment, d'après H. Le Chatelier, on peut s'en rendre compte (*Bulletin de la Société d'encouragement*, mai 1895) :

Au moment où la solidification de l'alliage

commence, il se dépose (en laissant de côté pour le moment les mélanges isomorphes), soit un métal pur, soit une combinaison définie.

En général, cette solidification d'un élément déterminé va faire changer la composition de la partie restée liquide, et sa solidification ne pourra continuer à progresser que si la température s'abaisse.

Au fur et à mesure de la solidification, la température et la composition de la partie restée liquide se modifient progressivement, et le point figuratif, représentant les valeurs correspondantes de ces deux grandeurs, décrira une des branches de la courbe de fusibilité, celle qui se rapporte au corps en train de se solidifier.

Si l'on est parti, par exemple, d'un alliage à deux parties de Pb pour une de Sn, il se déposera d'abord du plomb et la partie restée liquide deviendra de plus en plus riche en étain. Enfin, il arrivera un moment où la branche de courbe, correspondant à la cristallisation du plomb, rencontrera celle qui correspond à la cristallisation de l'étain. A partir de ce moment, il se déposera simultanément du plomb et de l'étain dans la proportion même où ils se trouvent dans la partie liquide; soit environ poids égaux des deux métaux. La composition de la partie li-

liquide restera alors invariable, et sa solidification s'achèvera à température constante.

Si, pendant le refroidissement, la température, a été maintenue uniforme dans toute la masse, les cristaux de plomb plus lourds tendront à se réunir vers le fond, et le mélange final de plomb et d'étain tendra à se réunir à la partie supérieure. Si l'on était parti d'un alliage très riche en étain, ce serait de l'étain pur qui se serait d'abord solidifié et serait venu s'accumuler à la surface ; le mélange à poids égaux des deux métaux se serait solidifié à la fin et serait venu se réunir à la partie inférieure.

Théoriquement, on devrait donc constater une différence absolue de composition d'un point à un autre du lingot solide. Pratiquement, les différences de composition accusées par l'analyse chimique sont généralement peu considérables d'un point à un autre du lingot. Cela tient à ce que les métaux, en se solidifiant, ne se déposent pas en gros cristaux comme les sels des solutions aqueuses, mais généralement en aiguilles ou lamelles très fines, qui forment un feutrage dans tout le liquide et s'appuient les uns sur les autres de façon à rendre leur séparation par densité impossible.

L'hétérogénéité, d'un point à un autre de la

masse, porte sur des distances qui ne dépassent pas quelques fractions de millimètre.

Au cas où les deux métaux ne donnent ni combinaisons définies, ni mélanges isomorphes, il y a *un seul alliage eutectique*.

Dans le cas d'alliages donnant des combinaisons définies, il y aura, en général, *deux alliages eutectiques* à point de fusion minimum et intermédiaires chacun entre la combinaison définie et l'un des métaux purs (alliages cuivre-antimoine).

S'il y a deux combinaisons définies, il y aura *trois alliages eutectiques* (alliages cuivre-aluminium).

La solidification initiale de l'alliage laisse d'abord déposer l'un des métaux ou l'une des combinaisons et se termine par la solidification de l'un des alliages eutectiques, sauf dans le cas où la composition de l'alliage est celle de la combinaison définie. Dans ce cas, la solidification se fait entièrement à température constante, comme pour les alliages eutectiques.

Les alliages isomorphes se solidifient tantôt avec une composition identique à celle de l'alliage fondu, et alors la solidification s'achève à température constante, tantôt avec une composition différente, et alors la partie fondue revient

progressivement à la composition d'un même alliage à point de fusion minimum.

#### V. COURBES DE FUSIBILITÉ ANORMALES

Les courbes de fusibilité dites *anormales* concernent les alliages dont la courbe de refroidissement indique des dégagements de chaleur successifs qui montrent ainsi que la solidification s'effectue en plusieurs temps.

On peut citer, comme rentrant dans ce cas, les courbes de fusibilité correspondant à la série des alliages cuivre-étain (*bronzes*) et des alliages cuivre-zinc (*laitons*), ainsi que celles qui correspondent aux alliages d'*antimoine* et d'*argent*.

Nous ne saurions, sans sortir des limites de cette étude, analyser dans ce traité les phénomènes complexes auxquels se rapportent les points singuliers constatés dans certaines courbes de fusibilité. Le lecteur devra se reporter, pour plus amples détails, aux mémoires précédemment cités.

---

## CHAPITRE III

### THÉORIE DES ALLIAGES TERNAIRES

La constitution des alliages binaires est indiquée par plusieurs procédés, mais surtout, comme nous l'avons vu, par l'aspect des courbes de fusibilité qui permettent d'appliquer à ces alliages les théories établies et vérifiées à propos des solutions.

Dans le cas des alliages ternaires, c'est encore l'étude de la fusibilité qui donnera le plus de renseignements utiles, l'étude microscopique permettant, comme dans le cas des alliages binaires, de contrôler ces indications.

#### I. SURFACES DE FUSIBILITÉ

La composition d'un alliage ternaire peut être représentée au moyen du diagramme triangulaire, employé par Thurston, Roozeboom, G. Charpy, etc.



Soit ABC (*fig. 6*), un triangle *équilatéral*; on sait que la somme des distances d'un point M intérieur au triangle est égale à la hauteur du triangle. Plaçons, aux sommets du triangle, l'un des métaux d'un alliage ternaire; le point M représentera l'alliage contenant

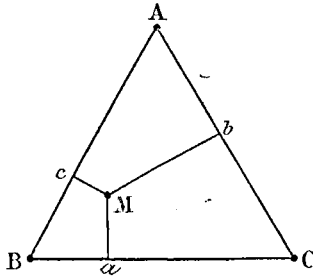


Fig. 6

des proportions de chaque métal données par les distances de ce point aux côtés du triangle.

Ainsi,  $Ma$  représentera la proportion du métal placé en A;  $Mb$ , la proportion du métal placé en B;  $Mc$  la proportion du métal placé en C.

La somme constante  $Ma + Mb + Mc$  sera prise égale à 100. Pour représenter la fusibilité d'un des alliages considérés, il suffira d'élever au point M une perpendiculaire au plan du triangle ABC et de porter sur cette perpendiculaire une hauteur proportionnelle à la température de fusibilité de l'alliage dont la composition est représentée par le pied de la perpendiculaire.

Le lieu des points ainsi obtenus, quand le

point M a décrit toute la surface du triangle, est appelé *surface de fusibilité*.

Il est clair qu'on ne pourra compter que sur un nombre limité d'expériences et que la surface sera pratiquement construite avec une certaine approximation en se guidant sur la loi de continuité et en procédant par interpolation.

La détermination des surfaces de fusibilité est le seul moyen qui permette d'élucider complètement la constitution des alliages ternaires ; mais cette détermination, assez longue même dans les cas simples, nécessite, pour la plupart des groupements complexes que présentent les alliages ternaires, un nombre très considérable d'expériences.

Il n'est pas à notre connaissance que la construction de ces surfaces ait pu être réalisée pour les alliages ternaires les plus connus. On a recours, le plus souvent, pour l'étude de leur constitution, à l'examen microscopique.

Quoi qu'il en soit, et en raison de l'importance de la question, nous étudierons, d'après Charpy, à titre d'exemple, la construction de la surface de fusibilité de l'alliage ternaire, *plomb-étain-bismuth*.

Les considérations faites à ce sujet auront le grand avantage de montrer combien est vaste le

champ ouvert à la théorie depuis qu'on a eu l'idée de comparer les phénomènes de solidification des alliages à ceux qui leur correspondent dans les dissolutions salines.

Enfin, l'examen des procédés de l'analyse micrographique qui sera fait ultérieurement montrera qu'aucune méthode de recherche sur la constitution des alliages n'est exclusive et qu'actuellement ces méthodes marchent, le plus souvent, parallèlement en se prêtant un mutuel appui.

## II. SURFACE DE FUSIBILITE DE L'ALLIAGE PLOMB-ÉTAIN-BISMUTH

La surface de fusibilité des alliages *plomb-étain-bismuth* a été déterminée par Charpy au moyen des résultats fournis par 56 mesures dont on trouvera le tableau dans le *Bulletin de la Société d'encouragement* (juin 1898, p. 687).

A l'aide de ces mesures, on a pu tracer, par interpolation graphique, les isothermes de la surface de fusibilité marquées sur la *fig. 7* en traits pointillés de 25 en 25° ; la surface a été construite en plâtre.

La surface de fusibilité dont il s'agit se com-

pose de trois nappes qui se coupent suivant les lignes marquées en traits pleins  $E\epsilon$ ,  $E'\epsilon$ ,  $E''\epsilon$ .

Les points  $E$ ,  $E'$ ,  $E''$  correspondent respectivement aux alliages eutectiques binaires de plomb et de bismuth, de plomb et d'étain, d'étain et de

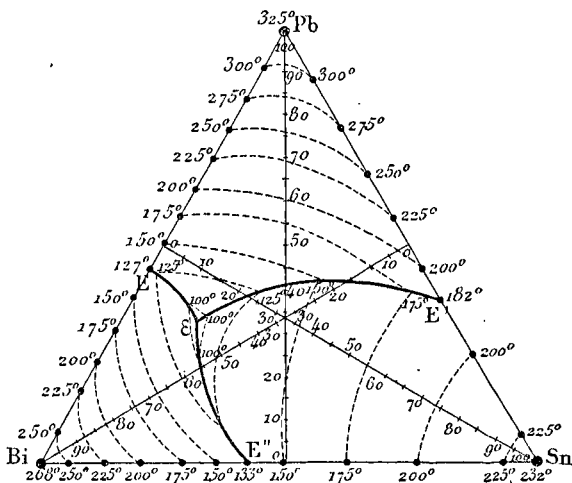


Fig. 7

bismuth. Le point  $\epsilon$  correspond à l'alliage eutectique ternaire ; il contient environ 32 % de plomb, 15,5 % d'étain, 52,5 % de bismuth et fond à 96°.

Cette forme de surface de fusibilité indique, suivant la composition de l'alliage, il se

sépare, au commencement de la solidification, soit de l'étain, soit du plomb, soit du bismuth, suivant que le point représentatif est situé sur l'une ou l'autre des nappes de la surface.

Les alliages dont la composition est représentée par des points situés sur la nappe  $PbE_{\varepsilon}E'$  peuvent être, à l'état liquide, en équilibre avec le plomb solide; ils laisseront déposer du plomb au moment où ils commencent à se solidifier; de même, les alliages dont les points représentatifs sont sur les nappes  $BiE_{\varepsilon}E''$  et  $SnE'_{\varepsilon}E''$  laisseront déposer, respectivement, du bismuth et de l'étain au moment où ils commenceront à se solidifier.

Les alliages dont les points représentatifs sont sur la ligne  $E'_{\varepsilon}$  peuvent être, à l'état liquide, en équilibre avec le plomb et l'étain solide; au commencement de leur solidification, ils laisseront déposer à la fois du plomb et de l'étain; de même, les alliages dont les points représentatifs sont situés sur les lignes  $E_{\varepsilon}$  ou  $E''_{\varepsilon}$  laisseront déposer soit du plomb et du bismuth, soit de l'étain et du bismuth.

Enfin, l'alliage eutectique ternaire pourra être en équilibre, à l'état liquide, avec le plomb, l'étain et le bismuth solides, et laissera déposer à la fois ces trois métaux.

Considérons maintenant un alliage dont le point représentatif soit situé en A, par exemple (*fig. 8*), sur la nappe  $BiE_2E''$  de la surface de fusibilité.

Chaufons cet alliage de manière à l'amener à l'état liquide et laissons le se refroidir. Quand la température atteint la valeur qui correspond à

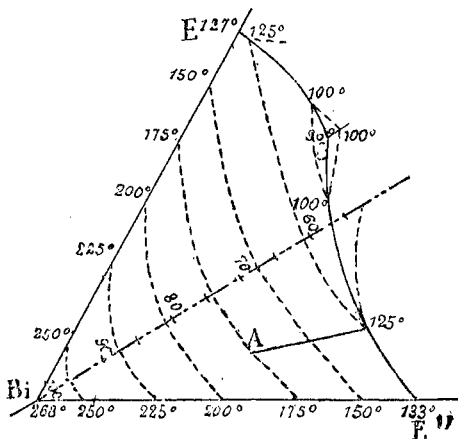


Fig. 8

l'isotherme passant par le point A, soit dans le cas actuel,  $175^\circ$ , la solidification commence, et il se sépare du bismuth solide. La composition de la partie liquide se modifie par suite, et à mesure que le bismuth se sépare, le point qui représente

la composition de la partie liquide se déplace sur la ligne BiA, puisque les proportions relatives de plomb et d'étain ne changent pas. Le point représentatif arrive ainsi sur la ligne  $E''\varepsilon$  ; à ce moment, la température étant ici de  $125^\circ$ , l'alliage laisse déposer à la fois du bismuth et de l'étain, et le point représentatif se déplace sur la ligne  $E''\varepsilon$  ; quand il arrive en  $\varepsilon$ , la partie liquide a la composition de l'alliage eutectique ternaire et se solidifie à température constante en laissant déposer simultanément les trois métaux.

Si l'on construit la courbe de refroidissement, on constate qu'elle présente une forme parfaitement continue tant que l'alliage reste à l'état liquide ; au moment où une partie se sépare à l'état solide, la courbe présente un point anguleux et prend une nouvelle direction ; un deuxième changement de direction se produit, quand il se sépare deux métaux au lieu d'un ; enfin la solidification de l'alliage eutectique qui se fait à température constante, se traduit par un palier horizontal de la courbe de refroidissement.

Telle est l'idée générale que nous voulions donner sur la construction des surfaces de solubilité et sur les déductions qu'on est en droit de tirer de leur examen.

## CHAPITRE IV

—

### MÉTHODES SERVANT A LA DÉTERMINATION DES PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DES ALLIAGES

L'étude des courbes et surfaces de fusibilité a éclairé d'un jour nouveau la question de la constitution des alliages ; ainsi s'est créée une méthode vraiment scientifique qui a remplacé les anciens procédés descriptifs servant à différencier ces métaux.

Il convient maintenant d'aller plus loin dans l'exposé des autres méthodes de recherches sur ce sujet et de donner un aperçu d'ensemble sur les procédés employés.

#### 1. MÉTALLOGRAPHIE

Les recherches relatives à la métallographie microscopique sont de date récente et cependant



les résultats obtenus sont déjà considérables (').

La technique même du procédé exigeant des développements très étendus, nous devons nous borner à quelques indications générales.

II. Le Chatelier considère, dans les opérations métallographiques, quatre parties distinctes :

*Préparation de la surface polie.*

*Attaque chimique.*

*Examen microscopique.*

*Préparation des alliages.*

**1. Préparation de la surface polie. —**

La préparation de la surface polie comprend le *découpage*, le *dégrossissage* et le *polissage*.

Le découpage se fait avec la scie à main ou, suivant la dureté des métaux en expérience, avec une meule mince d'émeri ; l'échantillon final destiné à l'examen devant présenter des dimensions voisines de 10 millimètres.

---

(') Voir à ce sujet : II. BEHRENS. — *Das mikroskopische Gefüge der Metalle und Legierungen*. Leipzig, 1894 ; II. LE CHATELIER. — *Sur la métallographie microscopique*. Bulletin de la Société d'encouragement, 1896 ; H. GAUTIER. — *Recherches sur la fusibilité des alliages métalliques*. Bulletin de la Société d'encouragement, 1896 ; ARNOLD. — *Engineering*, 1896, t. LXI, p. 176 ; ROBERTS-AUSTEN et OSMOND. — *Recherches sur la structure des métaux*. Bulletin de la Société d'encouragement, 1896 ; II. LE CHATELIER. — *Technique de la métallographie microscopique*. Bulletin de la Société d'encouragement, 1900.

Le dégrossissage est commencé avec la lime ou la meule et continué avec des papiers d'émeri du commerce, de grosseur décroissante. La surface obtenue doit faire déjà miroir, être bien plane et exempte de grosses rayures.

La préparation des poudres à polir exige des soins trop spéciaux pour qu'ils puissent être indiqués; nous citerons, comme matières donnant à ce point de vue les meilleurs résultats, l'*alumine*, la *potée d'émeri* du commerce, l'*oxyde de chrome* provenant de la combustion du bichromate d'ammoniaque et l'*oxyde de fer* provenant de la calcination à l'air de l'oxalate de fer.

Les supports sur lesquels ces matières sont employées pour le polissage doivent être souples, pour s'appliquer sur toute la surface de l'échantillon, mais pas plus qu'il ne faut cependant, sans quoi les parties les plus tendres de l'alliage se creusent plus profondément, et, au lieu d'une surface polie, on obtient une surface irrégulière. On peut employer, pour ces supports, l'*albumine*, la *peau*, le *papier*, le *drap*, le *velours* et le *feutre*.

Après emploi de divers papiers d'émeri préparés le plus souvent à l'albumine, le travail de polissage se continue à l'aide de disques consti-

tués par les supports dont il a été question et auxquels on donne, à l'aide d'une machine appropriée, une grande vitesse de rotation.

**2. Attaque de la surface polie.** — Le procédé, qui a semblé le plus rationnel à H. Le Chatelier, consiste à effectuer l'attaque sous l'action du courant électrique au sein d'une dissolution sans action sur le métal.

On peut alors, par l'intensité du courant, régler l'énergie de l'attaque.

Cette méthode donne d'excellents résultats avec les alliages de cuivre immergés dans des solutions diluées de potasse ou d'ammoniaque. L'intensité de courant nécessaire varie de  $\frac{1}{1000}$  à  $\frac{1}{100}$  d'ampère par centimètre carré, avec une durée d'action variant de quelques secondes à quelques minutes suivant l'intensité du courant. On emploie une pile donnant un voltage connu, 4 à 5 volts, par exemple, et on intercale des résistances appropriées.

Pour les alliages ferro-métalliques, les fers et les aciers, l'attaque ne s'effectue bien que par les procédés du *polissage-attaque* dus à Osmond (1). De la teinture d'iode du commerce étendue de

---

(1) Voir à ce sujet : L. GAGES. — *Travail des métaux dérivés du fer*, p. 118.

quatre fois son volume d'alcool ordinaire est mise sur le bout du 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 cependant pas être assez attaquée pour cesser d'être réfléchissante.

Les surfaces sont conservées, soit par vernissage, soit par immersion dans l'huile ou dans le baume.

**3. Examen microscopique.** — L'examen microscopique comporte l'emploi d'un microscope approprié. Deux points doivent, d'après H. Le Chatelier, fixer l'attention de l'expérimentateur ; ces points sont les suivants.

*L'ouverture du diaphragme*, qui commande l'angle du faisceau lumineux tombant en chaque point de la préparation, doit varier, bien entendu, avec la nature et la qualité de l'objectif. La netteté la plus grande est obtenue pour un certain angle moyen que l'on doit, dans chaque cas, régler par tâtonnement.

*La position du 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 atté-

nuer la proportion de lumière réfléchiée par les lentilles et arrivant à l'œil. Seules des recherches particulières à chaque cas permettent de se rendre compte des dispositions à prendre.

Les microscopes employés sont aujourd'hui tous organisés de manière à permettre leur usage pour la photographie microscopique, ce qui présente le grand avantage de pouvoir conserver une trace durable des différentes préparations métalliques étudiées. Les grossissements employés sont très variables, ils peuvent être de 30, 60, 100, 200 et 500 diamètres.

L'éclairage présente une importance 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 est toutefois préférable d'employer systématiquement une radiation monochromatique ; on obtient très facilement une lumière monochromatique excellente pour la photographie avec des lampes à arc de mercure dans le vide.

**4. Préparation des alliages.** — Les échantillons préparés peuvent provenir d'alliages industriels ou d'alliages préparés au point de vue spécial de la détermination des propriétés générales d'une série donnée.

Dans ce dernier cas, par exemple, II. Le Châtelier s'est proposé d'étudier les différentes combinaisons que deux métaux peuvent former ensemble. Cet habile expérimentateur a pu superposer les deux métaux de façon qu'ils ne se mêlent qu'au voisinage de leur surface de contact ; en faisant une coupe verticale du culot, il a obtenu la succession continue de tous les alliages, depuis un métal pur jusqu'à l'autre.

On conçoit qu'il serait difficile de donner ici les observations que l'examen des plaquettes permet de faire sur la constitution des divers alliages. Il suffira de rappeler que c'est à la métallographie microscopique que la science est redevable des résultats si importants acquis aujourd'hui sur la nature des alliages eutectiques.

**5. Indications fournies par la métallographie microscopique.** — L'examen microscopique ne permet pas de déterminer à coup sûr la nature des différents constituants que l'on voit juxtaposés sur les surfaces polies ou attaquées, mais il fournit à ce sujet des indications qui, rapprochées des études sur les propriétés des mêmes corps, conduisent presque à la certitude.

C'est sous la forme de *crystallites*, à arêtes courbes et mal définies, plutôt que sous la

forme de cristaux réguliers que les constituants apparaissent.

Les corps les plus durs se séparent en relief après le polissage et l'on a pu mesurer la dureté relative de deux constituants juxtaposés en les rayant sous le microscope avec des aiguilles de métaux de dureté connue. Les cristaux durs sont incontestablement formés par un *composé défini*.

La couleur sert aussi à discerner les constituants ; on distingue dans les alliages d'antimoine et de cuivre un composé violet ; dans les alliages de cuivre et de zinc ou de cuivre et d'étain, les parties riches en cuivre sont colorées en jaune, les parties riches en zinc ou en étain colorées en blanc, etc.

L'action des différents réactifs est également très utile pour séparer les constituants. Dans les alliages de plomb et d'étain, l'acide chlorhydrique recouvre les cristaux de plomb d'une couche blanche de chlorure de plomb et dissout l'étain, tandis que l'acide azotique dissout le plomb et recouvre l'étain d'une couche blanche d'acide métastannique. Dans les alliages d'argent, l'acide sulfhydrique colore en noir les parties les plus riches en argent ; dans les alliages de cuivre, l'ammoniaque oxyde d'abord les parties les plus riches en cuivre, etc.

Enfin M. Albert Sauveur a, le premier, employé le *planimètre* pour mesurer le rapport des surfaces occupées sur la préparation par les divers constituants ; ce qui donne, en quelque sorte, une *analyse immédiate* dont les résultats, comparés à ceux de l'*analyse élémentaire*, fournissent de précieuses indications.

Il serait trop en dehors de notre sujet d'analyser les différentes caractéristiques des alliages eutectiques formant comme le ciment qui unit et soude les cristallites ; nous rappellerons seulement que la *structure très finement feuilletée* apparaît le plus généralement dans leur constitution.

## II. MESURE DE LA CONDUCTIBILITÉ ÉLECTRIQUE

La conductibilité électrique des alliages a été étudiée par de nombreux savants et expérimentateurs, parmi lesquels il convient de citer Calvert, Matthiessen, Lodge, Roberts-Austen, Kamensky, etc.

Reportons-nous aux cas que nous avons distingués précédemment au sujet de la constitution de ces métaux.

Si l'alliage est formé par la juxtaposition des



cristaux des différents constituants, la conductibilité électrique doit être la somme des conductibilités que présenteraient les métaux constituants pris isolément en quantité égale à celle qui entre dans l'alliage. La courbe des conductibilités en fonction de la composition de l'alliage, doit être la droite qui joint la conductibilité des deux métaux purs.

Si l'alliage contient, en outre des cristaux de certaines combinaisons définies, des métaux en présence, la courbe des conductibilités doit être, pour la même raison, représentée par une ligne brisée composée de deux segments réunissant la conductibilité de chacun des métaux purs à leur combinaison définie.

Enfin, si l'alliage est constitué par des mélanges homogènes des métaux en présence, d'une nature semblable à celle des mélanges isomorphes ou des verres, la courbe des conductibilités doit être une courbe continue reliant la conductibilité des deux métaux isolés.

La première de ces hypothèses se vérifie pour les alliages deux à deux des métaux suivants :

Plomb, étain, cadmium, zinc.

Pour la plupart des alliages, les courbes de conductibilité s'écartent des prévisions théoriques indiquées ci-dessus ; ces courbes, en par-

tant de l'un ou des deux métaux purs *s'abaissent très rapidement* pour des teneurs très faibles du métal apposé, même s'il est très conducteur. Cette diminution rapide de la conductibilité des métaux impurs joue, au point de vue pratique, un très grand rôle dans l'établissement des conducteurs électriques.

Il importe de signaler avec H. Le Chatelier qu'aucune explication plausible de ce phénomène ne saurait être actuellement donnée et qu'il paraît difficile de le rattacher à la théorie de la constitution des alliages que nous avons esquissée à grands traits.

Ces courbes de conductibilité présentent, en outre, certaines anomalies consistant en arrêts ou points singuliers. Ces anomalies ou arrêts doivent être attribués au passage par une combinaison définie, mais il convient de remarquer également que la même discontinuité s'observe pour le passage par les alliages à point de fusion minimum ou alliages eutectiques. De là, une remarque importante découle naturellement, à savoir, qu'il est capital de ne pas conclure du nombre des points singuliers ou arrêts des courbes de conductibilité le nombre exact des combinaisons définies formées dans les divers alliages considérés.

## III. FORCE ÉLECTRO-MOTRICE DE DISSOLUTION

M. Laurie a cherché à déterminer la constitution chimique des alliages en utilisant la mesure de la force électro-motrice qu'ils développent, quand ils sont placés, dans une solution conductrice, en regard de celui des métaux constituant l'alliage qui est le moins attaquable aux acides (<sup>1</sup>).

Concevons deux métaux différents,  $M_1$  et  $M_2$ ; placés dans une solution conductrice, ces métaux sont le siège d'une différence de force électro-motrice qu'on peut mesurer.

Soudons sur le métal  $M_1$ , le plus attaquable, un fragment du métal  $M_2$ ; le couple formé par cette électrode complexe  $M_1M_2$  et le métal  $M_2$  aura, au début, une force électro-motrice un peu moindre qu'avec le métal isolé; mais il se produira entre les deux métaux soudés un courant local qui occasionnera la dissolution d'une certaine quantité du métal  $M_1$ , le plus attaquable, et la polarisation du métal  $M_2$ . En même temps,

---

(<sup>1</sup>) M. LAURIE. — *Journal de la Société chimique de Londres*, 1888, p. 88; 1889, p. 677; 1894, p. 1030; — II. LE CHATELIER. — *Bulletin de la Société d'encouragement*. Février 1895, p. 192.

la force électro-motrice reprendra théoriquement sa valeur primitive, ou, tout au moins, une valeur infiniment voisine.

Si donc un alliage est constitué par la juxtaposition des cristaux de chacun des métaux alliés, la force électro-motrice de ces alliages devra être la même que celle du métal le plus attaquable, autant du moins que la proportion de ce métal dans l'alliage ne sera pas trop faible.

S'il se forme une combinaison définie, cette force électro-motrice ne deviendra égale à celle du métal pur que lorsque la proportion de ce métal dans l'alliage sera supérieure à celle qui correspond à la combinaison définie.

Si enfin on se trouve en présence du cas des mélanges isomorphes, la force électro-motrice devra varier d'une façon continue avec la composition de l'alliage.

En pratique, les choses ne se passent pas tout à fait ainsi pour des causes incidentes provenant du mode même d'expérimentation et que nous ne saurions analyser.

Il n'en est pas moins établi que si cette méthode ne saurait donner des résultats absolus pour déterminer la constitution des alliages, son emploi parallèle avec les méthodes précédemment

indiquées peut et doit rendre les plus précieux services.

En particulier, les variations brusques constatées dans la valeur de la force électro-motrice permet de discerner l'existence des combinaisons définies.

C'est ainsi que, pour les alliages cuivre-antimoine et cuivre-étain, les combinaisons  $\text{Sb.Cu}^4$  et  $\text{Sn.Cu}^3$  sont respectivement mises en évidence ; il en est de même pour le composé  $\text{Zn}^2.\text{Cu}$  dans les alliages *cuivre-zinc* et pour le composé  $\text{Sn.Au}$  dans les alliages *étain-or*.

Il importe donc de retenir que c'est dans les cas de recherche des combinaisons définies que la méthode des forces électro-motrices fournit les résultats les plus précis.

#### IV. DENSITÉ DES ALLIAGES

Considérons deux métaux  $M_1$  et  $M_2$ , et soit un alliage contenant un poids  $p_1$  du métal  $M_1$  et un poids  $p_2$  du métal  $M_2$ , la somme  $p_1 + p_2$  étant égale à 100.

Soient  $d_1$  et  $d_2$ , les densités des métaux composants ; calculons la densité théorique  $\Delta$ , au

cas où les deux métaux alliés ne donnent aucune combinaison.

Pour calculer  $\Delta$ , écrivons que le volume du corps composé est égal à la somme des volumes des composants, on aura :

$$\frac{p_1}{d_1} + \frac{p_2}{d_2} = \frac{p_1 + p_2}{\Delta} = \frac{100}{\Delta};$$

d'où :

$$\Delta = \frac{100 \cdot d_1 \cdot d_2}{p_1 d_2 + p_2 d_1}.$$

Si l'on détermine, d'autre part, les densités expérimentales  $\Delta'$ , on pourra trouver des écarts entre  $\Delta$  et  $\Delta'$ ; ces écarts pourront indiquer l'existence de combinaisons formées, soit avec contraction, soit avec augmentation de volume.

Dans le cas où l'écart sera nul ou très faible, aucune conclusion ferme ne pourra être posée au sujet des combinaisons possibles, puisque certaines d'entre elles peuvent se former sans contraction et sans augmentation de volume.

Les considérations suivantes empruntées à l'étude de M. l'ingénieur L. Guillet sur les alliages d'aluminium font néanmoins ressortir l'intérêt que peut présenter la détermination des densités.

M. Guillet a isolé de nombreuses combinaisons de l'aluminium avec différents corps ; les résultats de ses recherches sont les suivants : Pour un très grand nombre de ces combinaisons, notamment pour celles obtenues avec les métaux de la série du fer et du nickel, il n'y a qu'un écart très faible entre la densité théorique et la densité trouvée, mais certaines combinaisons se forment avec augmentation de volume ou contraction. C'est notamment le cas des combinaisons *aluminium-antimoine* et *aluminium-cuivre* : pour les premières, il y a une augmentation de volume extrêmement importante, sensible même à l'œil quand on fond les deux métaux ensemble ; pour les secondes, trois combinaisons ont pu être obtenues. Tandis que deux d'entre elles,  $\text{Cu}^3.\text{Al}$  et  $\text{Cu}.\text{Al}$  se forment avec forte contraction, la troisième  $\text{Cu}.\text{Al}^2$  éprouve une augmentation de volume très importante.

Il résulte de ce qui précède que de pareilles recherches fournissent déjà des données fort précieuses ; il y a lieu d'espérer qu'elles contribueront, dans un avenir rapproché, à élucider bien des points obscurs de la théorie de la constitution des alliages.

## V. DURETÉ DES ALLIAGES

Pour un alliage formé par la *juxtaposition* de deux métaux, la dureté doit être intermédiaire entre celle des métaux purs, en variant d'après les proportions de chaque métal.

L'expérience vérifie cette prévision pour un certain nombre d'alliages ; mais, pour le plus grand nombre, il n'en est plus ainsi. Ces modifications dans la dureté proviennent, comme on l'a fait pressentir précédemment, de l'existence, dans ces alliages, de combinaisons définies n'ayant aucune des propriétés des métaux composants.

Les alliages *zinc-étain* ont une dureté intermédiaire entre celle des métaux purs ; or, il résulte des recherches qui ont été faites sur leur constitution, que ces alliages ne sont formés que par la juxtaposition de cristallites de zinc et d'étain.

Par contre, les alliages *cuivre-étain* (bronzes) présentent une très grande dureté ; on doit attribuer cette propriété à la dureté propre du composé défini  $\text{Sn.Cu}^3$  entrant dans leur constitution. Les alliages à forte teneur en étain sont formés par de l'étain et des cristaux de la com-



binaison Sn.Cu<sup>3</sup> ; ceux riches en cuivre, de cuivre et des cristaux de Sn.Cu<sup>3</sup>. Pour se rendre compte de la dureté, il y aurait donc lieu, pour la première série d'alliages, de prendre, comme points de départ, la dureté de l'étain et celle de la combinaison Sn.Cu<sup>3</sup>, et pour la seconde série, la dureté du cuivre et celle de la même combinaison.

L. Guillet, à qui nous empruntons ces considérations, fait très justement remarquer que, de même que pour la méthode des densités, cette étude de la dureté n'est pas absolue; les combinaisons formées par les métaux pouvant ne pas présenter une dureté caractéristique.

Les alliages *aluminium-fer* et *aluminium-nickel* présentent aussi, à ce point de vue, quelques particularités intéressantes.

Pour les alliages *aluminium-fer* à teneurs en fer comprises entre 30 et 100 0/0, on trouve les résultats suivants :

Entre 30 et 50 0/0 de fer, tous les alliages sont très cassants; abandonnés à l'air, ils paraissent ne subir aucune altération ;

Entre 50 et 67 0/0 de fer, les alliages tombent en poussière et cela avec des vitesses plus ou moins grandes; le composé contenant 57 0/0 de fer tombe en poussière en quelques jours; ceux

à 67 % de ce métal mettent beaucoup plus longtemps.

Au delà de 67 % de fer, les propriétés des alliages semblent se rapprocher de plus en plus de celles du fer ; ils sont assez malléables et ne sont pas altérables à l'air.

L. Guillet conclut de ces observations à la probabilité de l'existence de trois combinaisons caractérisant ces trois catégories d'alliages ; ces combinaisons seraient  $\text{Fe}.\text{Al}^3$ ,  $\text{Fe}^2\text{Al}^3$  et  $\text{Fe}.\text{Al}$ . Cet ingénieur ajoute que la combinaison  $\text{Fe}.\text{Al}^3$  correspond justement à la composition pour laquelle les alliages compris entre 50 et 67 % de fer tombent le plus rapidement en poussière.

Si l'on examine ensuite les alliages *nickel-aluminium*, on est conduit à les classer en quatre séries distinctes :

La première comprend les alliages dont la teneur en nickel varie entre 0 et 27 % de nickel ; tous ces alliages sont homogènes, ils présentent une dureté supérieure à celle de l'aluminium, mais ils sont malléables ;

La seconde série englobe les alliages contenant de 27 à 52 % de nickel ; ces alliages se séparent en deux parties bien nettes sous le choc du marteau : l'une, placée à la surface, jouit des propriétés des alliages de la seconde série ;

l'autre, formant le fond du culot ne présente aucune malléabilité ;

La troisième série se rapporte aux alliages dont la teneur en nickel varie entre 52 et 81 % ; les propriétés de ces métaux correspondent à celles de la partie métallique constituant le fond des culots obtenus dans la seconde série ;

Enfin, tous les alliages à plus de 81 % de nickel sont extrêmement durs. Pour expliquer les faits qui précèdent, *L. Guillet* suppose l'existence de plusieurs combinaisons, l'une d'elles étant contenue dans les alliages dont la teneur en nickel est comprise entre 50 et 81 % ; au-delà de cette teneur, la variation de la dureté peut indiquer trois combinaisons.

Des résultats analogues sont obtenus avec les alliages *aluminium-cobalt*, mais le maximum de densité semble atteint pour 87 à 95 % de cobalt.

## VI. APPLICATION DE LA LOI DES PHASES AUX ALLIAGES

Nous croyons utile, en dernière analyse, de donner quelques indications sur l'application de la *loi des phases* de W. Gibbs à l'étude de la

constitution des alliages métalliques. Ces indications extraites d'une note de Le Chatelier (*Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 8 janvier 1900) ont pour objet de fournir sur cette méthode une idée générale en prenant comme exemple un alliage ferro-métallique, la fonte.

L'application de cette loi des phases aux alliages ne tardera pas à entrer dans une voie féconde ; pour le moment, nous devons simplement nous en tenir aux données acquises.

**1. Énoncé de la loi des phases.** — Soient  $n$ , le nombre des constituants indépendants de l'alliage ;  $p$ , le nombre des actions physiques ;  $r$ , le nombre des phases, c'est-à-dire des matières homogènes différentes (combinaison, dissolution) qui se trouvent en présence.

*Le degré de liberté d'un semblable système, c'est-à-dire le nombre des variations indépendantes que l'on peut lui faire subir, est égal à  $n + p - r$ .*

Si l'on envisage le cas où une seule des actions physiques extérieures, la température, est variable, condition réalisée dans la fusion des corps sous la pression atmosphérique,  $p$  est égal à 1, et l'expression du degré de liberté devient  $n + 1 - r$ .

Suivant que cette expression a pour valeur 0, 1, 2..... on dit que le système est *invariant*, *monovariant*, *divariant* ; cela veut dire qu'il est possible, sans altérer l'état d'équilibre, de faire varier 0, 1, 2, .... des conditions qui déterminent son état actuel. Ces conditions sont la température et la composition des différentes phases en présence.

En appliquant cette loi à un mélange de corps solides pris à la température ordinaire et obtenus par une succession de transformations réversibles, telles que solidification par refroidissement, cristallisation d'une dissolution, etc., on arrive à la conclusion suivante :

*L'état stable d'un mélange solide (sels fondus, alliage métallique, roche, etc.), correspond à un système monovariant ; c'est-à-dire que le nombre des phases doit être égal au nombre des constituants indépendants qui entrent dans sa composition.*

Ainsi, la constitution d'un alliage métallique, d'une roche, etc., est rigoureusement régie par la loi des phases, dans tous les cas où l'état final envisagé est un état d'équilibre, c'est-à-dire a été atteint par une succession de transformations réversibles.

**2. Exemple d'un alliage de fer et carbone.**

— Aux deux constituants, fer et carbone, devront correspondre deux phases, soit les constituants eux-mêmes, soit quelques-unes de leurs combinaisons.

Suivons le mélange *fer-carbone* depuis son état fondu jusqu'à la température ordinaire.

a) *Fonte liquide*. — 1 phase ; système divariant, température et composition du liquide indépendantes.

b) *Fonte liquide et graphite*. — 2 phases ; système monovariant.

La composition du liquide est entièrement déterminée à chaque température ; c'est une solution saturée.

c) *Fonte liquide, graphite, solution solide de carbone*. — 3 phases ; système invariant.

La composition de la fonte, 3 % de carbone, celle de la solution solide, 1,5 % de carbone, et la température, 1150° environ, restent invariables aussi longtemps que l'une des trois phases n'a pas disparu. En continuant à enlever de la chaleur, la phase liquide disparaît.

d) *Graphite, solution solide de carbone*. — 2 phases ; système monovariant.

La composition de la solution solide (austénite, martensite ou troostite) est entièrement

déterminée par chaque température; c'est une solution saturée solide.

e) *Graphite, solution solide de carbone, fer pur.* — 3 phases; système invariant.

La composition de la dissolution solide, environ 0,5 % de carbone, et la température, voisine de 700°, restent invariables tant que l'une des trois phases n'a pas disparu. En continuant à enlever de la chaleur, la solution solide disparaît.

f) *Graphite et fer pur.* — 2 phases; système monovariant.

La température peut varier sans modifier l'état du système qui se conserve jusqu'à la température ordinaire et y est absolument stable.

Le résultat sera toujours le même dans les corps obtenus par fusion; on ne peut descendre au-dessous du point de dernière solidification qui correspond à un système invariant, que par la disparition de l'une des phases. Le système devient monovariant et il le reste jusqu'à la température ordinaire, si aucun des corps solides ne subit de transformations ultérieures pendant le refroidissement; sinon, il passe par un point invariant, comme le fer carburé et arrive toujours finalement à un système monovariant.

**3. Systèmes instables.** — La théorie des phases s'applique à l'étude de la constitution des

corps solides complexes, *alliages métalliques*, *roches*, etc.; nous l'avons dit.

Comme exemple de corps à trois constituants qui doit, après solidification, renfermer trois phases juxtaposées, on peut citer le *granite*. Ses trois constituants élémentaires comprennent la *silice*, l'*alumine* et la *potasse*; ses trois phases sont le *quartz*, le *feldspath* et le *mica*.

*Si, dans une masse semblable, on trouve un nombre de phases supérieur à celui de ses constituants indépendants, on peut être certain que la série des opérations qui leur ont donné naissance n'est pas réversible et que l'état final obtenu n'est pas stable.*

C'est le cas habituel de la fonte qui est refroidie assez rapidement après la coulée; elle est constituée par la juxtaposition de trois corps : *fer*, *graphite* et *cémentite* ( $\text{Fe}^3\text{C}$ ).

Cet état est instable; par recuit (fabrication de la fonte malléable), on fait disparaître la *cémentite*.

Les deux principales causes qui donnent naissance à ces systèmes instables sont d'abord les refroidissements trop rapides, comme dans le cas de la fonte, et en second lieu, la consolidation successive des différents éléments cristallisés en couches concentriques qui amènent l'isolement



complet de certaines parties. C'est ainsi que, dans les alliages de *cuivre* et de *cadmium*, on observe souvent trois phases : le *cuivre*, le *cadmium* et une *combinaison* de ces deux métaux. Le cuivre qui s'est déposé en premier, ne subsiste que parce qu'il est enveloppé par la combinaison définie et ainsi isolé du cadmium avec lequel il aurait dû finalement se combiner.

Une particularité importante de ces alliages instables est de présenter une constitution et, par suite, des propriétés extrêmement variables avec les conditions de travail qui sont intervenues dans leur préparation.

---

## CONCLUSION

---

S'il est vrai que de tout temps les alliages métalliques ont eu une importance considérable, il est permis d'affirmer, par contre, qu'on s'était fort peu préoccupé jusqu'à ces dernières années des recherches théoriques relatives à leur constitution.

Les théories que nous avons esquissées à grands traits dans le titre II de ce volume, s'appuient sur les travaux de nombreux savants parmi lesquels il convient de citer *Osmond*, *Roberts-Austen*, *Le Chatelier*, *Charpy*, *A. Carnot*, etc.

Nous avons vu que ces travaux se rapportaient aux études suivantes :

*Fusibilité;*

*Métallographie microscopique;*

*Conductibilité électrique;*

*Force électro-motrice de dissolution;*

*Densité;*

*Dureté, etc.*

Les mémoires les plus importants où ces travaux sont exposés sont dus aux membres les plus autorisés de la commission des Alliages (1896-1900) et c'est sous les auspices de la Société d'encouragement pour l'Industrie nationale qu'ils ont été publiés.

On ne saurait oublier le service rendu en cette occasion à l'Industrie et à la Science par cette remarquable publication.

Nées d'hier, les théories relatives à la constitution des alliages se sont développées en quelques années à peine, avec un essor prodigieux ; à en juger par les résultats actuellement acquis, il est permis d'espérer que cette branche spéciale de la métallurgie sera rattachée, dans un avenir peu éloigné, aux lois générales de la physique et de la chimie.

---



## BIBLIOGRAPHIE

---

- *Les Alliages métalliques, leurs emplois dans l'Industrie* par A. Ledebur, professeur de métallurgie à l'École des mines de Freiberg (Paris, J. Fritsch, éditeur, 30 rue du Dragon, 1894).
- *Composés binaires de l'aluminium* (Blackmore). Journal of the Society of Chemical Industry, London, 31 mars 1897.
- *Examen microscopique des alliages plomb-antimoine, étain-arsenic* (Stead). Journal of the Society of Chemical Industry. London, 31 mars 1897.
- *L'aluminium; son présent et son avenir*. The Engineer. 2 avril 1897.
- *Action de l'eau de mer sur les bronzes* (Diegel). Novembre 1899. Société d'encouragement de Berlin.
- *Bronzes japonais* (Société d'encouragement de Berlin). Décembre 1899.
- *Alliages d'or et d'aluminium* (Heycock et Neville). Chemical News (London), 15 décembre 1899.
- *Alliages d'or et de cuivre* (Roberts-Austen). Royal Society London Proceedings, 26 octobre 1900.
- *Fonderie de bronze* (Granger). Bulletin technologique des anciens élèves des arts et métiers. Octobre 1900.
- *Recherches récentes sur les alliages d'aluminium* (Guillaume). Industrie électrique, 10 avril 1901.
- *Alliages. Refroidissement. Trempe des alliages cuivre-étain* (Heycock et Neville). Royal Society London Proceedings. 23 mai 1901.

- *Densité des alliages* (Aubel). Comptes-rendus de l'Académie des Sciences. Mai 1901.
  - *Dureté des alliages* (Benedecks). Revue générale des Sciences, 30 mai 1901.
  - *Alliages d'aluminium et de molybdène* (Guillet). Comptes-rendus de l'Académie des Sciences. 3 juin 1901.
  - *Alliages d'aluminium et de magnésium* (Cartaud). Comptes-rendus de l'Académie des Sciences. 3 juin 1901.
  - *La Nouvelle Calédonie (Côte orientale)* par Jules Garnier. Librairie Plon Nourrit et C<sup>ie</sup>, rue Garancière. Paris 1901.
  - *La trempe du bronze* par Heycock et Neville. Bulletin de la Société d'encouragement. Août 1901.
  - *Les alliages d'aluminium et de magnésium* par O. Boudouard. Bulletin de la Société d'encouragement pour l'Industrie nationale. Décembre 1901.
  - *Sur les alliages du strontium avec le zinc et le cadmium*. Note de M. Henri Gautier. Comptes-rendus de l'Académie des Sciences, 9 décembre 1901.
  - *Alliages. Théorie de la dissolution* (Matthews). Engineering and mining Journal, 28 décembre 1901.
  - *Alliages de cuivre et de fer* (Stead). Engineering, 20 décembre 1901 et 10 janvier 1902.
  - *Cuivre et étain*. Engineering. 2 mai 1902.
  - *Contribution à l'étude des alliages* par MM. H.-W. Bakhuis Roozeboom, Ad. Carnot, G. Charpy, H. Le Chatelier, H. Gautier, Ed. Goutal, Guillaume, F. Osmond, Roberts-Austen, Mme Sklodowska Curie, sous la direction et le contrôle de la Commission des Alliages. (Bulletin de la Société d'encouragement, 44, rue de Rennes).
-

# TABLE DES MATIÈRES

## TITRE PREMIER

### MÉTALLURGIE DES ALLIAGES ET PROPRIÉTÉS PRINCIPALES

#### CHAPITRE PREMIER

	Pages
<i>Les alliages ferro-métalliques</i> . . . . .	9
I. Principes généraux de l'élaboration des alliages ferro-métalliques . . . . .	11
II. Propriétés et emplois des alliages ferro- métalliques . . . . .	19

#### CHAPITRE II

<i>Bronzes et laitons</i> . . . . .	27
I. Notions préliminaires . . . . .	28
II. Bronzes . . . . .	33
III. Laitons . . . . .	62

#### CHAPITRE III

<i>Alliages blancs dits antifrictions</i> . . . . .	72
---	----

#### CHAPITRE IV

<i>Alliages des métaux rares ou précieux, amal- gams</i> . . . . .	83
--	----

## TITRE II

## THÉORIE DES ALLIAGES

## CHAPITRE PREMIER

Pages

<i>Étude abrégée des phénomènes de dissolution . . . . .</i>	92
I. Courbes de solubilité . . . . .	92
II. Congélation des dissolutions salines . . . . .	96

## CHAPITRE II

<i>Analogies des phénomènes de solidification des alliages métalliques et des phénomènes de congélation des dissolutions salines . . . . .</i>	104
I. Combinaisons des alliages métalliques. . . . .	105
II. Les alliages eutectiques . . . . .	107
III. Examen plus général du phénomène de solidification des alliages binaires . . . . .	111
IV. Le phénomène de la liquation . . . . .	119
V. Courbes de fusibilité anormales. . . . .	123

## CHAPITRE III

<i>Théorie des alliages ternaires . . . . .</i>	124
I. Surfaces de fusibilité. . . . .	124
II. Surface de fusibilité de l'alliage plomb-étain-bismuth . . . . .	127

## CHAPITRE IV

<i>Méthodes servant à la détermination des propriétés générales des alliages . . . . .</i>	132
I. Métallographie . . . . .	132
II. Mesure de la conductibilité électrique . . . . .	140
III. Force électromotrice de dissolution . . . . .	143
IV. Densité des alliages. . . . .	145
V. Dureté des alliages . . . . .	148
VI. Application de la loi des phases aux alliages . . . . .	150
CONCLUSION . . . . .	158
BIBLIOGRAPHIE . . . . .	161

---

SAINT-AMAND (CHER). — IMPRIMERIE BUSSIÈRE.



**LIBRAIRIE GAUTHIER-VILLARS**

55, QUAI DES GRANDS-AUGUSTINS, A PARIS (6<sup>e</sup>).

---

Envoi *franco* contre mandat-poste ou valeur sur Paris.

# HISTOIRE DES MATHÉMATIQUES

DANS L'ANTIQUITÉ ET AU MOYEN ÂGE,

Par **H.-G. ZEUTHEN**,

Professeur à l'Université de Copenhague.

ÉDITION FRANÇAISE, REVUE ET CORRIGÉE PAR L'AUTEUR,

Traduite par **JEAN MASCART**.

Un volume in-8 de xv-296 pages, avec 31 figures; 1902..... 9 fr.

---

# HISTOIRE DE L'OBSERVATOIRE DE PARIS

DE SA FONDATION A 1793,

Par **C. WOLF**,

Membre de l'Institut, Astronome honoraire de l'Observatoire.

Un volume gr. in-8 de xii-392 pages, avec 16 planches; 1902. 15 fr.

---

# TIR DES FUSILS DE CHASSE

Par **JOURNÉE**,

Lieutenant-Colonel au 69<sup>e</sup> régiment d'Infanterie.

DEUXIÈME ÉDITION ENTIÈREMENT REFOUNDUE.

Un beau volume gr. in-8 de vi-387 pages, avec 147 fig.; 1902.. 12 fr.

---

# COURS DE MÉCANIQUE

A L'USAGE DES CANDIDATS

A L'ÉCOLE CENTRALE DES ARTS ET MANUFACTURES,

Par **P. APPELL**,

Membre de l'Institut, Professeur à l'École Centrale,  
Professeur à la Faculté des Sciences de Paris.

Un volume in-8 de 272 pages, avec 143 figures; 1902.. 7 fr. 50 c.

---

**LIBRAIRIE GAUTHIER-VILLARS**

**SERVICE GÉOGRAPHIQUE DE L'ARMÉE**

# **NOUVELLES TABLES DE LOGARITHMES A CINQ DÉCIMALES**

POUR LES LIGNES TRIGONOMÉTRIQUES  
DANS LES DEUX SYSTÈMES DE LA DIVISION **CENTÉSIMALE**  
ET DE LA DIVISION **SEXAGÉSIMALE** DU QUADRANT  
ET POUR LES NOMBRES 1 A 12000.

*Édition spéciale à l'usage des Candidats aux Écoles Polytechnique  
et de Saint-Cyr.*

UN VOLUME GRAND IN-8; 1901. CARTONNÉ..... 3 FR.

# **LEÇONS SUR LA THÉORIE DES GAZ**

Par **L. BOLTZMANN**,

Professeur à l'Université de Leipzig,

TRADUITES PAR **A. GALLOTTI**, ancien Élève de l'École Normale;

AVEC UNE *Introduction* ET DES *Notes*

PAR **M. BRILLOUIN**, Professeur au Collège de France.

1<sup>re</sup> PARTIE. GRAND IN-8 DE XIX-204 PAGES AVEC FIGURES; 1902. 8 fr.

**NOTIONS FONDAMENTALES**

DE

# **CHIMIE ORGANIQUE,**

Par **Ch. MOUREU**,

Professeur agrégé à l'École supérieure de Pharmacie de l'Université de Paris.

UN VOLUME IN-8 DE VI-292 PAGES; 1902.

BROCHÉ ..... 7 FR. 50 C. | CARTONNÉ ..... 8 FR. 50 C.

# **LA TRACTION ÉLECTRIQUE**

PAR COURANTS SUPERFICIELS DU SYSTÈME DIATTO,

Par **Ch. JULIUS**, Ingénieur.

GRAND IN-8 DE 66 P., AVEC 12 FIG. OU PLANCHES; 1902. 2 FR. 75 C.

LIBRAIRIE GAUTHIER-VILLARS

TRAVAUX  
DU  
CONGRÈS DE PHYSIQUE

RÉUNI A PARIS EN 1900, SOUS LES AUSPICES DE LA SOCIÉTÉ  
FRANÇAISE DE PHYSIQUE,

Rassemblés et publiés par

Ch.-Éd. GUILLAUME et L. POINCARÉ,  
Secrétaires généraux du Congrès.

QUATRE VOLUMES GRAND IN-8, AVEC FIGURES.

TOMES I, II et III. *Rapports présentés au Congrès.* 3 volumes se vendant  
ensemble..... 50 fr.

On vend séparément :

TOME I : *Questions générales. Métrologie. Physique mécanique. Physique moléculaire* ..... 18 fr.

TOME II : *Optique. Électricité. Magnétisme*..... 18 fr.

TOME III : *Électro-optique et ionisation. Applications. Physique cosmique. Physique biologique*..... 18 fr.

TOME IV : *Procès-verbaux. Annexes. Liste des membres, 1901*.....

LEÇONS ÉLÉMENTAIRES  
D'ACOUSTIQUE ET D'OPTIQUE

A L'USAGE DES CANDIDATS AU CERTIFICAT D'ÉTUDES PHYSIQUES,  
CHIMIQUES ET NATURELLES (P. C. N.),

Par Ch. FABRY,

Professeur adjoint à la Faculté des Sciences de Marseille.

Un volume in-8, avec 205 figures; 1898..... 7 fr. 50 c.

TRAITÉ ÉLÉMENTAIRE  
DE  
MÉTÉOROLOGIE

Par Alfred ANGOT,

Météorologiste titulaire au Bureau Central météorologique,  
Professeur à l'Institut national agronomique et à l'École supérieure  
de Marine.

UN VOLUME GRAND IN-8, AVEC 103 FIG. ET 4 PL.; 1899. 12 FR.

LIBRAIRIE GAUTHIER-VILLARS

# LEÇONS SUR LA THÉORIE DES FORMES

ET LA GÉOMÉTRIE ANALYTIQUE SUPÉRIEURE,

à l'usage des Étudiants des Facultés des Sciences,

Par **H. ANDOYER**,

Maître de Conférences à l'École Normale supérieure.

DEUX BEAUX VOLUMES GRAND IN-8, SE VENDANT SÉPARÉMENT :

TOME I : Volume de vi-508 pages; 1900..... 15 fr.

TOME II..... (En préparation.)

# COURS D'ÉLECTRICITÉ

Par **H. PELLAT**,

Professeur à la Faculté des Sciences de l'Université de Paris.

3 volumes grand in-8, se vendant séparément :

TOME I : *Électrostatique. Loi d'Ohm. Thermo-électricité*, avec 145 figures; 1901..... 10 fr.

TOME II : (*Sous presse.*) — TOME III : (*En préparation.*)

ESSAI SUR LES

# FONDEMENTS DE LA GÉOMÉTRIE

Par **B.-A.-W. RUSSELL**,

Traduction par **C. CADENAT**, revue et annotée par l'Auteur  
et par **Louis COUTURAT**.

Grand in-8, avec 11 figures; 1901..... 9 fr.

GUIDE PRATIQUE

POUR LES

# CALCULS DE RÉSISTANCE

DES

**CHAUDIÈRES A VAPEUR ET L'ESSAI DES MATÉRIAUX EMPLOYÉS,**

Publié par l'Union Internationale des Associations de surveillance d'Appareils à vapeur,

TRADUIT SUR LA 7<sup>e</sup> ÉDITION ALLEMANDE,

Par **G. HUIN**, Ancien Élève de l'École Polytechnique, Capitaine d'Artillerie,

**E. MAIRE**, Ingénieur E. C. P., Directeur de l'Association des  
Propriétaires d'appareils à vapeur du Nord-Est,

Avec la collaboration de **H. WALTHER MEUNIER**, Ingénieur E. C. P.,  
Ingénieur en chef de l'Association alsacienne des Propriétaires d'appareils à vapeur.

Un volume in-12 raisin, avec 10 figures; 1901..... 2 fr. 75 c.

**LIBRAIRIE GAUTHIER-VILLARS**

COURS DE PHYSIQUE MATHÉMATIQUE DE LA FACULTÉ DES SCIENCES.

**THÉORIE ANALYTIQUE DE LA CHALEUR**  
MISE EN HARMONIE AVEC LA THERMODYNAMIQUE  
ET AVEC LA THÉORIE MÉCANIQUE DE LA LUMIÈRE,

Par **J. BOUSSINESQ**,

Membre de l'Institut, Professeur à la Faculté des Sciences de l'Université de Paris.

Deux volumes grand in-8 se vendant séparément :

TOME I : *Problèmes généraux*. Vol. de xxvii-333 p.; av. 14 fig.; 1901. **10 fr.**

TOME II : *Échauffement par contact et échauffement par rayonnement. Conductibilité des aiguilles, lames et masses cristallines. Courants de convection. Théorie mécanique de la lumière.....* (Sous presse.)

**LES CARBURES D'HYDROGÈNE (1851-1901)**

RECHERCHES EXPÉRIMENTALES

Par **M. BERTHELOT**,

Sénateur, Secrétaire perpétuel de l'Académie des Sciences.

3 volumes grand in-8, se vendant ensemble..... **45 fr.**

TOME I : *L'Acétylène : synthèse totale des carbures d'hydrogène*. Volume de x-414 pages. — TOME II : *Les Carbures pyrogénés. — Séries diverses*. Volume de iv-558 pages. — TOME III : *Combinaison des carbures d'hydrogène avec l'hydrogène, l'oxygène, les éléments de l'eau*. Vol. de iv-459 pages.

COMPTE RENDU DU

**Deuxième Congrès international des Mathématiciens**

TENU A PARIS DU 6 AU 12 AOUT 1900.

PROCÈS-VERBAUX ET COMMUNICATIONS

PUBLIÉS PAR

**E. DUPORCQ**,

Ingénieur des Télégraphes, Secrétaire général du Congrès.

UN BEAU VOLUME GRAND IN-8 DE 456 P., AVEC FIGURES; 1902. **16 FR.**

**L'ANNÉE TECHNIQUE (1901-1902)**

TRAMWAYS. CYCLES. TRAVAUX PUBLICS. CONSTRUCTIONS MARITIMES  
ET NAVALES. ARMEMENTS. NAVIGATION AÉRIENNE,

Par **A. DA CUNHA**, Ingénieur des Arts et Manufactures;

Avec Préface de **M. Émile Trélat**, Directeur de l'École spéciale d'Architecture.

UN BEAU VOL. GR. IN-8 DE VIII-271 P. AVEC 114 FIG.; 1902. **3 FR. 50 C.**

**LIBRAIRIE GAUTHIER-VILLARS**

---

## **INDUSTRIES DU SULFATE D'ALUMINIUM, DES ALUNS ET DES SULFATES DE FER,**

**Par Lucien GESCHWIND, Ingénieur-Chimiste.**

Un volume grand in-8, de VIII-364 pages, avec 195 figures; 1899 (E. I.). **10 fr.**

---

## **COURS DE CHEMINS DE FER**

PROFESSÉ A L'ÉCOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSÉES,

**Par C. BRICKA,**

Ingénieur en chef de la voie et des bâtiments aux Chemins de fer de l'État.

DEUX VOLUMES GRAND IN-8; 1894 (E. T. P.)

TOME I : avec 326 fig.; 1894.. **20 fr.** | TOME II : avec 177 fig.; 1894.. **20 fr.**

---

## **COUVERTURE DES ÉDIFICES**

ARDOISES, TUILES, MÉTAUX, MATIÈRES DIVERSES,

**Par J. DENFER,**

Architecte, Professeur à l'École Centrale.

UN VOLUME GRAND IN-8, AVEC 429 FIG.; 1893 (E. T. P.).. **20 FR.**

---

## **CHARPENTERIE MÉTALLIQUE**

MENUISERIE EN FER ET SERRURERIE,

**Par J. DENFER,**

Architecte, Professeur à l'École Centrale.

DEUX VOLUMES GRAND IN-8; 1894 (E. T. P.).

TOME I : avec 479 fig.; 1894.. **20 fr.** | TOME II : avec 571 fig.; 1894.. **20 fr.**

---

## **ÉLÉMENTS ET ORGANES DES MACHINES**

**Par Al. GOUILLY,**

Ingénieur des Arts et Manufactures.

GRAND IN-8 DE 406 PAGES, AVEC 710 FIG.; 1894 (E. I.).... **12 FR.**

LIBRAIRIE GAUTHIER-VILLARS

MÉTALLURGIE GÉNÉRALE

# PROCÉDÉS DE CHAUFFAGE

Par U. LE VERRIER,

Ingénieur en chef des Mines, Professeur au Conservatoire des Arts et Métiers.

Grand in-8, de 367 pages, avec 171 figures; 1902 (E. I.) ..... 12 fr.

# VERRE ET VERRERIE

Par Léon APPERT et Jules HENRIVAUX, Ingénieurs.

Grand in-8 avec 130 figures et 1 atlas de 14 planches; 1894 (E. I.)..... 20 fr.

BLANCHIMENT ET APPRÊTS

# TEINTURE ET IMPRESSION

PAR

Ch.-Er. GUIGNET,

Directeur des teintures aux Manufac-  
tures nationales  
des Gobelins et de Beauvais,

F. DOMMER,

Professeur à l'École de Physique  
et de Chimie industrielles  
de la Ville de Paris,

E. GRANDMOUGIN,

Chimiste, ancien Préparateur à l'École de Chimie de Mulhouse.

GR. IN-8, AVEC 368 FIG., ET ÉCH. DE TISSUS IMPRIMÉS; 1895 (E. I.). 30 FR.

# RÉSISTANCE DES MATÉRIAUX

Par Aug. FÖPPL, Professeur à l'Université technique de Munich.

TRADUIT DE L'ALLEMAND PAR E. HAIN, Ing. de l'École Polytechnique de Zurich.

GRAND IN-8, DE 489 PAGES, AVEC 74 FIG.: 1901 (E. I.)... 15 FR.

# CONSTRUCTION PRATIQUE des NAVIRES de GUERRE

Par A. CRONEAU,

Professeur à l'École d'application du Génie maritime.

TOME I : avec 305 fig. et un Atlas de 11 pl. in-4°; 1894..... 18 fr.

TOME II : avec 359 fig.; 1894..... 15 fr.

**LIBRAIRIE GAUTHIER-VILLARS**

**PONTS SOUS RAILS ET PONTS-ROUTES A TRAVÉES  
MÉTALLIQUES INDÉPENDANTES.**

## **FORMULES, BARÈMES ET TABLEAUX**

**Par Ernest HENRY,**

Inspecteur général des Ponts et Chaussées.

UN VOLUME GRAND IN-8, AVEC 267 FIG.; 1894 (E. T. P.). 20 FR.

Calculs rapides pour l'établissement des projets de ponts métalliques et pour le contrôle de ces projets, sans emploi des méthodes analytiques ni de la statique graphique (économie de temps et certitude de ne pas commettre d'erreurs).

**CHEMINS DE FER.**

## **EXPLOITATION TECHNIQUE**

PAR MM.

**SCHÖLLER,**

Chef adjoint des Services commerciaux  
à la Compagnie du Nord.

**FLEURQUIN,**

Inspecteur des Services commerciaux  
à la même Compagnie.

UN VOLUME GRAND IN-8, AVEC FIGURES: 1901 (E. I.)..... 12 FR.

## **TRAITÉ DES INDUSTRIES CÉRAMIQUES**

TERRES CUITES.

PRODUITS RÉFRACTAIRES. FAÏENCES. GRÈS. PORCELAINES.

**Par E. BOURRY,**

Ingénieur des Arts et Manufactures.

GRAND IN-8, DE 753 PAGES, AVEC 349 FIG.; 1897 (E. I.). 20 FR.

**RÉSUMÉ DU COURS  
DE**

## **MACHINES A VAPEUR ET LOCOMOTIVES**

PROFESSÉ A L'ÉCOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSÉES,

**Par J. HIRSCH,**

Inspecteur général honoraire des Ponts et Chaussées,  
Professeur au Conservatoire des Arts et Métiers.

2<sup>e</sup> édition. Gr. in-8 de 510 p. avec 314 fig.; 1898 (E. T. P.). 18 fr.



LIBRAIRIE GAUTHIER-VILLARS

## LE VIN ET L'EAU-DE-VIE DE VIN

Par **Henri DE LAPPARENT**,

Inspecteur général de l'Agriculture.

INFLUENCE DES CÉPAGES, DES CLIMATS, DES SOLS, ETC., SUR LA QUALITÉ DU VIN, VINIFICATION, CUVERIE ET CHAIS, LE VIN APRÈS LE DÉCUVAGE, ÉCONOMIE, LÉGISLATION.

GR. IN-8 DE XII-533 P., AVEC 111 FIG. ET 28 CARTES; 1895 (E.I.) 12 FR.

## TRAITÉ DE CHIMIE ORGANIQUE APPLIQUÉE

Par **A. JOANNIS**,

Professeur à la Faculté des Sciences de Bordeaux,  
Chargé de cours à la Faculté des Sciences de Paris.

DEUX VOLUMES GRAND IN-8; 1896 (E. I.).

TOME I: 688 p., avec fig.; 1896. 20 fr. | TOME II: 718 p., avec fig. 1896. 15 fr.

## MANUEL DE DROIT ADMINISTRATIF

SERVICE DES PONTS ET CHAUSSÉES ET DES CHEMINS VICINAUX,

Par **G. LECHALAS**, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées.

DEUX VOLUMES GRAND IN-8, SE VENDANT SÉPARÉMENT (E. T. P.).

TOME I; 1889; 20 fr. — TOME II: 1<sup>re</sup> partie; 1893; 10 fr. 2<sup>e</sup> partie; 1898; 10 fr.

## MACHINES FRIGORIFIQUES

PRODUCTION ET APPLICATIONS DU FROID ARTIFICIEL,

Par **H. LORENZ**,

Ingénieur, Professeur à l'Université de Halle.

TRADUIT DE L'ALLEMAND AVEC L'AUTORISATION DE L'AUTEUR, PAR

**P. PETIT**,

Prof<sup>r</sup> à la Faculté des Sciences de Nancy,  
Directeur de l'Ecole de Brasserie.

**J. JAQUET**,

Ingénieur civil.

Grand in-8 de ix-186 pages, avec 131 figures; 1898 (E. I.)... 7 fr.

## COURS DE GÉOMÉTRIE DESCRIPTIVE

ET DE GÉOMÉTRIE INFINITÉSIMALE,

Par **Maurice D'OCAGNE**,

Ing<sup>r</sup> et Prof<sup>r</sup> à l'École des Ponts et Chaussées, Répétiteur à l'École Polytechnique.

GR. IN-8, DE XI-428 P., AVEC 340 FIG.; 1896 (E. T. P.)... 12 FR

**LIBRAIRIE GAUTHIER-VILLARS**

LES ASSOCIATIONS OUVRIÈRES  
**ET LES ASSOCIATIONS PATRONALES,**

Par **P. HUBERT-VALLEROUX**,  
Avocat à la Cour de Paris, Docteur en Droit.

GRAND IN-8 DE 361 PAGES; 1899 (E. I.)..... 10 FR.

**TRAITÉ DES FOURS A GAZ**  
**A CHALEUR RÉGÉNÉRÉE.**

DÉTERMINATION DE LEURS DIMENSIONS.

Par **Friedrich TOLDT**,

Ingénieur, Professeur à l'Académie impériale des Mines de Leoben.

TRADUIT DE L'ALLEMAND SUR LA 2<sup>e</sup> ÉDITION REVUE ET DÉVELOPPÉE PAR L'AUTEUR,

Par **F. DOMMER**,

Ingénieur des Arts et Manufactures.

Professeur à l'École de Physique et de Chimie industrielles de la Ville de Paris.

Un volume grand in-8 de 392 pages, avec 68 figures; 1900 (E. I.). 11 fr.

**ANALYSE INFINITÉSIMALE**  
**A L'USAGE DES INGÉNIEURS,**

Par **E. ROUCHÉ** et **L. LÉVY**,

2 VOLUMES GRAND IN-8, AVEC FIGURES (E. T. P.) :

TOME I : *Calcul différentiel*. VIII-557 pages, avec 45 figures; 1900..... 15 fr.

TOME II : *Calcul intégral*..... (Sous presse.)

**COURS D'ÉCONOMIE POLITIQUE**  
**PROFESSÉ A L'ÉCOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSÉES,**

Par **C. COLSON**,

Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, Conseiller d'État.

TROIS BEAUX VOLUMES GRAND IN-8, SE VENDANT SÉPARÉMENT (E. T. P.) :

TOME I : *Exposé général des Phénomènes économiques. Le travail et les questions ouvrières*. Volume de 600 pages; 1901..... 10 fr.

TOMES II et III..... (Sous presse.)

**LIBRAIRIE GAUTHIER-VILLARS.**

QUAI DES GRANDS-AUGUSTINS, 55, A PARIS (6<sup>e</sup>).

Envoi franco dans l'Union postale contre mandat-poste ou valeur sur Paris.

# BIBLIOTHÈQUE PHOTOGRAPHIQUE

La Bibliothèque photographique se compose de plus de 200 volumes et embrasse l'ensemble de la Photographie considérée au point de vue de la Science, de l'Art et des applications pratiques.

DERNIERS OUVRAGES PARUS :

## LES PHOTOTYPES SUR PAPIER AU GÉLATINOBROMURE,

Par F. QUÉNISSET.

In-18 jésus, avec figures et 1 planche spécimen; 1901..... 1 fr. 25 c.

## LES AGRANDISSEMENTS,

Par G. GUILLON.

In-18 jésus, avec figures; 1901..... 2 fr. 75 c.

## A B C DE LA PHOTOGRAPHIE MODERNE,

Par W.-K. BURTON.

5<sup>e</sup> édition. Traduction sur la 12<sup>e</sup> édition anglaise, par G. HUBERSON.

In-18 jésus, avec figures; 1901..... 3 fr.

## LA PHOTOGRAPHIE DES COULEURS,

PAR LA MÉTHODE INTERFÉRENTIELLE DE M. LIPPMANN,

Par A. BERGET.

2<sup>e</sup> édition, entièrement refondue. In-18 jésus, avec fig.; 1901... 1 fr. 75 c.

## FABRICATION DES PLAQUES AU GÉLATINOBROMURE,

Par BURTON. — Traduction par HUBERSON.

In-18 jésus, avec figures; 1901..... 0 fr. 50 c.

## REPRODUCTION DES GRAVURES, DESSINS, PLANS, MANUSCRITS,

Par A. COURRÈGES, Praticien.

In-18 jésus, avec figures; 1900..... 2 fr.

## LA PHOTOGRAPHIE. TRAITÉ THÉORIQUE ET PRATIQUE,

Par A. DAVANNE.

2 beaux volumes grand in-8, avec 234 fig. et 4 planches spécimens... 32 fr.

Chaque volume se vend séparément..... 16 fr.

## LES AGRANDISSEMENTS PHOTOGRAPHIQUES,

Par A. COURRÈGES, Praticien.

In-18 jésus, avec 12 figures; 1901..... 2 fr.

**LIBRAIRIE GAUTHIER-VILLARS.**

**TRAITÉ ENCYCLOPÉDIQUE DE PHOTOGRAPHIE,**

Par C. FABRE, Docteur ès Sciences.

4 beaux vol. grand in-8, avec 724 figures et 2 planches; 1889-1891... 48 fr  
Chaque volume se vend séparément 14 fr.

Des suppléments destinés à exposer les progrès accomplis viennent compléter ce Traité et le maintenir au courant des dernières découvertes.

1<sup>er</sup> Supplément (A). Un beau vol. gr. in-8 de 400 p. avec 176 fig.; 1892. 14 fr.

2<sup>e</sup> Supplément (B). Un beau vol. gr. in-8 de 424 p. avec 221 fig.; 1897. 14 fr.

3<sup>e</sup> Supplément (C). Un beau vol. gr. in-8 de 400 pages; 1903..... 14 fr.

Les 7 volumes se vendent ensemble..... 84 fr.

**LA PHOTOGRAPHIE D'ART**

A L'EXPOSITION UNIVERSELLE DE 1900,

Par C. KLARY.

Grand in-8 de 88 pages, avec nombreuses illustrations et planches; 1901..... 6 fr. 50 c.

**LE MATÉRIEL PHOTOGRAPHIQUE,**

Par Georges MAURION.

Volume in-16 raisin de vi-68 pages; 1902..... 1 fr. 75 c.

**MANUEL DU PHOTOGRAPHE AMATEUR,**

Par F. PANAJOU,

Chef du Service photographique à la Faculté de Médecine de Bordeaux.

3<sup>e</sup> ÉDITION COMPLÈTEMENT REFONDUE ET CONSIDÉRABLEMENT AUGMENTÉE.

Petit in-8, avec 63 figures; 1899..... 2 fr. 75 c.

**TRAITÉ PRATIQUE DES TIRAGES PHOTOGRAPHIQUES,**

Par Ch. SOLLET.

Volume in-16 raisin de vi-240 pages; 1901..... 4 fr.

**LA PHOTOGRAPHIE ANIMÉE,**

Par E. TRUTAT,

Avec une Préface de M. MAREY.

Un volume grand in-8, avec 146 figures et 1 planche; 1899..... 5 fr.

**ESTHÉTIQUE DE LA PHOTOGRAPHIE.**

Un volume de grand luxe in-4 raisin, avec 14 planches et 150 figures. 16 fr.

**TRAITÉ PRATIQUE  
DE PHOTOGRAVURE EN RELIEF ET EN CREUX,**

Par Léon VIDAL.

In-18 jésus de xiv-445 p. avec 65 figures et 6 planches; 1900..... 6 fr. 50 c.

32406. — Paris, Imp. Gauthier-Villars, 55, quai des Grands-Augustins.

**MASSON & C<sup>ie</sup>, Éditeurs**  
LIBRAIRES DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE  
120, Boulevard Saint-Germain, Paris (6<sup>e</sup>)  
P. n<sup>o</sup> 301.

EXTRAIT DU CATALOGUE (1)

(Septembre 1902)

# La Pratique Dermatologique

Traité de Dermatologie appliquée

Publié sous la direction de MM

**ERNEST BESNIER, L. BROCCQ, L. JACQUET**

Par MM. AUDRY, BALZER, BARBE, BAROZZI, BARTHÉLEMY, BENARD, ERNEST BESNIER  
BODIN, BROCCQ, DE BRUN, DU CASTEL, J. DARIER  
DEHU, DOMINICI, W. DUBREUILH, HUDELO, L. JACQUET, J.-B. LAFFITTE  
LENGLET, LEREDDE, MERKLEN, PERRIN  
RAYNAUD, RIST, SABOURAUD, MARCEL SÈE, GEORGES THIBIERGE, VEYRIÈRES

4 forts volumes richement cartonnés toile, très largement illustrés de figures en noir et de planches en couleurs. En souscription jusqu'à la publication du tome IV . . . . . 150 fr.

**TOME I.** 1 fort vol. gr. in-8<sup>o</sup> avec 230 fig. en noir et 24 pl. en coul. 36 fr.

Anatomie et Physiologie de la Peau. — Pathologie générale de la Peau. — Symptomatologie générale des Dermatoses. — Acanthosis Nigricans. — Acnés. — Actinomycose. — Adénomes. — Alopecies. — Anesthésie locale. — Balanites. — Bouton d'Orient. — Brûlures. — Charbon. — Classifications dermatologiques. — Dermatitis polymorphes douloureuses. — Dermatophytes. — Dermatozoaires. — Dermites infantiles simples. — Ecthyma.

**TOME II.** 1 fort vol. gr. in-8<sup>o</sup> avec 168 fig. en noir et 21 pl. en coul. 40 fr.

Eczéma. — Electricité. — Eléphantiasis. — Epithélioma. — Eruptions artificielles. — Erythème. — Erythrasma. — Erythrodermes. — Esthiomène. — Favus. — Folliculites. — Furonculose. — Gale. — Gangrène cutanée. — Gerçures. — Greffe. — Hématodermes. — Herpès. — Hydroa vacciniforme. — Ichtyose. — Impétigo. — Kératodermie. — Kératose pilaire. — Langue.

**TOME III.** 1 fort vol. gr. in-8<sup>o</sup> avec 201 fig. en noir et 19 pl. en coul. 40 fr.

Lèpre. — Lichen. — Lupus. — Lymphadénie cutanée. — Lymphangiome. — Madura (pied de). — Mélanodermies. — Miliium et pseudo-Miliium. — Molluscum contagiosum. — Morve et Farcin. — Mycosis fungoïde. — Nævi. — Nodosités cutanées. — Œdème. — Ongles. — Maladie de Paget. — Papillomes. — Pelade. — Pellagre. — Pemphigus. — Perlèche. — Phtiriase. — Pian. — Pityriasis, etc.

Sous presse : TOME IV

(1) La librairie envoie gratuitement et franco de port les catalogues suivants à toutes les personnes qui lui en font la demande. — Catalogue général. — Catalogues de l'Encyclopédie scientifique des Aide-Mémoire : I. Section de l'ingénieur. II. Section du biologiste. — Catalogue des ouvrages d'enseignement,

# Traité de Chirurgie

PUBLIÉ SOUS LA DIRECTION DE MM.

**Simon DUPLAY**

Professeur à la Faculté de médecine  
Chirurgien de l'Hôtel-Dieu  
Membre de l'Académie de médecine

**Paul RECLUS**

Professeur agrégé à la Faculté de médecine  
Chirurgien des hôpitaux  
Membre de l'Académie de médecine

PAR MM.

BERGER, BROCA, PIERRE DELBET, DELENS, DEMOULIN, J.-L. FAURE  
FORGUE, GÉRARD MARCHANT, HARTMANN, HEYDENREICH, JALAGUIER  
KIRMISSON, LAGRANGE, LEJARS, MICHAUX, NÉLATON, PEYROT  
PONCET, QUÉNU, RICARD, RIEFFEL, SEGOND, TUFFIER, WALTHER

**Ouvrage complet**

**DEUXIÈME ÉDITION ENTIÈREMENT REFOUNDUE**

8 vol. gr. in-8° avec nombreuses figures dans le texte. . . . . 150 fr.

**TOME I. — 1 vol. grand in-8° de 912 pages avec 218 figures 18 fr.**

RECLUS. — Inflammations, traumatismes, maladies virulentes.  
BROCA. — Peau et tissu cellulaire sous-cutané.

QUÉNU. — Des tumeurs.  
LEJARS. — Lymphatiques, muscles, synoviales tendineuses et bourses séreuses.

**TOME II. — 1 vol. grand in-8° de 996 pages avec 361 figures 18 fr.**

LEJARS. — Nerfs.  
MICHAUX. — Artères.

RICARD et DEMOULIN. — Lésions traumatiques des os.  
PONCET. — Affections non traumatiques des os.

QUÉNU. — Maladies des veines.

**TOME III. — 1 vol. grand in-8° de 940 pages avec 285 figures 18 fr.**

NÉLATON. — Traumatismes, entorses, luxations, plaies articulaires.  
QUÉNU. — Arthropathies, arthrites sèches, corps étrangers articulaires.

LAGRANGE. — Arthrites infectieuses et inflammatoires.  
GÉRARD MARCHANT. — Crâne.  
KIRMISSON. — Rachis.  
S. DUPLAY. — Oreilles et annexes.

**TOME IV. — 1 vol. grand in-8° de 896 pages avec 354 figures 18 fr.**

DELENS. — L'œil et ses annexes.  
GERARD MARCHANT. — Noz, fosses

nasales, pharynx nasal et sinus.  
HEYDENREICH. — Mâchoires.

**TOME V. — 1 vol. grand in-8° de 948 pages avec 187 figures 20 fr.**

BROCA. — Face et cou. Lèvres, cavité buccale, gencives, palais, langue, larynx, corps thyroïde.  
HARTMANN. — Plancher buccal, glan-

des salivaires, œsophage et pharynx.  
WALTHER. — Maladies du cou.  
PEYROT. — Poitrine.  
PIERRE DELBET. — Mamelle.

**TOME VI. — 1 vol. grand in-8° de 1127 pages avec 218 figures 20 fr.**

MICHAUX. — Parois de l'abdomen.  
BERGER. — Hernies.  
JALAGUIER. — Contusions et plaies de l'abdomen, lésions traumatiques et corps étrangers de l'estomac et de l'intestin. Occlusion intestinale, péritonites, appendicite.

HARTMANN. — Estomac.  
FAURE et RIEFFEL. — Rectum et anus.  
HARTMANN et GOSSET. — Anus contre nature. Fistules stercorales.  
QUÉNU. — Mésentère. Rate. Pancréas.  
SEGOND. — Foie.

**TOME VII. — 1 fort vol. gr. in-8° de 1272 pages, 297 fig. dans le texte 25 fr.**

WALTHER. — Bassin.  
FORGUE. — Urètre et prostate.  
RECLUS. — Organes génitaux de l'homme.

RIEFFEL. — Affections congénitales de la région sacro-coccygienne.  
TUFFIER. — Rein. Vessie. Urètres. Capsules surrénales.

**TOME VIII. 1 fort vol. gr. in-8° de 971 pages, 163 fig. dans le texte 20 fr.**

MICHAUX. — Vulve et vagin.  
PIERRE DELBET. — Maladies de l'utérus.  
SEGOND. — Annexes de l'utérus,

ovaires, trompes, ligaments larges, péritoine pelvien.  
KIRMISSON. — Maladies des membres.

# Traité d'Anatomie Humaine

PUBLIÉ SOUS LA DIRECTION DE

**P. POIRIER**

Professeur agrégé  
à la Faculté de Médecine de Paris  
Chirurgien des Hôpitaux.

**A. CHARPY**

Professeur d'anatomie  
à la Faculté de Médecine  
de Toulouse.

AVEC LA COLLABORATION DE MM.

O. Amoëdo — A. Branca — Cannieu — B. Cunéo — G. Delamare  
Paul Delbet — P. Fredet — Glantenay — Gosset  
P. Jacques — Th. Jonnesco — E. Laguesse — L. Manouvrier — A. Nicolas  
Nobécourt — O. Pasteau — M. Picou  
A. Prenant — H. Rieffel — Ch. Simon — A. Soulié

5 volumes grand in-8°. *En souscription* : 150 fr.

*Chaque volume est illustré de nombreuses figures en noir et en couleurs.*

## ÉTAT DE LA PUBLICATION (SEPTEMBRE 1902)

- TOME PREMIER** (*Deuxième édition, entièrement refondue*). — **Embryologie.** Notions d'embryologie. — **Ostéologie.** Considérations générales, des membres, squelette du tronc, squelette de la tête. — **Arthrologie.** Développement des articulations, structure, articulations des membres, articulations du tronc, articulations de la tête. 1 vol. gr. in-8° avec 807 figures. . . . . 20 fr.
- TOME II** (*Deuxième édition, entièrement refondue*). — 1<sup>er</sup> Fascicule : **Myologie.** Embryologie, histologie, peauciers et aponévroses. 1 vol. gr. in-8° avec 331 figures. . . . . 12 fr.
- 2<sup>e</sup> Fascicule (*Deuxième édition, entièrement refondue*) : **Angéiologie.** Cœur et Artères. Histologie. 1 vol. gr. in-8° avec 150 figures. 8 fr.
- 3<sup>e</sup> Fascicule : **Angéiologie** (*Capillaires, Veines*). 1 vol. gr. in-8° avec 75 figures. . . . . 6 fr.
- 4<sup>e</sup> Fascicule : **Les Lymphatiques.** 1 vol. gr. in-8° avec 117 fig. 8 fr.
- TOME III** (*Deuxième édition, entièrement refondue*). — 1<sup>er</sup> Fascicule : **Système nerveux.** Méninges, moelle, encéphale, embryologie, histologie. 1 vol. gr. in-8° avec 265 figures . . . . . 10 fr.
- 2<sup>e</sup> Fascicule (*Deuxième édition, entièrement refondue*) : **Système nerveux.** Encéphale. 1 vol. grand in-8° avec 131 figures. . . 10 fr.
- 3<sup>e</sup> Fascicule : **Système nerveux.** Les nerfs, nerfs craniens, nerfs rachidiens. 1 vol. gr. in-8° avec 205 figures. . . . . 12 fr.
- TOME IV.** — 1<sup>er</sup> Fascicule (*Deuxième édition, entièrement refondue*) : **Tube digestif.** Développement, bouche, pharynx, œsophage, estomac, intestins. 1 vol. gr. in-8°, avec 205 figures . . . . . 12 fr.
- 2<sup>e</sup> Fascicule : **Appareil respiratoire.** Larynx, trachée, poumons, plèvre, thyroïde, thymus. 1 vol. gr. in-8°, avec 121 figures. . . 6 fr.
- 3<sup>e</sup> Fascicule : **Annexes du tube digestif.** Dents, glandes salivaires, foie, voies biliaires; pancréas, rate, Péritoine. 1 vol. gr. in-8° avec 361 fig. en noir et en couleurs. . . . . 16 fr.
- TOME V.** — 1<sup>er</sup> Fascicule : **Organes génito-urinaires.** Reins, urètre, vessie, urètre, prostate, verge, périnée, appareil génital de l'homme, appareil génital de la femme. 1 vol. gr. in-8° avec 431 figures. 20 fr.
- 2<sup>e</sup> Fascicule : **Les Organes des Sens** (sous presse).

CHARCOT — BOUCHARD — BRISSAUD

BABINSKI, BALLEZ, P. BLOCC, BOIX, BRAULT, CHANTEMESSE, CHARRIN, CHAUFFARD, COURTOIS-SUFFIT, DUTIL, GILBERT, GUIGNARD, L. GUINON, G. GUINON, HALLION, LAMY, LE GENDRE, MARFAN, MARIE, MATHIEU, NETTER, CÉTINGER, ANDRÉ PETIT, RICHARDIÈRE, ROGER, RUAULT, SOUQUES, THIBERGE, THOINOT, FERNAND WIDAL.

# Traité de Médecine

## DEUXIÈME ÉDITION

PUBLIÉ SOUS LA DIRECTION DE MM.

### BOUCHARD

Professeur à la Faculté de médecine de Paris,  
Membre de l'Institut.

### BRISSAUD

Professeur à la Faculté de médecine de Paris,  
Médecin de l'hôpital Saint-Antoine.

10 vol. gr. in-8°, av. fig. dans le texte. *En souscription.* 150 fr.

### TOME I<sup>er</sup>

1 vol. gr. in-8° de 845 pages, avec figures dans le texte. 16 fr.

**Les Bactéries**, par L. GUIGNARD, membre de l'Institut et de l'Académie de médecine, professeur à l'École de Pharmacie de Paris. — **Pathologie générale infectieuse**, par A. CHARRIN, professeur remplaçant au Collège de France, directeur du laboratoire de médecine expérimentale, médecin des hôpitaux. — **Troubles et maladies de la Nutrition**, par PAUL LE GENDRE, médecin de l'hôpital Tenon. — **Maladies infectieuses communes à l'homme et aux animaux**, par G.-H. ROGER, professeur agrégé, médecin de l'hôpital de la Porte-d'Aubervilliers.

### TOME II

1 vol. grand in-8° de 894 pages avec figures dans le texte. 16 fr.

**Fièvre typhoïde**, par A. CHANTEMESSE, professeur à la Faculté de médecine de Paris, médecin des hôpitaux. — **Maladies infectieuses**, par F. WIDAL, professeur agrégé, médecin des hôpitaux de Paris. — **Typhus exanthématique**, par L.-H. THOINOT, professeur agrégé, médecin des hôpitaux de Paris. — **Fièvres éruptives**, par L. GUINON, médecin des hôpitaux de Paris. — **Erysipèle**, par E. BOIX, chef de laboratoire à la Faculté. — **Diphthérie**, par A. RUAULT. — **Rhumatisme**, par CÉTINGER, médecin des hôpitaux de Paris. — **Scorbut**, par TOLLEMER, ancien interne des hôpitaux.

### TOME III

1 vol. grand in-8° de 702 pages avec figures dans le texte. 16 fr.

**Maladies cutanées**, par G. THIBERGE, médecin de l'hôpital de la Pitié. — **Maladies vénériennes**, par G. THIBERGE. — **Maladies du sang**, par A. GILBERT, professeur agrégé, médecin des hôpitaux de Paris. — **Intoxications**, par A. RICHARDIÈRE, médecin des hôpitaux de Paris.

### TOME IV

1 vol. grand in-8° de 680 pages avec figures dans le texte. 16 fr.

**Maladies de la bouche et du pharynx**, par A. RUAULT. — **Maladies de l'estomac**, par A. MATHIEU, médecin de l'hôpital Andral. — **Maladies du pancréas**, par A. MATHIEU. — **Maladies de l'intestin**, par COURTOIS-SUFFIT, médecin des hôpitaux. — **Maladies du péritoine**, par COURTOIS-SUFFIT.

### TOME V

1 vol. gr. in-8° avec fig. en noir et en coul. dans le texte. 18 fr.

**Maladies du foie et des voies biliaires**, par A. CHAUFFARD, professeur agrégé, médecin des hôpitaux. — **Maladies du rein et des capsules surrénales**, par A. BRAULT, médecin des hôpitaux. — **Pathologie des organes hématopoiétiques et des glandes vasculaires sanguines**, par G.-H. ROGER, professeur agrégé, médecin de l'hôpital de la Porte-d'Aubervilliers.



**TOME VI**

1 vol. grand in-8° de 612 pages avec figures dans le texte. 14 fr.

**Maladies du nez et du larynx**, par A. RUAULT. — **Asthme**, par E. BRISAUD, professeur à la Faculté de médecine de Paris, médecin de l'hôpital Saint-Antoine. — **Coqueluche**, par P. LE GENDRE, médecin des hôpitaux. — **Maladies des bronches**, par A.-B. MARFAN, professeur agrégé à la Faculté de médecine de Paris, médecin des hôpitaux. — **Troubles de la circulation pulmonaire**, par A.-B. MARFAN. — **Maladies aiguës du poumon**, par NETTER, professeur agrégé à la Faculté de médecine de Paris, médecin des hôpitaux.

**TOME VII**

1 vol. grand in-8° de 550 pages avec figures dans le texte. 14 fr.

**Maladies chroniques du poumon**, par A.-B. MARFAN, professeur agrégé à la Faculté de médecine de Paris, médecin des hôpitaux. — **Phtisie pulmonaire**, par A.-B. MARFAN. — **Maladies de la plèvre**, par NETTER, professeur agrégé à la Faculté de médecine de Paris, médecin des hôpitaux. — **Maladies du médiastin**, par A.-B. MARFAN.

**TOME VIII**

1 vol. grand in-8° de 580 pages avec figures dans le texte. 14 fr.

**Maladies du cœur**, par ANDRÉ PETIT, médecin des hôpitaux. — **Maladies des vaisseaux sanguins**, par W. CETTINGER, médecin des hôpitaux.

**Traité de Physiologie**

**J.-P. MORAT**  
Professeur à l'Université de Lyon.

PAR

**Maurice DOYON**  
Professeur agrégé  
à la Faculté de médecine de Lyon

5 vol. gr. in-8° avec fig. en noir et en couleurs. En souscription. 55 fr.

- I. — **Fonctions d'innervation**, par J.-P. MORAT. 1 vol. gr. in-8°, avec 263 figures noires et en couleurs. . . . . 15 fr.  
 II. — **Fonctions de nutrition** : Circulation, par M. DOYON; Calorification, par P. MORAT. 1 vol. gr. in-8° avec 173 figures en noir et en couleurs. 12 fr.  
 III. — **Fonctions de nutrition (suite et fin)** : Respiration, excrétion, par J.-P. MORAT; Digestion, Absorption, par M. DOYON. 1 vol. gr. in-8°, avec 167 figures en noir et en couleurs. . . . . 12 fr.

**Traité des Maladies de l'Enfance**

PUBLIÉ SOUS LA DIRECTION DE MM.

**J. GRANCHER**

Professeur à la Faculté de médecine de Paris,  
Membre de l'Académie de médecine, médecin de l'hôpital des Enfants-Malades.

**J. COMBY**  
Médecin des hôpitaux.

**A.-B. MARFAN**  
Agrégré, Médecin des hôpitaux.

5 vol. grand in-8° avec figures dans le texte. . 90 fr.

CHAQUE VOLUME EST VENDU SÉPARÉMENT

# Traité de Pathologie générale

Publié par **Ch. BOUCHARD**

Membre de l'Institut, Professeur à la Faculté de Médecine de Paris.

SECRÉTAIRE DE LA RÉDACTION : **G.-H. ROGER**

Professeur agrégé à la Faculté de médecine de Paris, Médecin des hôpitaux.

## COLLABORATEURS :

MM. ARNOZAN, D'ARSONVAL, BENNI, R. BLANCHARD, BOULAY, BOURCY, BRUN, CADIOT, CHABRIÉ, CHANTEMESSE, CHARRIN, CHAUFFARD, COURMONT, DEJERINE, PIERRE DELBET, DEVIC, DUCAMP, MATHIAS DUVAL, FÉRÉ, FRÉMY, GAUCHER, GILBERT, GLEY, GUIGNARD, LOUIS GUINON, J.-F. GUYON, HALLÉ, HÉNOQUE, HUGOUNENQ, LAMBLING, LANDOUZY, LAVERAN, LEBRETON, LE GENDRE, LEJARS, LE NOIR, LERMOYER, LETCLLE, LUBET-BARBON, MARFAN, MAYOR, MÉNÉTRIER, NETTER, PIERRIT, G.-H. ROGER, GABRIEL ROUX, RUFFER, RAYMOND, TRIPIER, VUILLEMIN, FERNAND VIDAL.

6 volumes, en souscription jusqu'à la publication du tome VI. 120 fr.

## TOME I

1 vol. grand in-8° de 1018 pages avec figures dans le texte : 18 fr.

Introduction à l'étude de la pathologie générale. — Pathologie comparée de l'homme et des animaux. — Considérations générales sur les maladies des végétaux. — Pathologie générale de l'embryon. Tératogénie. — L'hérédité et la pathologie générale. — Prédilection et immunité. — La fatigue et le surmenage. — Les Agents mécaniques. — Les Agents physiques. Chaleur. Froid. Lumière. Pression atmosphérique. Son. — Les Agents physiques. L'énergie électrique et la matière vivante. — Les Agents chimiques : les caustiques. — Les intoxications.

## TOME II

1 vol. grand in-8° de 940 pages avec figures dans le texte : 18 fr.

L'infection. — Notions générales de morphologie bactériologique. — Notions de chimie bactériologique. — Les microbes pathogènes. — Le sol, l'eau et l'air, agents des maladies infectieuses. — Des maladies épidémiques. — Sur les parasites des tumeurs épithéliales malignes. — Les parasites.

## TOME III

1 vol. in-8° de 1400 pages, avec figures dans le texte, publié en deux fascicules : 28 fr.

Fasc. I. — Notions générales sur la nutrition à l'état normal. — Les troubles préalables de la nutrition. — Les réactions nerveuses. — Les processus pathogéniques de deuxième ordre.

Fasc. II. — Considérations préliminaires sur la physiologie et l'anatomie pathologiques. — De la fièvre. — L'hypothermie. — Mécanisme physiologique des troubles vasculaires. — Les désordres de la circulation dans les maladies. — Thrombose et embolie. — De l'inflammation. — Anatomie pathologique générale des lésions inflammatoires. — Les altérations anatomiques non inflammatoires. — Les tumeurs.

## TOME IV

1 vol. in-8° de 719 pages avec figures dans le texte : 16 fr.

Evolution des maladies. — Sémiologie du sang. — Spectroscopie du sang. Sémiologie. — Sémiologie du cœur et des vaisseaux. — Sémiologie du nez et du pharynx nasal. — Sémiologie du larynx. — Sémiologie des voies respiratoires. — Sémiologie générale du tube digestif.

## TOME V

1 fort vol. in-8° de 1180 pages avec nombr. figures dans le texte : 28 fr.

Sémiologie du foie. — Pancréas. — Analyse chimique des urines. — Analyse microscopique des urines (Histo-bactériologique). — Le rein, l'urine et l'organisme. — Sémiologie des organes génitaux. — Sémiologie du système nerveux.

**TOME VI**

1 vol. grand in-8° avec figures dans le texte (sous presse)

Les troubles de l'intelligence. — Sémiologie de la peau. — Sémiologie de l'appareil visuel. — Sémiologie de l'appareil auditif. — Considérations générales sur le diagnostic et le pronostic. — Diagnostic des maladies infectieuses par les méthodes de laboratoire. — Cyto-diagnostic des épanchements séro-fibrineux. — Ponction lombaire. — Applications cliniques de la cryoscopie. — De l'élimination provoquée comme méthode du diagnostic. — Les rayons de Röntgen et leurs applications médicales. — Thérapeutique générale. — Hygiène.

# Traité de Physique Biologique

publié sous la direction de MM.

**D'ARSONVAL**

Professeur au Collège de France  
Membre de l'Institut et de l'Académie  
de médecine.

**GARIEL**

Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées  
Prof. à la Faculté de médecine de Paris  
Membre de l'Académie de médecine.

**CHAUVEAU**

Profes. au Muséum d'histoire naturelle  
Membre de l'Institut  
et de l'Académie de médecine.

**MAREY**

Professeur au Collège de France  
Membre de l'Institut  
et de l'Académie de médecine.

Secrétaire de la rédaction : **M. WEISS**

Ingénieur des Ponts et Chaussées  
Professeur agrégé à la Faculté de médecine de Paris

3 vol. in-8°. En souscription . . . . . 60 fr.

**TOME PREMIER.** 1 fort vol. in-8°, avec 591 figures dans le texte. . 25 fr.

**Sous Presse : Tome II**

**L'ŒUVRE MÉDICO-CHIRURGICAL**

D<sup>r</sup> **CRITZMAN**, directeur

# Suite de Monographies cliniques

**SUR LES QUESTIONS NOUVELLES**

*en Médecine, en Chirurgie et en Biologie*

Chaque monographie est vendue séparément. . . . . 1 fr. 25

Il est accepté des abonnements pour une série de 10 Monographies au prix payable d'avance de 10 fr. pour la France et 12 fr. pour l'étranger (port compris).

**DERNIÈRES MONOGRAPHIES PUBLIÉES**

- N° 27. **Traitements modernes de l'Hypertrophie de la Prostata**, par le D<sup>r</sup> E. DESNOS, ancien interne des hôpitaux.
- N° 28. **La Gastro-entérostomie**, par MM. ROUX et BOURGET, professeurs de l'Université à Lausanne.
- N° 29. **Les Ponctions rachidiennes accidentelles et les complications des plaies pénétrantes du rachis par armes blanches sans lésions de la moelle**, par le D<sup>r</sup> E. MATHIEU, médecin inspecteur de l'armée, ancien directeur et professeur au Val-de-Grâce.
- N° 30. **Le Ganglion Lymphatique**, par HENRI DOMINICI.

# Traité de Technique opératoire

CH. MONOD

Professeur agrégé à la Faculté  
de médecine de Paris  
Chirurgien de l'Hôpital Saint-Antoine  
Membre de l'Académie de médecine

PAR

J. VANVERTS

Ancien interno lauréat des Hôpitaux  
de Paris  
Chef de clinique à la Faculté  
de médecine de Lille

2 forts vol. gr. in-8°, avec très nombreuses figures dans le texte.  
*En souscription. . . 35 fr.*

---

## Les Difformités acquises de l'Appareil locomoteur

PENDANT L'ENFANCE ET L'ADOLESCENCE

Par le Dr **E. KIRMISSON**

Professeur de Clinique chirurgicale infantile à la Faculté de médecine  
Chirurgien de l'hôpital Trousseau

*1 vol. in-8° avec 430 figures dans le texte. . . 15 fr.*

Ce volume fait suite au **Traité des Maladies chirurgicales d'origine congénitale** (312 figures et 2 planches en couleurs). *Publié en 1898. . . 15 fr.*  
Ces deux ouvrages constituent un véritable traité de Chirurgie orthopédique.

---

## Traité d'Hygiène

Par **A. PROUST**

Professeur d'Hygiène à la Faculté de Paris, Membre de l'Académie de médecine  
Inspecteur général des Services sanitaires.

*Troisième édition revue et considérablement augmentée*

AVEC LA COLLABORATION DE

**A. NETTER**

et

**H. BOURGES**

Agrégé  
Médecin de l'hôpital Trousseau

Chef du laboratoire d'hygiène  
à la Faculté de médecine

Ouvrage couronné par l'Institut et la Faculté de médecine

*1 vol. in-8°, avec fig. et cartes pub. en 2 fasc. En souscription.. 18 fr.*

---

## Traité de Chirurgie d'urgence

Par **Félix LEJARS**

Professeur agrégé, Chirurgien de l'hôpital Tenon.

**TROISIÈME ÉDITION, REVUE ET AUGMENTÉE**

*1 vol. gr. in-8° de 1005 pages, avec 751 fig. dont 351 dessinées d'après nature, par le Dr DALBINE, et 172 fotogr. origin. Relié toile. 25 fr.*

---

**Manuel de Pathologie externe**, par MM. RECLUS, KIR-  
MISSON, PEYROT, BOUILLY, professeurs agrégés à la Faculté de  
médecine de Paris, chirurgiens des hôpitaux. Édition complète  
illustrée de 720 figures. 4 volumes in-8°. . . . . 40 fr.  
*Chaque volume est vendu séparément.* . . . . . 10 fr.

**Manuel pratique du Traitement de la Diphtérie**  
(Sérothérapie, Tubage, Trachéotomie), par M. DEGUY, chef  
du laboratoire de la Faculté à l'hôpital des Enfants, et Benjamin  
WEILL, moniteur de tubage et de trachéotomie à l'hôpital des  
Enfants-Malades. Introduction par A.-B. MARFAN, professeur agrégé,  
médecin de l'hôpital des Enfants-Malades. 1 vol. in-8° broché, avec  
figures et photographies dans le texte . . . . . 6 fr.

**Les Maladies infectieuses**, par G.-H. ROGER, professeur  
agrégé, médecin de l'hôpital de la Porte-d'Aubervilliers. 1 vol. in-8°  
de 1520 pages publié en 2 fascicules avec figures . . . . . 28 fr.

**Précis d'Histologie**, par Mathias DUVAL, professeur à la  
Faculté de médecine de Paris, membre de l'Académie de médecine.  
*Deuxième édition, revue et augmentée*, illustrée de 427 figures dans  
le texte. 1 vol. gr. in-8° de 1020 pages . . . . . 18 fr.

**Traité élémentaire de Clinique thérapeutique**,  
par le Dr Gaston LYON, ancien chef de clinique médicale à la  
Faculté de médecine de Paris. *Quatrième édition revue et augmentée*.  
1 fort volume in-8° de 1540 pages, cartonné toile. . . . . 25 fr.

**Les Maladies du cuir chevelu.** — I. Maladies sébor-  
rhéiques : **Séborrhée, Acnés, Calvitie**, par le Dr R. SA-  
BOURAUD, chef du laboratoire de la Ville de Paris à l'hôpital Saint-  
Louis, membre de la Société de Dermatologie. 1 volume in-8°, avec  
91 figures dans le texte dont 40 aquarelles en couleurs . . . 10 fr.

**Nouveaux procédés d'Exploration.** *Leçons de Patholo-  
gie générale*, professées à la Faculté de médecine par Ch. ACHARD,  
agrégé, médecin de l'hôpital Tenon, recueillies et rédigées par  
MM. P. SAINTON et LÉPER. 1 vol. in-8°, avec figures en noir et  
en couleurs . . . . . 8 fr.

**Les Tics et leur traitement**, par Henry MEIGE et E. FEIN-  
DEL. Préface de M. le Professeur BRISSAUD. 1 vol. in-8° de  
640 pages . . . . . 6 fr.

# Bibliothèque Diamant

## des Sciences médicales et biologiques

*Cette collection est publiée dans le format in-16 raisin, avec nombreuses figures dans le texte, cartonnage à l'anglaise, tranches rouges.*

*Sous presse*

**Manuel de Bactériologie médicale**, par le D<sup>r</sup> BERLIOZ, professeur à l'École de médecine de Grenoble. 1 vol.

*Derniers volumes publiés dans la Collection*

**Manuel de Diagnostic médical et d'Exploration clinique**, par P. SPILLMANN, professeur à la Faculté de médecine de Nancy, et P. HAUSHALTER, professeur agrégé. *Quatrième édition entièrement refondue.* 1 vol. avec 89 figures. . . . . 6 fr.

**Précis de Microbie.** *Technique et microbes pathogènes*, par M. le D<sup>r</sup> L.-H. THOINOT, professeur agrégé à la Faculté de médecine de Paris, et E.-J. MASSELIN, médecin-vétérinaire. Ouvrage couronné par la Faculté de médecine. *Quatrième édition entièrement refondue.* 1 volume, avec figures en noir et en couleurs. . . 8 fr.

**Éléments de Physiologie**, par Maurice ARTHUS, chef de laboratoire à l'Institut Pasteur de Lille. 1 vol., avec figures. 8 fr.

**Manuel de Thérapeutique**, par le D<sup>r</sup> BERLIOZ, professeur à l'École de médecine de Grenoble, avec préface du Professeur BOUGHARD. *Quatrième édition revue et augmentée.* 1 vol. . 6 fr.

**Manuel de Pathologie interne**, par G. DIEULAFOY, professeur à la Faculté de médecine de Paris. *Treizième édition entièrement refondue et augmentée.* 4 vol. avec fig. en n. et en coul. 28 fr.

**Manuel d'Anatomie microscopique et d'Histologie**, par M. P.-E. LAUNOIS, professeur agrégé à la Faculté de médecine. Préface de M. le Professeur Mathias DUVAL. *Deuxième édition entièrement refondue.* 1 volume avec 264 figures . . . . . 8 fr.

**Éléments de Chimie physiologique**, par Maurice ARTHUS, professeur à l'Université de Fribourg (Suisse). *Quatrième édition revue et corrigée.* 1 volume, avec figures . . . . . 5 fr.

**Précis de Bactériologie clinique**, par le D<sup>r</sup> R. WURTZ, professeur agrégé à la Faculté de médecine de Paris. *Deuxième édition revue et augmentée.* 1 volume, avec tableaux et figures. 6 fr.

**Précis d'Anatomie pathologique**, par M. L. BARD, professeur à la Faculté de médecine de Lyon. *Deuxième édition revue et augmentée.* 1 volume, avec 125 figures . . . . . 7 fr. 50

## Bibliothèque

## d'Hygiène thérapeutique

DIRIGÉE PAR

## Le Professeur PROUST

Membre de l'Académie de médecine, Médecin de l'Hôtel-Dieu,  
Inspecteur général des Services sanitaires.

*Chaque ouvrage forme un volume in-16, cartonné toile, tranches rouges,  
et est vendu séparément : 4 fr.*

Chacun des volumes de cette collection n'est consacré qu'à une seule maladie ou à un seul groupe de maladies. Grâce à leur format, ils sont d'un maniement commode. D'un autre côté, en accordant un volume spécial à chacun des grands sujets d'hygiène thérapeutique, il a été facile de donner à leur développement toute l'étendue nécessaire.

## VOLUMES PARUS

- L'Hygiène du Goutteux**, par le professeur PROUST et A. MATHIEU, médecin de l'hôpital Andral.
- L'Hygiène de l'Obèse**, par le professeur PROUST et A. MATHIEU, médecin de l'hôpital Andral.
- L'Hygiène des Asthmatiques**, par E. BRISSAUD, professeur agrégé, médecin de l'hôpital Saint-Antoine.
- L'Hygiène du Syphilitique**, par H. BOURGES, préparateur au laboratoire d'hygiène de la Faculté de médecine.
- Hygiène et thérapeutique thermales**, par G. DELFAU, ancien interne des hôpitaux de Paris.
- Les Cures thermales**, par G. DELFAU, ancien interne des hôpitaux de Paris.
- L'Hygiène du Neurasthénique**, par le professeur PROUST et G. BALLEZ, professeur agrégé, médecin des hôpitaux de Paris. (*Deuxième édition.*)
- L'Hygiène des Albuminuriques**, par le D<sup>r</sup> SPRINGER, ancien interne des hôpitaux de Paris, chef de laboratoire de la Faculté de médecine à la Clinique médicale de l'hôpital de la Charité.
- L'Hygiène du Tuberculeux**, par le D<sup>r</sup> CHUQUET, ancien interne des hôpitaux de Paris, avec une introduction du D<sup>r</sup> DAREMBERG, membre correspondant de l'Académie de médecine.
- Hygiène et thérapeutique des maladies de la Bouche**, par le D<sup>r</sup> CRUET, dentiste des hôpitaux de Paris, avec une préface de M. le professeur LANNE-LONGUE, membre de l'Institut.
- Hygiène des maladies du Cœur**, par le D<sup>r</sup> VAQUEZ, professeur agrégé à la Faculté de médecine de Paris, médecin des hôpitaux, avec une préface du professeur POTAIN.
- Hygiène du Diabétique**, par A. PROUST et A. MATHIEU.
- L'Hygiène du Dyspeptique**, par le D<sup>r</sup> LINOSSIER, professeur agrégé à la Faculté de médecine de Lyon, membre correspondant de l'Académie de médecine, médecin à Vichy.

*Sous presse :*

**Hygiène du Larynx, du Nez et des Oreilles**, par M. le D<sup>r</sup> LUBET BARBON.

# Traité

DE

# Chimie industrielle

Par R. WAGNER et F. FISCHER

QUATRIÈME ÉDITION FRANÇAISE ENTIÈREMENT REFOUNDUE

Rédigée d'après la quinzième édition allemande

par le D<sup>r</sup> L. GAUTIER

2 vol. grand in-8° avec de nombreuses figures dans le texte

En souscription. . . . . 30 fr.

A l'apparition du Tome II, le prix de l'ouvrage sera porté à 35 francs.

---

Dans cette quatrième édition, l'ouvrage a subi un remaniement si complet et si profond qu'on peut le considérer comme un livre nouveau, absolument au niveau des progrès de la science et répondant de la manière la plus complète aux besoins de l'industrie chimique actuelle. Tous les perfectionnements de la chimie technologique y sont exposés avec tous les développements qu'ils comportent et afin de rendre encore plus facile l'intelligence du texte, de nombreuses figures nouvelles ont été introduites.

Ainsi refondue et mise au courant, nous espérons que la nouvelle édition française de la *Chimie industrielle* recevra de la part du public un accueil aussi favorable que celui qui a été fait aux éditions précédentes.

---

**Le Constructeur**, principes, formules, tracés, tables et renseignements pour l'établissement des *projets de machines* à l'usage des ingénieurs, constructeurs, architectes, mécaniciens, etc., par F. Reuleaux. *Troisième édition française*, par A. Debize, ingénieur des manufactures de l'Etat. 1 volume in-8° avec 184 figures. . . . . 30 fr.

**Traité d'analyse chimique qualitative**, par R. Frésenius. Traité des opérations chimiques, des réactifs et de leur action sur les corps les plus répandus, essais au chalumeau, analyse des eaux potables, des eaux minérales, du sol, des engrais, etc. Recherches chimico-légales, analyse spectrale. *Dixième édition française* d'après la 16<sup>e</sup> édition allemande, par L. Gautier. 1 vol. in-8° avec grav. et un tableau chromolithographique . . . . . 7 fr.

**Traité d'analyse chimique quantitative**, par R. Frésenius. Traité du dosage et de la séparation des corps simples et composés les plus usités en pharmacie, dans les arts et en agriculture, analyse par les liqueurs titrées, analyse des eaux minérales, des cendres végétales, des sols, des engrais, des minerais métalliques, des fontes, dosage des sucres, alcalimétrie, chlorométrie, etc. *Septième édition française*, traduite sur la 6<sup>e</sup> édition allemande, par L. Gautier. 1 vol. in-8° avec 251 grav. dans le texte . . . 16 fr.



*Traité d'Analyse chimique quantitative par Electrolyse*, par **J. RIBAN**, professeur Chargé du cours d'Analyse chimique et maître de Conférences à la Faculté des Sciences de l'Université de Paris. 1 volume grand in-8°, avec 96 figures dans le texte . . . . . **9 fr.**

*Manuel pratique de l'Analyse des Alcools et des Spiritueux*, par **Charles GIRARD**, directeur du Laboratoire municipal de la Ville de Paris, et **Lucien GUNIASSE**, chimiste-expert de la Ville de Paris. 1 volume in-8° avec figures et tableaux dans le texte. Relié toile . . . . . **7 fr.**

*Chimie Végétale et Agricole (Station de Chimie végétale de Meudon, 1883-1889)*, par **M. BERTHELOT**, sénateur, secrétaire perpétuel de l'Académie des Sciences, professeur au Collège de France. 4 volumes in-8° avec figures dans le texte . . . **36 fr.**

*Précis de Chimie analytique, Analyse qualitative, Analyse quantitative par liqueurs titrées, Analyse des gaz, Analyse organique élémentaire, Analyses et Dosages relatifs à la Chimie agricole, Analyse des vins, Essais des principaux minerais*, par **J.-A. MUL-  
LER**, docteur ès sciences, professeur à l'École supérieure des Sciences d'Alger. 1 volume in-12, broché. . . . . **3 fr.**

## Précis de Géographie économique

PAR MM.

**MARCEL DUBOIS**

Professeur de Géographie coloniale  
à la Faculté des Lettres de Paris

**J.-G. KERGOMARD**

Professeur agrégé d'Histoire  
et Géographie au Lycée de Nantes

### DEUXIÈME ÉDITION

entièrement refondue et mise au courant des dernières statistiques

AVEC LA COLLABORATION DE

**M. Louis LAFFITTE**

Professeur à l'École de Commerce de Nantes

1 vol. in-8°. . . . . **8 fr.**

On vend séparément :

La France, l'Europe. 1 vol. . . . . **6 fr.**

L'Asie, l'Océanie, l'Afrique et les Colonies. 1 vol. . . . . **4 fr.**

Cette œuvre fera époque dans l'enseignement de la Géographie. Elle est la seule, à notre connaissance, en-dehors des travaux suscités par la Société de Géographie commerciale, qui traite d'une façon principale cette branche de la géographie.  
(Bulletin de la Chambre de Commerce de Paris.)

**OUVRAGES DE M. A. DE LAPPARENT**

Membre de l'Institut, professeur à l'École libre des Hautes-Études.

**TRAITÉ DE GÉOLOGIE**

QUATRIÈME ÉDITION ENTIÈREMENT REFOUNDUE ET CONSIDÉRABLEMENT AUGMENTÉE

3 vol. grand in-8°, avec nomb. fig. cartes et croquis . . . 35 fr.

- Abrégé de géologie.** *Quatrième édition, entièrement refondue.* 1 vol. in-16 de viii-299 pages avec 141 gravures et une carte géologique de la France en chromolithographie, cartonné toile . . . . . 3 fr.
- Notions générales sur l'écorce terrestre.** 1 vol. in-16 de 156 pages avec 33 figures, broché. . . . . 1 fr. 20
- La géologie en chemin de fer.** Description géologique du Bassin parisien et des régions adjacentes. 1 vol. in-18 de 608 pages, avec 3 cartes chromolithographiées, cartonné toile. . . . . 7 fr. 50
- Cours de minéralogie.** *Troisième édition, revue et augmentée.* 1 vol. grand in-8° de xx-703 pages avec 619 gravures dans le texte et une planche chromolithographiée. . . . . 15 fr.
- Précis de minéralogie.** *Troisième édition, revue et augmentée.* 1 vol. in-16 de xii-398 pages avec 233 gravures dans le texte et une planche chromolithographiée, cartonné toile. . . . . 5 fr.
- Leçons de géographie physique.** *Deuxième édition, revue et augmentée.* 1 vol. grand in-8° de xvi-718 pages avec 162 figures dans le texte et une planche en couleurs. . . . . 12 fr.
- Le siècle du Fer.** 1 vol. in-18 de 360 pages, broché . . . . . 2 fr. 50

**Guides du Touriste, du Naturaliste et de l'Archéologue**

publiés sous la direction de M. Marcellin BOULE

*Pour paraître en mai 1903 :* **LA SAVOIE**

**VOLUMES PUBLIÉS**

- Le Cantal,** par M. BOULE, docteur ès sciences, et L. FARGES, archi-  
viste-paléographe. 1 vol. avec 83 fig. et 2 cartes en coul.
- La Lozère,** par E. CORD, ingénieur-agronome, G. CORD, docteur en  
droit, avec la collaboration de M. A. VIRÉ, docteur ès sciences.  
1 vol. in-16 avec 87 fig. et 4 cartes en coul.
- Le Puy-de-Dôme et Vichy,** par M. BOULE, docteur ès  
sciences, Ph. GLANGEAUD, maître de conférences à l'Université de  
Clermont, G. ROUCHON, archiviste du Puy-de-Dôme, A. VERNIÈRE,  
ancien président de l'Académie de Clermont. 1 vol. avec 109 figures  
et 3 cartes en coul.
- La Haute-Savoie,** par MARC LE ROUX, conservateur du Musée  
d'Annecy. 1 vol. avec 105 fig. et 3 cartes en couleurs.

*Chaque volume in-16, relié toile anglaise. . . . . 4 fr. 50*

MISSION SAHARIENNE FOUREAU-LAMY

# D'Alger au Congo par le Tchad

Par F. FOUREAU

Lauréat de l'Institut.

1 fort volume in-8°, avec 170 figures reproduites directement d'après les photographies de l'auteur, et une carte en couleurs des régions explorées par la Mission.

Broché : 12 francs. — Richement cartonné : 15 francs.

## Traité de Zoologie

Par Edmond PERRIER

Membre de l'Institut et de l'Académie de médecine,  
Directeur du Muséum d'Histoire Naturelle.

- FASCICULE I : **Zoologie générale.** 1 vol. gr. in-8° de 412 p. avec 458 figures dans le texte. . . . . 12 fr.
- FASCICULE II : **Protozoaires et Phytozoaires.** 1 vol. gr. in-8° de 452 p., avec 243 figures. . . . . 10 fr.
- FASCICULE III : **Arthropodes.** 1 vol. gr. in-8° de 480 pages, avec 278 figures. . . . . 8 fr.
- Ces trois fascicules réunis forment la première partie. 1 vol. in-8° de 1344 pages, avec 980 figures. . . . . 30 fr.
- FASCICULE IV : **Vers et Mollusques.** 1 vol. gr. in-8° de 792 pages, avec 566 figures dans le texte. . . . . 16 fr.
- FASCICULE V : **Amphioxus, Tuniciers.** 1 vol. gr. in-8° de 221 pages, avec 97 figures dans le texte. . . . . 6 fr.
- FASCICULE VI : **Vertébrés.** (*Sous presse*).

### PETITE BIBLIOTHÈQUE DE " LA NATURE "

- Recettes et Procédés utiles,** recueillis par Gaston TISSANDIER, rédacteur en chef de *la Nature*. *Dixième édition.*
- Recettes et Procédés utiles.** *Deuxième série : La Science pratique,* par Gaston TISSANDIER. *Cinquième édition,* avec figures dans le texte.
- Nouvelles Recettes utiles et Appareils pratiques.** *Troisième série,* par Gaston TISSANDIER. *Quatrième édition,* avec 91 figures dans le texte.
- Recettes et Procédés utiles.** *Quatrième série,* par Gaston TISSANDIER. *Troisième édition,* avec 38 figures dans le texte.
- Recettes et Procédés utiles.** *Cinquième série,* par J. LAFFARGUE, secrétaire de la rédaction de *la Nature*. Avec figures dans le texte.

Chacun de ces volumes in-18 est vendu séparément

Broché . . . . . 2 fr. 25 | Cartonné toile . . . . . 3 fr.

**La Physique sans appareils et la Chimie sans laboratoire,** par Gaston TISSANDIER, rédacteur en chef de *la Nature*. *Septième édition des Récréations scientifiques. Ouvrage couronné par l'Académie (Prix Montyon).* Un volume in-8° avec nombreuses figures dans le texte. Broché, 3 fr. Cartonné toile, 4 fr.

# LA GÉOGRAPHIE

BULLETIN

DE LA

Société de Géographie

PUBLIÉ TOUS LES MOIS PAR

LE BARON HULOT, Secrétaire général de la Société

ET

M. CHARLES RABOT, Secrétaire de la Rédaction

---

**ABONNEMENT ANNUEL :** PARIS : 24 fr. — DÉPARTEMENTS : 26 fr.  
ÉTRANGER : 28 fr. — Prix du numéro : 2 fr. 50

Chaque numéro, du format grand in-8°, composé de 80 pages et accompagné de cartes et de gravures nombreuses, comprend des mémoires, une chronique, une bibliographie et le compte rendu des séances de la Société de Géographie. Cette publication n'est pas seulement un recueil de récits de voyages pittoresques, mais d'observations et de renseignements scientifiques.

La chronique, rédigée par des spécialistes pour chaque partie du monde, constitue un résumé complet du *mouvement géographique* pour chaque mois.

---

# La Nature

REVUE ILLUSTRÉE

*des sciences et de leurs applications aux arts et à l'industrie*

DIRECTEUR : **Henri de PARVILLE**

---

**Abonnement annuel :** Paris : 20 fr. — Départements : 25 fr. —  
Union postale : 26 fr.

**Abonnement de six mois :** Paris : 10 fr. — Départements : 12 fr. 50.  
— Union postale : 13 fr.

Fondée en 1873 par GASTON TISSANDIER, la *Nature* est aujourd'hui le plus important des journaux de vulgarisation scientifique par le nombre de ses abonnés, par la valeur de sa rédaction et par la sûreté de ses informations. Elle doit ce succès à la façon dont elle présente la science à ses lecteurs en lui ôtant son côté aride tout en lui laissant son côté exact, à ce qu'elle intéresse les savants et les érudits aussi bien que les jeunes gens et les personnes peu familiarisées avec les ouvrages techniques; à ce qu'elle ne laisse, enfin, rien échapper de ce qui se fait ou se dit de neuf dans le domaine des découvertes qui modifient sans cesse les conditions de notre vie.

---

Paris. — L. MARETHEUX, imprimeur, 1, rue Cassette. — 2840.