

ENCYCLOPÉDIE SCIENTIFIQUE

DES

AIDE-MÉMOIRE

PUBLIÉE

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

L. GAGES — Essais des Métaux, II

1

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

N° 3 3 B

ENCYCLOPÉDIE SCIENTIFIQUE DES AIDE-MÉMOIRE

PUBLIÉE SOUS LA DIRECTION

DE M. LÉAUTÉ, MEMBRE DE L'INSTITUT.

ESSAIS DES MÉTAUX

THÉORIE & PRATIQUE

PAR

L. GAGES

Chef d'escadron d'Artillerie

PARIS

GAUTHIER-VILLARS

IMPRIMEUR-ÉDITEUR

Quai des Grands-Augustins, 55

MASSON ET C^{ie}, ÉDITEURS,

LIBRAIRES 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. Alliages métalliques.**
- V. Essais des métaux. Machines et appareils.**
- VI. Essais des métaux. Théorie et pratique des
essais.**

THÉORIE ET PRATIQUE DES ESSAIS

Ce volume, consacré à l'étude de la théorie et de la pratique des essais, comprend deux titres.

Dans le titre premier, sont analysés les principaux travaux ou mémoires se rapportant à la science des essais, ainsi que les expériences fondamentales qui leur servent de base.

Le titre II fait connaître les diverses méthodes d'essais des métaux employées dans la pratique, en spécifiant, pour les plus importants d'entre eux, les détails d'application de ces méthodes d'après les cahiers des charges admis le plus généralement.

TITRE PREMIER

THÉORIE DES ESSAIS

Ainsi qu'on l'a dit dans le volume de l'Encyclopédie se rapportant aux machines et appareils employés pour les essais des métaux, l'essai de traction est le mieux connu ; aussi, n'y aura-t-il pas lieu d'être surpris que les considérations théoriques exposées au cours du présent titre concernent plus spécialement l'étude de la déformation résultant de cet effort.

On verra toutefois, dans la suite, quelles déductions il est permis de tirer au sujet des déformations produites par des efforts différents tels que la compression, le cisaillement, etc.

Enfin, l'exposé de théories récentes ayant trait à la distribution des déformations dans les corps solides fera ressortir l'intérêt de premier ordre qui s'attache à une étude plus générale non spécialisée à l'unique phénomène de la traction en éclairant d'un jour nouveau les notions classiques actuelles relatives à l'élasticité.

CHAPITRE PREMIER

ÉTUDE GÉNÉRALE DU PHÉNOMÈNE DE TRACTION

Le présent chapitre a pour objet d'exposer les notions théoriques relatives à l'étude générale du phénomène de traction ainsi que les expériences principales sur lesquelles elles s'appuient ; toutefois, nous réserverons pour un chapitre spécial lui faisant suite, l'étude des conditions variables dans lesquelles peuvent être effectués les essais.

I. NOTIONS PRÉLIMINAIRES

Il convient de rappeler, en les précisant, les différentes phases du phénomène de traction.

Afin de mieux caractériser le phénomène dont il s'agit, nous supposerons que l'éprouvette sou-

mise à l'essai de traction, est en matière douce et que l'épreuve est exécutée sur une machine à manomètre.

L'étirage d'une éprouvette en matière douce, c'est-à-dire susceptible de très grandes déformations permanentes, peut se diviser en un certain nombre de périodes.

1. Période dite élastique. — Dans cette période, le barreau revient à sa longueur primitive si l'on cesse l'effort de traction ; les allongements sont très petits et paraissent sensiblement proportionnels aux efforts qui les produisent. On admet aussi, sous les réserves qui seront faites ultérieurement, qu'ils sont entièrement élastiques, c'est-à-dire qu'ils s'évanouissent quand l'effort cesse d'agir.

La colonne de mercure du manomètre, qui monte assez rapidement quand la charge croît, subit un arrêt brusque au moment où cette charge correspond à la limite élastique, puis elle reprend son mouvement ascensionnel. On note, sur la planche graduée, la division qui correspond à l'arrêt brusque ; un barème calculé en conséquence permet d'en déduire la limite élastique E , soit la charge maxima exprimée en kilogrammes par millimètre carré de la section

primitive que peut supporter le barreau sans éprouver de déformation permanente.

Nous ajouterons que, dans les machines à levier, dès que la limite élastique est atteinte, l'allongement du barreau continue à se produire sans augmentation de poids sur le plateau ; le levier fléchit rapidement, puis s'arrête.

Dans la romaine, le levier constamment ramené à la position horizontale par un déplacement lent du poids mobile, fléchit tout-à-coup.

2. Période de déformation. — La période de déformation est celle pendant laquelle l'éprouvette conserve un allongement permanent si l'on cesse l'effort de traction.

Continuant à observer le mouvement de la colonne mercurielle dans le manomètre, on remarque que le mercure change brusquement de vitesse ; il ne cesse de monter comme au cours de la période élastique, mais lentement, et sa vitesse ascensionnelle décroît de plus en plus.

Les allongements sont bien plus grands que ceux de la première période et sont en grande partie permanents ; ils croissent plus rapidement que les efforts.

Lorsque l'effort cesse d'agir, on sait qu'une faible partie de l'allongement disparaît, l'allon-

gement total se composant d'un allongement élastique et d'un allongement permanent.

Nous avons dit que l'effort correspondant à l'arrêt ou au changement brusque de vitesse du mercure, calculé en conséquence, représentait la limite élastique E . Dans les instants qui suivent, les allongements élastiques produits par les efforts supérieurs à ceux qui correspondent à la limite élastique restent sensiblement proportionnels à ces efforts, au moins pendant une durée fort appréciable, puis ceux-ci croissent plus vite.

Il arrive enfin un moment où le mercure reste stationnaire, l'éprouvette s'allongeant sous un effort constant.

On note la hauteur à laquelle le mercure est ainsi arrivé ; ce sera une hauteur maxima moyenne, car il faut tenir compte des légères oscillations, soit au-dessus, soit au-dessous, qui se produisent presque toujours.

Puis, au moyen de barèmes établis en conséquence, on déduit la charge correspondante par millimètre carré de la section primitive de l'éprouvette qu'on prendra pour valeur de la charge ou résistance à la rupture R .

Le mercure descend ensuite et tombe tout-à-coup ; l'éprouvette s'allonge de plus en plus

sous les efforts décroissants, elle file et enfin elle se brise.

Cette dernière période ne se réalise évidemment qu'avec les machines à indications continues telles que les machines à manomètre ; avec les appareils à levier, on se contente de noter la charge qui a déterminé la rupture et, avec les romaines, la position du poids mobile qui y correspond.

3. Striction. — En même temps que les dimensions longitudinales, les dimensions transversales de l'éprouvette varient, et en sens inverse.

Tant que le mercure n'a pas atteint sa hauteur maxima, l'éprouvette reste sensiblement cylindrique ; puis les variations de dimensions transversales se produisent surtout dans une certaine zone à laquelle on donne le nom de *fuseau* et qui contient la section de rupture.

Cependant, il arrive que plusieurs fuseaux peuvent s'amorcer en diverses régions de l'éprouvette sans qu'on puisse prévoir pendant la plus grande partie de la période finale, quel est celui d'entre eux où se produira la rupture.

Si S est la section primitive du barreau, S' la section minima où s'est produite la rupture, la

14 ÉTUDE GÉNÉRALE DU PHÉNOMÈNE DE TRACTION

valeur de la *striction*, soit du rapport $\frac{S - S'}{S}$, donnera la mesure de la déformation que sera susceptible de prendre le métal avant la rupture.

Le constructeur considèrera qu'avec une forte striction, un métal ne sera pas exposé à se rompre brusquement sous des efforts anormaux, puisque des déformations locales permanentes pourront être constatées aux points qui auraient supporté ces trop grands efforts.

Ce qui caractérise l'étirage des corps raides, c'est qu'ils se brisent sans prendre de grandes déformations, c'est-à-dire sans qu'il y ait formation de *fuseau*.

Certains corps extrêmement raides, comme le verre, l'acier à outil trempé, par exemple, se brisent pendant la première période élastique ; il est souvent impossible de pouvoir discerner une déformation permanente. Pour ces corps, on est autorisé à dire que la limite élastique E se confond avec la charge de rupture R .

D'autres corps très doux et très élastiques comme le caoutchouc peuvent prendre de très grandes déformations élastiques ; dans ce cas, les allongements ne sont pas proportionnels aux efforts et, contrairement à ce qui arrive pour les

métaux, les allongements permanents sont bien plus petits que les allongements élastiques. Dans ce cas, il devient très difficile de pouvoir apprécier la valeur de la limite élastique.

4. Courbe de traction. — Un point, ayant pour abscisse un effort de traction rapporté à la section primitive de l'éprouvette et pour ordonnée l'allongement pour cent correspondant, représentera à la fois, l'effort et l'allongement.

La courbe qui réunira tous les points ainsi obtenus, est ordinairement la seule qu'on étudie.

Il convient de remarquer qu'en rapportant ainsi les efforts à la section primitive, on n'obtient pas généralement les *tensions par unité de surface*, car la section de l'éprouvette varie en même temps que les efforts.

Il arrive même souvent, comme on l'a dit, que la section varie inégalement dans les différentes parties de l'éprouvette ; dans ce cas, les efforts ne sont pas uniformément répartis sur la surface des sections droites et l'effort rapporté, soit à la section primitive, soit à la section actuelle, ne représente pas du tout la tension par unité de surface.

Il importe aussi d'observer que l'expression

d'allongement pour cent, n'a de signification qu'autant que l'allongement est uniforme dans toute la longueur de l'éprouvette ; ce qui n'arrive pas quand le fuseau s'est formé.

Ces réserves étant faites, la partie OB (*fig. 1*) de la courbe correspond à la période élastique, les variations de longueur du barreau dites élastiques, y sont sensiblement proportionnelles aux efforts ; OB est une ligne droite.

La valeur de la charge Ob , donne la mesure de la limite élastique E.

A partir du point B, on entre dans la période de déformation ou d'allongements permanents ; la charge maxima Oc , supportée par le barreau, est celle qui correspond à la définition donnée de la résistance à la rupture R.

Au point D, le barreau est rompu.

On voit bien que l'allure de la courbe OBCD semble indiquer que le point D, obtenu à la rupture, correspond à une charge Od inférieure à la charge Oc précédemment supportée par le barreau.

Cette anomalie n'est qu'apparente ; il suffit, en effet, pour le voir, de se reporter aux considérations précédemment exposées.

Les abscisses de la courbe tracée en trait plein dans la *fig. 1* sont, en effet, les charges

en kilogrammes par millimètre carré de la section primitive de l'éprouvette ; or, cette section diminue d'abord en tous les points, puisque l'éprouvette s'allonge sans changer de volume ; puis au point où apparaît la striction, et c'est en réalité la section réduite qui supporte la charge.

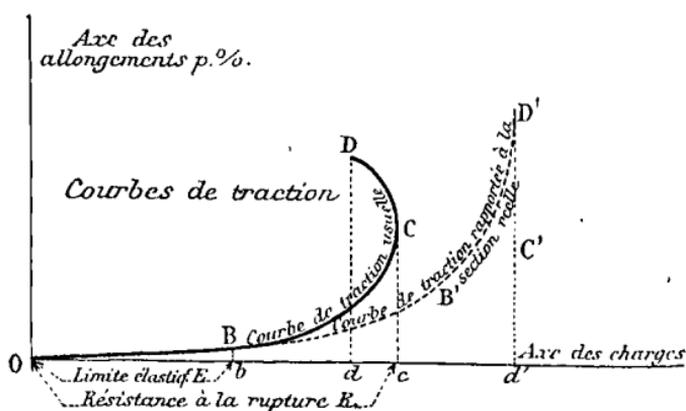


Fig. 1

Si l'on voulait rapporter les charges et les allongements aux sections réelles qui les supportent, c'est-à-dire à chaque instant à la section la plus petite de l'éprouvette, la courbe changerait notablement d'allure, en particulier pour les fers et pour les aciers doux et généralement pour les matières douces.

Cette courbe correspondrait au tracé pointillé OB'C'D' de la *fig. 1* et serait établie pour la section la plus déformée.

Il est très facile, d'ailleurs, de passer de la courbe OBCD à la courbe OB'C'D' par un calcul basé sur des faits que l'expérience autorise à admettre comme exacts, savoir :

a) La densité du métal ne change pas sensiblement pendant l'essai ;

b) L'allongement pour cent est le même dans toute la longueur du barreau, jusqu'au moment où le fuseau commence à se former.

Si donc, on limite les courbes jusqu'au moment où la striction se produit, on établira comme il suit le calcul en question :

Soit A, l'allongement de l'éprouvette en millimètres observé sur une longueur de 100 millimètres ; l'invariabilité du volume V du barreau fournira aisément la relation qui lie A à la section actuelle S', S étant la section primitive ;

$$V = 100 \cdot S = (100 + A) S'.$$

D'où l'on tire :

$$S' = S \cdot \frac{100}{100 + A};$$

par conséquent, la charge T par millimètre carré se déduira de la charge totale P par la formule :

$$T = \frac{P}{S'} = \frac{P}{S} \left(1 + \frac{A}{100} \right).$$

Quelle que soit la légitimité d'une méthode que la pratique a consacrée et qui consiste à rapporter les charges à la section primitive du barreau d'épreuve, il ne semble pas qu'il y ait un bien grand inconvénient à la conserver puisque les métaux en expérience sont soumis à un essai qui est le même pour tous.

Nous terminerons enfin ces notions générales en fournissant un dernier renseignement qui résulte de l'examen de la courbe de traction usuelle OBCD.

Cette courbe fait connaître l'instant où commence à se produire la striction avant la rupture de l'éprouvette; il suffit, à cet effet, de discerner le point C qui correspond à l'origine de la période finale CD de la déformation où, les efforts décroissant, les allongements augmentent.

II. LOI DE SIMILITUDE DE BARBA

La mesure des allongements élastiques exige nécessairement des instruments de grande précision qui ne peuvent guère être utilisés dans la pratique courante des essais.

Les allongements correspondant à la période des déformations permanentes, peuvent être mesurés directement au cours de l'essai ou relevés au moyen d'un appareil enregistreur. On sait qu'on se contente le plus souvent de mesurer l'allongement total après rupture en rapprochant les deux tronçons de l'éprouvette rompue.

Or, en opérant ainsi, on ne se préoccupe pas d'isoler la part qui revient aux deux éléments distincts dont cet allongement total forme la somme indivise, l'*allongement réparti* et l'*allongement de striction*.

Avant d'exposer les considérations relatives à la loi de similitude, il convient de préciser les notions préliminaires indispensables à connaître concernant la mesure de ces allongements.

1. Mesure des deux allongements permanents. — En appréciant seulement l'allon-

gement total, on confond ensemble deux grandeurs qui n'ont entre elles aucune relation et qui peuvent même varier dans de très fortes proportions.

Pour certains aciers spéciaux notamment, M. Considère a montré que l'allongement de striction comparé à l'allongement réparti, peut varier dans un rapport de 1 à 9 et au-delà ; d'où il résulte qu'on peut être conduit, en s'en tenant à la mesure de l'allongement permanent, à ne pas différencier des métaux de qualités fort distinctes.

Il est évident qu'un métal dont l'allongement réparti atteint une valeur élevée, peut supporter sans rupture un travail de déformation qui briserait un autre métal ayant un allongement moindre avant l'apparition des déformations localisées, et cependant l'allongement total peut atteindre la même valeur dans les deux cas.

La Commission des méthodes d'essais des matériaux de construction signale trois méthodes, de précision différente, pour la mesure de l'allongement réparti.

La première méthode, proposée par M. Barba, consiste à distinguer sur la longueur expérimentée un nombre aussi élevé que possible d'éléments de petite longueur, dix ou vingt par

exemple, et à mesurer l'allongement individuel de chacun d'eux après la rupture de l'éprouvette ; on constitue ainsi une courbe donnant la reproduction détaillée de l'allongement réparti en dehors de la région affectée par la striction, et l'on peut même en prolonger le tracé dans cette région de manière à distinguer nettement la part afférente à chacun des allongements considérés.

Les deux autres méthodes sont d'une application plus simple ; l'une est due à M. Baclé, l'autre à M. Considère.

La méthode proposée par M. Baclé, d'après une indication donnée par M. le professeur Tetmajer, consiste à mesurer l'allongement total après rupture d'une même éprouvette sur deux longueurs initiales dont l'une est le double de l'autre et qui comprennent toutes deux la section de rupture.

On partage, à cet effet, par de légers coups de pointeau l'éprouvette, ayant par exemple 200 millimètres de longueur utile, en quatre sections de chacune 50 millimètres, de manière à obtenir toujours ainsi, quelle que soit la position de la section de rupture, une longueur initiale de 100 millimètres comprenant toute la région affectée par la striction.

Les deux valeurs observées λ_{200} et λ_{100} de l'allongement total sont reliées à l'allongement réparti i par unité de longueur et à l'allongement de striction λ_s par les relations :

$$\lambda_{200} = 200 i + \lambda_s,$$

$$\lambda_{100} = 100 i + \lambda_s,$$

d'où l'on tire :

$$100 i = \lambda_{200} - \lambda_{100},$$

et

$$\lambda_s = 2\lambda_{100} - \lambda_{200}.$$

Dans la méthode de M. Considère, on mesure directement sur l'éprouvette l'allongement réparti en n'opérant que sur la région non affectée par la striction.

On isole à cet effet, de part et d'autre de la section de rupture, une longueur égale à deux ou trois fois le diamètre ou l'épaisseur de l'éprouvette, en considérant cette longueur comme délimitant la région de la striction.

Cette méthode est particulièrement simple, mais elle comporte une appréciation toujours un peu arbitraire de l'étendue des déformations localisées.

2. L'allongement pour cent avant striction est constant pour un même métal, quelles que soient les dimensions en longueur et en diamètre des barreaux d'épreuve. — Cette proposition, sur laquelle on s'est appuyé précédemment pour passer de la courbe de traction usuelle à la courbe de traction rectifiée, peut être établie de la manière suivante :

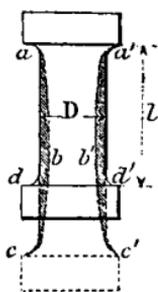


Fig. 2

Nous tiendrons tout d'abord pour exact le fait de la constance du volume des éprouvettes pendant l'essai de traction ; les vérifications expérimentales n'exigent que des soins attentifs et s'exécutent au moyen d'aréomètres appropriés.

Cela posé, considérons une éprouvette $ada'd'$ (fig. 2) qui, en s'allongeant de cd à la traction, devient $abca'b'c'$.

En vertu de la constance du volume, le volume engendré par la surface hachée tournant autour de l'axe doit être égal au volume $dcc'd' = \frac{\pi D^2}{4} \cdot \lambda$, si D est le diamètre de l'éprouvette et λ , l'allongement.

On démontre facilement ⁽¹⁾, d'autre part, que

(1) J. BARBA. — *Étude sur la Résistance des maté-*

la surface hachée est proportionnelle au diamètre et à la longueur; on peut l'exprimer sous la forme $KD(l + \lambda)$, K étant une constante.

Le centre de gravité de cette surface sera distant de l'axe d'une quantité proportionnelle au rayon; la circonférence qu'il décrit autour de l'axe a une valeur qu'on peut écrire $K'D$, K' étant une constante.

Le volume engendré sera $KD^2(l + \lambda)K'$; par suite, on aura, d'après ce qui précède :

$$\frac{\pi D^2}{4} \cdot \lambda = KD^2(l + \lambda)K',$$

d'où :

$$\lambda = \frac{KK'}{\frac{\pi}{4} - KK'} \cdot l.$$

L'allongement total est donc proportionnel à la longueur; par suite, l'allongement pour cent avant striction est rigoureusement constant pour un même métal, quelles que soient les dimensions en diamètre et en longueur des éprouvettes soumises aux essais de traction.

riaux. Expériences à la traction. Paris, 1880, E. Capiomont et V. Renault, 6, rue des Poitevins,

3. Les allongements pour cent après rupture de deux éprouvettes sont égaux, lorsque les éprouvettes sont géométriquement semblables. — La striction est identiquement la même pour deux éprouvettes ayant des longueurs inégales et même diamètre.

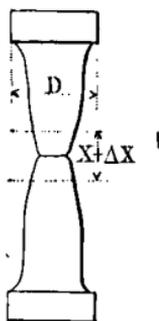


Fig. 3



Fig. 4

Il en résulte que la striction produira une grande différence dans leur allongement pour cent.

Soient d et D (fig. 3 et 4), les diamètres de deux éprouvettes d'un même métal de longueurs l et L .

Si x et X sont les longueurs primitives de la partie des éprouvettes qui fourniront la striction, elles seront devenues, après striction et rupture, $x + \Delta x$ et $X + \Delta X$.

Les allongements pour cent après rupture des deux éprouvettes sont égaux à $\frac{\Delta l + \Delta x}{l}$ et $\frac{\Delta L + \Delta X}{L}$.

La différence de ces allongements pour cent est $\frac{\Delta X}{L} - \frac{\Delta x}{l}$, puisque $\frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta L}{L} =$ allongement pour cent avant striction.

Cherchons comment varie cette différence avec les dimensions d'un des barreaux d'épreuve.

A cet effet, imaginons un barreau qui aurait le diamètre D et serait géométriquement semblable au barreau de diamètre d . Ce barreau supposé aura même striction que le barreau de diamètre D , c'est-à-dire $X + \Delta X$; de plus, étant semblable au barreau de diamètre d , il donne $\frac{X}{x} = \frac{D}{d} = \frac{X + \Delta X}{x + \Delta x}$.

D'où l'on tire :

$$\Delta X = \frac{D}{d} \Delta x.$$

La différence $\frac{\Delta X}{L} - \frac{\Delta x}{l}$ des allongements pour cent après rupture des deux éprouvettes primitives sera donc $\left(\frac{D}{dL} - \frac{1}{l}\right) \Delta x$.

Cette différence variera comme le rapport $\frac{D}{L}$, c'est-à-dire comme le diamètre et en raison inverse de la longueur de l'éprouvette.

Ainsi donc, *on a la faculté d'augmenter l'allongement pour cent après rupture en augmentant le diamètre du barreau d'épreuve et en diminuant sa longueur.*

On voit, d'après cela, que demander pour un

métal un chiffre d'allongement pour cent après rupture déterminé, n'aura aucune signification si on ne commence pas par fixer les dimensions du barreau d'épreuve.

Quand on sera dans la nécessité de modifier les dimensions des éprouvettes, il faudra faire varier la longueur proportionnellement à la valeur de leur section transversale.

Ce n'est qu'avec des éprouvettes satisfaisant à cette *loi de similitude*, qu'on pourra comparer entre eux et coordonner les résultats des essais de traction.

Toutes les éprouvettes devront satisfaire à la formule $\frac{D}{L}$ ou $\frac{S}{L^2} = \text{constante}$, S désignant la section de l'éprouvette.

4. La loi de similitude et la forme des sections. — Les considérations précédentes s'appliquent à tous les barreaux d'épreuve, quelle que soit la forme de leur section ; les allongements pour cent après rupture sont les mêmes dans des barreaux géométriquement semblables.

Deux éprouvettes d'essai satisfaisant à la relation $\frac{S}{L^2} = \text{constante}$, mais présentant des formes différentes, n'auront pas exactement le même

allongement puisqu'elles ne sont pas géométriquement semblables.

Pour une valeur déterminée du rapport $\frac{S}{L^2}$, l'éprouvette à section rectangulaire donnera plus d'allongement pour cent que les éprouvettes à section carrée ou ronde; toutes les éprouvettes à section rectangulaire, de section et de longueur égales, ne donneront pas le même allongement pour cent; il existe un rapport entre la largeur et l'épaisseur de l'éprouvette (rapport qui semble être voisin de 6) pour lequel cet allongement est maximum.

Mais les différences d'allongement sont trop peu importantes pour qu'on cherche à en tenir compte et, dans la pratique, on se contentera d'astreindre les éprouvettes à la condition $\frac{S}{L^2} = \text{constante}$, quelle que soit la forme de leur section.

5. Application de la loi de similitude. —

Les exemples suivants suffiront pour indiquer les solutions des divers problèmes qui peuvent se présenter dans la pratique en vue de la comparabilité des essais :

a) Une éprouvette-type étant adoptée; déterminer, suivant les besoins, les autres dimensions

d'une deuxième éprouvette dont une dimension est fixée.

Admettons qu'un service ait fait choix de l'éprouvette de traction de 100 millimètres sur un diamètre de 13^{mm},8 (ce qui correspond à une section de 150 millimètres carrés), toutes les autres éprouvettes employés par ce service devront satisfaire à la relation :

$$\frac{L^2}{S} = \frac{100^2}{150} = 66,66.$$

L'éprouvette-type, dite du Creusot, ayant une longueur utile de 100 millimètres et un diamètre de 16 millimètres (c'est-à-dire une section de 200 millimètres carrés) toutes les autres éprouvettes dérivant de ce type devront satisfaire à la relation :

$$\frac{L^2}{S} = \frac{100^2}{200} = 50.$$

Par exemple, si, adoptant cette relation, on veut faire un essai dans une tôle de 10 millimètres d'épaisseur, les barrettes ayant une largeur de 30 millimètres (quelle que soit l'épaisseur de la tôle), la section S sera $10 \times 30 = 1500$; la longueur utile de la barrette sera, par suite,

donnée par la relation $\frac{L^2}{1500} = 50$; d'où $L = 122^{\text{mm}},5$.

La Commission des Méthodes d'essai a recommandé, pour définir les types d'éprouvettes, d'adopter des dimensions reliées entre elles par la loi de similitude et elle a adopté, à cet effet, comme relation fondamentale déterminant la longueur en fonction de la section, le rapport $\frac{L^2}{S} = 66,66$, dont il a été question plus haut, observé déjà par diverses administrations.

La grandeur de la section des éprouvettes se trouve limitée par la puissance des machines d'essai et par la précision des instruments de mesure; cette section ne dépassera pas 600 millimètres carrés et ne sera pas inférieure, en général; à 75 millimètres carrés pour les éprouvettes circulaires, la dimension minima pour les éprouvettes rectangulaires étant fixée à 5 millimètres. Cependant, dans les épreuves de métaux mous, comme le cuivre, les bronzes et les laitons, on pourra être conduit à descendre au-dessous de ces limites en raison des dimensions des pièces mêmes.

Avec les éprouvettes rectangulaires, la loi de similitude ne peut s'appliquer sans un certain tempérament, en raison de l'obligation de les

32 ÉTUDE GÉNÉRALE DU PHÉNOMÈNE DE TRACTION

grouper en plusieurs séries de largeur constante.

La Commission précitée propose d'adopter le classement suivant :

Pour une épaisseur comprise entre 5 à 10 millimètres, la largeur atteindra 30 millimètres ; de 10 à 20 millimètres, elle sera fixée à 25 millimètres et, au-dessus de 20 millimètres, elle sera uniformément de 20 millimètres.

Dans chaque série, le rapport des épaisseurs extrêmes est égal à 2, et l'on peut estimer que, dans ces conditions, les allongements des éprouvettes d'une même série resteront comparables si l'on s'attache à déterminer la longueur sans trop s'écarter de la relation prescrite.

D'une série à l'autre, il sera difficile de rien conclure, mais il convient toutefois, à défaut de règle plus précise, de recommander l'emploi de la même relation.

b) Une éprouvette, de section S et de longueur L, ayant donné un allongement pour cent égal à A ; calculer l'allongement pour cent A' que donnerait une éprouvette de section S' et de longueur L'.

Ce problème sert à rendre comparables les essais faits par deux services ou administrations faisant usage d'éprouvettes de types différents,

Ainsi, on a un barreau de section S , de longueur L , donnant après rupture un allongement pour cent égal à A .

On se donne un barreau de section S' , de longueur L' et on cherche l'allongement pour cent α après rupture.

Imaginons un troisième barreau de section S' , de longueur l , l étant plus grand que L' , géométriquement semblable au premier et donnant après rupture un allongement pour cent égal à A .

La longueur de ce dernier barreau sera donnée par la relation :

$$\frac{L^2}{S} = \frac{l^2}{S'}$$

d'où :

$$(1). \quad l = L \sqrt{\frac{S'}{S}}$$

Considérons une portion de longueur L' contenant la striction du barreau l ; le reste de ce barreau sera $l - L'$, l et L' ayant même section, leur striction sera la même, la différence des allongements de ces barreaux sera donc égale à l'allongement de la partie $l - L'$ qui ne contient pas la striction.

Or, $l - L'$ s'est accru de $(l - L')a$, a étant l'allongement pour cent avant striction du métal considéré, il en résulte que :

$$(2) \quad Al = xL' + (l - L')a.$$

Éliminons l entre (1) et (2), on trouve :

$$x = \frac{(A - a)L \sqrt{\frac{S'}{S}}}{L'} + a.$$

6. Sur la rigueur de la loi de similitude.

— La loi de similitude, dite de Barba, complètement établie en France, sert de base aux règles adoptées dans divers pays pour les essais de traction.

Cette loi a cependant soulevé quelques objections qui peuvent ainsi se résumer :

a) Elle a l'inconvénient de faire intervenir la considération de la forme et des dimensions des éprouvettes dont elle devrait être indépendante ;

b) L'exactitude n'en est pas absolument démontrée dans tous les cas ; la loi comporte et doit comporter des exceptions en raison des circonstances accidentelles qui influent sur les résultats de l'essai ;

c) Enfin, au point de vue pratique, elle demande des éprouvettes géométriquement semblables dont la préparation devient fort difficile.

Ainsi que l'a fait remarquer M. Barba, la première objection ne s'applique pas, à proprement parler, à la loi de similitude ; elle constitue plutôt une critique du principe de la mesure des allongements dans l'essai de traction. La mesure des allongements dépend évidemment de la section de l'éprouvette et c'est un fait à constater ; la loi de similitude ayant précisément pour objet de dégager une donnée indépendante de cette section dans la mesure où il est possible de le faire.

L'exactitude de la loi se justifie en théorie et elle se vérifie par des expériences précises ; les différences légères qu'on peut constater résultent des perturbations dues aux causes accidentelles et des défauts d'homogénéité qu'on n'est pas en mesure de toujours éliminer.

L'observation relative à la difficulté d'exécution d'éprouvettes géométriquement semblables ne saurait s'appliquer à celles qui ont une section circulaire ou carrée, puisque les sections restent toujours semblables, la longueur seule devant varier proportionnellement au diamètre ou au côté de la section.

.. Pour les éprouvettes à sections rectangulaires, la loi de similitude ne peut, il est vrai, s'appliquer sans inconvénients dans toute sa rigueur aux essais industriels, car on ne peut pas faire varier, d'une façon continue, la largeur des éprouvettes avec leur épaisseur.

Il est nécessaire de conserver la largeur constante, entre certaines limites au moins d'épaisseur, de manière à pouvoir préparer économiquement plusieurs éprouvettes à la fois, mais il reste possible de rattacher entre eux les types ainsi déterminés par la loi de similitude de manière à ne pas trop s'en écarter.

III. ÉLASTICITÉ DE TRACTION

Nous avons dit précédemment que si, pendant les premiers instants de l'essai de traction, on supprime la charge appliquée à l'éprouvette, on constate que l'allongement pris par celle-ci disparaît complètement, tant que l'effort n'a pas atteint une valeur correspondant à ce qu'on a appelé la *limite élastique*.

On a admis, en outre, que, pendant cette période, les allongements dits élastiques étaient proportionnels aux charges.

Le moment est venu de préciser et de montrer combien, en réalité, le phénomène est plus complexe qu'il ne paraît au premier abord.

Mais auparavant, il est nécessaire d'examiner comment on peut faire varier la valeur de la limite élastique, telle qu'on l'a définie et de faire ressortir toute sa relativité.

1. Cas d'une éprouvette soumise à un effort supérieur à la limite élastique. — Prenons un barreau de métal, en bronze ou en acier par exemple, et soumettons-le à une charge supérieure à sa limite élastique en arrêtant l'essai de traction au moment où ce barreau a pris un certain allongement permanent.

Ainsi, après avoir fait supporter à l'éprouvette en question une certaine charge Ob (*fig. 5*) supérieure à la limite élastique; enlevons cette charge.

Nous savons que l'éprouvette perdra l'allongement élastique bb' et qu'elle gardera l'allongement permanent $b'B$; c'est-à-dire que si OA est sa longueur primitive entre repères, le barreau, après avoir supporté la charge Ob , redeviendra AD , DB étant parallèle à la droite Ob dont le coefficient angulaire est précisément égal, comme on l'a dit, au module d'élasticité.

L'expérience ayant appris que le métal ne

38 ÉTUDE GÉNÉRALE DU PHÉNOMÈNE DE TRACTION

changeait pas de densité d'une manière appréciable pendant l'essai de traction, il est clair que la section de l'éprouvette aura légèrement diminué de façon que le volume de la nouvelle éprouvette soit égale au volume de l'éprouvette primitive.

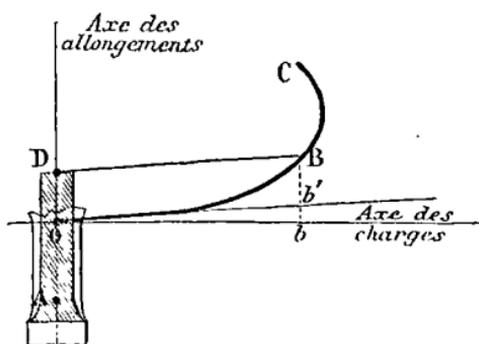


Fig. 5

Après un certain temps, quelques heures par exemple, soumettons de nouveau l'éprouvette AD à l'action d'efforts croissants sur la machine de traction. Quand on atteindra la charge Ob , le barreau d'épreuve reprendra la position d'équilibre qu'il avait auparavant dans la première expérience lorsqu'on a interrompu l'essai de traction, c'est-à-dire qu'il prendra l'allongement élastique bb' et, à partir de là, il suivra la loi des allongements donnée par la courbe BC.

Ainsi, l'éprouvette aura pour nouvelle courbe des allongements, la courbe DBC et, de D à B, elle n'aura que des allongements élastiques ; c'est-à-dire que Ob sera sa nouvelle limite d'élasticité.

En conséquence, *un corps, soumis à une charge quelconque plus grande que sa limite élastique, prend un nouvel état d'équilibre stable auquel correspond, comme nouvelle limite d'élasticité, précisément la charge qu'on lui avait fait supporter précédemment.*

On peut même donner à ce corps une nouvelle limite élastique très voisine de la charge maxima qu'il peut supporter. En opérant ainsi, on obtient en quelque sorte un nouveau métal ayant même résistance à la rupture que le premier, mais n'ayant plus même contexture et possédant une limite d'élasticité aussi élevée qu'on le désire.

Il va sans dire que la propriété dont il vient d'être question cesse d'exister, dès que le phénomène de la striction a commencé, car alors la modification moléculaire n'est plus générale, étant localisée dans la partie de l'éprouvette qui fournit la striction.

Cette augmentation de la limite élastique est, par suite, une conséquence du travail de défor-

mation à froid auquel on soumet le métal et qui fait dire qu'après un pareil traitement, il est *écroui*.

A cette notion d'écrouissage, le constructeur devra toujours rapporter le changement survenu dans les propriétés mécaniques du métal considéré et étendre aux efforts autres que celui de la traction les résultats qui ont été indiqués.

L'industrie a tiré parti des faits que nous venons de signaler, notamment dans la théorie du mandrinage dont le point de départ consiste en ce qu'un métal peut prendre, par un travail énergétique de déformation, des limites d'élasticité élevées, tout en conservant encore des allongements suffisants pour ne pas casser brusquement.

En vue de donner aux notions précédentes un caractère plus objectif, nous prendrons un exemple.

Considérons, à cet effet, un barreau de bronze ordinaire de 30 millimètres de diamètre et d'une longueur de 100 millimètres entre repères (*fig. 6*).

Supposons que ses caractéristiques normales à la traction soient données par les nombres suivants, savoir :

$$\begin{aligned} E &= 10 \text{ à } 11 \text{ kilogrammes par millimètre carré.} \\ R &= 28 \text{ à } 32 \quad \quad \quad \text{''} \quad \quad \quad \text{''} \quad \quad \quad \text{''} \\ A &= 40 \text{ à } 60 \text{ } \frac{0}{0}. \end{aligned}$$

Au lieu d'étirer le barreau jusqu'à la rupture, arrêtons la traction au moment où il a pris 20 % d'allongement, par exemple : l'effort de traction sera, à ce moment, de 25 kilogrammes par millimètre carré de la section primitive S.

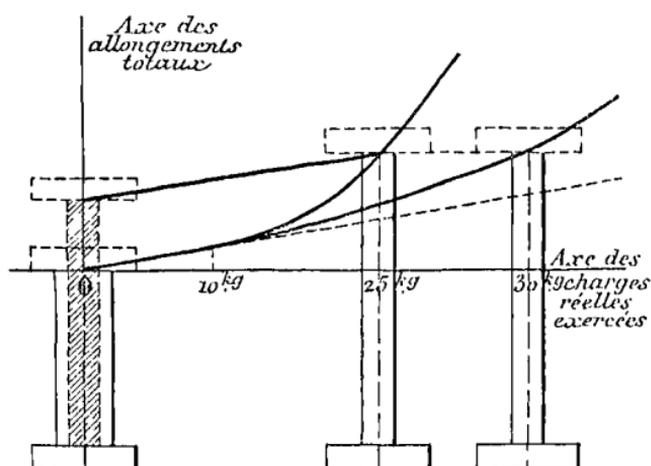


Fig. 6

Le barreau est toujours cylindrique, c'est-à-dire que l'allongement s'est produit dans toutes les parties.

Si on appelle S' la nouvelle section, on constate que $\frac{S'}{S} = \frac{100}{120}$, le volume ou la densité n'ayant pas sensiblement changé.

42 ÉTUDE GÉNÉRALE DU PHÉNOMÈNE DE TRACTION

L'effort supporté par chaque millimètre carré de la section S' aura pour valeur :

$$25^{\text{kg}} \cdot \frac{120}{100} = 30 \text{ kilogrammes.}$$

Déchargeons le barreau, puis recommençons l'épreuve.

Tant qu'on n'aura pas dépassé la charge de 30 kilogrammes par millimètre carré, on n'observera pas d'allongement permanent. Au-delà, le barreau recommence à s'allonger jusqu'à la rupture, de $\frac{40 - 20}{120}$ ou $\frac{60 - 20}{120}$, suivant que son allongement total est de 40 ou 60 %.

La charge de rupture variant de 28 à 32 kilogrammes par millimètre carré de la section primitive sera, en vue d'être rapportée à la section S', multipliée par $\frac{120}{100}$ et variera, par suite, de 33,6 à 38,4.

Si donc, après avoir donné 200 % d'allongement à l'éprouvette, on l'avait tournée de manière à faire disparaître les craquelures de la surface dues à l'étirage, on aurait eu une éprouvette donnant, par millimètre carré de section :

$$E = 30^{\text{kg}}$$

$$R = 32 \text{ à } 38^{\text{kg}}$$

$$A = 17 \text{ à } 30 \%$$

au lieu de

$$\begin{aligned} E &= 10 \text{ à } 11 \text{ kg} \\ R &= 28 \text{ à } 32 \text{ kg} \\ A &= 40 \text{ à } 60 \text{ } \%. \end{aligned}$$

nombres caractérisant l'éprouvette primitive au premier essai de traction.

On voit donc qu'il peut être avantageux de soumettre un métal à un travail de déformation à froid tel que sa limite élastique soit notablement dépassée ; c'est ainsi, d'ailleurs, qu'on obtient le *bronze acier* qui, sauf en ce qui concerne la valeur de R, présente à la traction des caractéristiques analogues à celles de l'acier doux.

De même, les fils d'acier doivent leurs qualités spéciales de résistance à leur passage à la filière.

Etc., etc.

2. Mesure du travail de déformation. — Tant que le métal n'a à résister qu'à de simples efforts statiques, la connaissance des deux caractéristiques E et R peut être considérée comme suffisante.

Or, le plus généralement, les pièces métalliques doivent pouvoir absorber, sans se rompre et même sans être déformées d'une façon per-

44 ÉTUDE GÉNÉRALE DU PHÉNOMÈNE DE TRACTION

manente, une certaine quantité de force vive, soit sous l'action de secousses prévues (essieux, organes de machines à vapeur, etc.), soit sous l'action de chocs fortuits et accidentels.

Il est donc nécessaire d'étudier les propriétés des métaux à un nouveau point de vue ; car, de deux métaux ayant même résistance à la rupture, il est évident que si l'un se brise sans s'allonger sensiblement, tandis que l'autre ne se rompt qu'après avoir pris un certain allongement pendant lequel un travail plus ou moins grand aura pu se produire, le second métal devra être préféré.

De là, découlent les notions de *résistance vive élastique* et de *résistance vive de rupture*.

Soient P , l'effort de traction, S , la section de l'éprouvette de longueur L , λ , l'allongement.

D'une manière générale, le travail produit par la force P , considérée comme variable pendant que s'effectue l'allongement λ , sera mesuré par l'intégrale définie $\int_0^\lambda P.d\lambda$.

a) *Calcul de la résistance vive élastique.* — Si l'on suppose d'abord que la force P est inférieure à la limite élastique E du métal soumis à l'épreuve, on sait que le module d'élasticité que nous désignerons par ϵ , en vue d'éviter toute

confusion avec la notation E également admise pour la limite élastique, s'exprimera par le rapport

$$(1) \quad \varepsilon = \frac{\frac{P}{S}}{\frac{\lambda}{L}},$$

ce qui revient à dire, comme on l'a admis, que, jusqu'à la limite élastique E , la courbe de traction est constituée par une portion de droite issue de l'origine.

On tire de la relation (1) la valeur de P , soit

$$P = \frac{\varepsilon S \lambda}{L},$$

si donc, V est le volume de l'éprouvette, il viendra :

$$\int_0^{\lambda} P \cdot d\lambda = \frac{\varepsilon S}{L} \int_0^{\lambda} \lambda \cdot d\lambda = \frac{1}{2} \varepsilon S L \frac{\lambda^2}{L^2}.$$

En posant $i = \frac{\lambda}{L}$, la *résistance vive élastique* aura pour expression $\frac{1}{2} \varepsilon i^2 V$, formule dans laquelle le facteur $\frac{1}{2} \varepsilon i^2$ a été appelé *module* ou *coefficient de résistance vive élastique*.

b) *Calcul de la résistance vive de rupture.*

— Le calcul de la résistance vive élastique s'effectue aisément puisqu'on connaît, dans la période élastique, la relation linéaire liant les efforts aux allongements ; par contre, il n'est pas possible de calculer exactement la *résistance vive de rupture* représentée par l'intégrale définie $\int_0^P P.d\lambda$, la courbe de traction n'étant pas définie analytiquement depuis la limite élastique jusqu'à la rupture.

On devra donc se contenter d'une évaluation approximative de la résistance vive de rupture en utilisant le diagramme construit ou enregistré de la courbe de traction ; il suffira, pour l'obtenir, de mesurer la surface comprise entre l'axe des allongements et la courbe OAB (*fig. 7*), soit celle du triangle OAa représentant la résistance vive élastique augmentée de l'aire du trapèze curviligne BbaA (¹).

Ainsi, le diagramme de la courbe de traction permet d'évaluer le travail que le métal peut supporter, élastiquement ou en se déformant ;

(¹) On fait quelquefois usage de formules assez approchées qui dispensent d'évaluer directement les aires des courbes de traction ; nous signalerons celles de M. Tournaire, ingénieur en chef des Mines.

en admettant implicitement que la pièce métallique considérée travaillera absolument comme l'éprouvette soumise à l'action de la machine de traction où les efforts croissent lentement et graduellement.

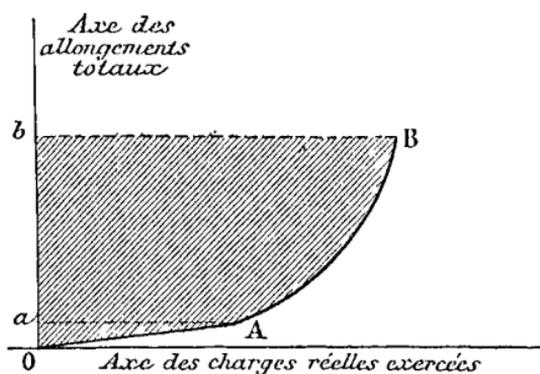


Fig. 7

On admet aussi d'ailleurs, par le mode d'évaluation précédent, que tout le travail est entièrement absorbé par la production des déformations ; or, en réalité, il n'en est pas ainsi puisqu'une partie du travail de traction est transformée en chaleur, en magnétisme et peut-être même en travail chimique.

c) *Au sujet des valeurs des précédentes caractéristiques.* — On a vu que, lorsqu'un métal avait été soumis à des charges supérieures à sa limite élastique, ce métal prenait une nouvelle

48 ÉTUDE GÉNÉRALE DU PHÉNOMÈNE DE TRACTION

limite élastique précisément égale à la charge qu'il avait subie ; d'où il résulte qu'il est devenu dès lors susceptible de supporter sans allongement des efforts statiques bien plus considérables que dans son état primitif. Au point de vue dynamique, l'opération peut présenter moins d'avantages.

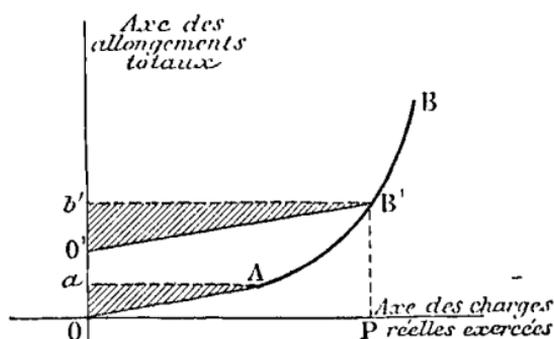


Fig. 8

Soit, en effet, OAB (fig. 8), la courbe de traction de l'éprouvette initiale ; la courbe nouvelle, après qu'on a fait subir à cette éprouvette l'effort OP est O'B'B', O'B' étant parallèle à OA.

La résistance vive élastique de l'éprouvette initiale est mesurée par l'aire du triangle OaA, celle de l'éprouvette soumise de nouveau à l'essai après avoir supporté l'effort OP est mesurée par l'aire du triangle O'B'v'.

Donc, au point de vue des résistances vives

élastiques, l'opération qui a consisté à augmenter la limite élastique du métal a été avantageuse; mais il n'en est pas de même au point de vue des résistances vives de rupture, car celle de la deuxième éprouvette sera plus petite que celle de la première de toute la surface $OAB'O'$. Aussi, si la pièce en question est exposée à subir accidentellement un choc considérable, elle présentera moins de garanties de solidité.

Si un métal doit supporter un choc violent et accidentel, sa résistance vive de rupture devra être élevée; mais s'il doit supporter fréquemment une série de chocs prévus résultant de l'usage même auquel on le destine, sa résistance vive élastique devra être assez grande pour qu'il absorbe sans déformation la force vive qu'il aura à supporter constamment.

Si le métal ne possède pas, dès le début, cette résistance vive élastique, il se déformera insensiblement sous l'action de ces chocs en atteignant une nouvelle limite élastique telle que la résistance vive élastique correspondante fasse équilibre au travail qu'il a à emmagasiner; ou bien, continuant à se déformer, ce métal arrivera à une limite élastique égale à sa charge de rupture, et, dans cet état, un choc anormal peut le briser.

50 ÉTUDE GÉNÉRALE DU PHÉNOMÈNE DE TRACTION

C'est ainsi que, pour les ressorts, on emploie un métal très dur ayant peu d'allongement, parce qu'on veut que le métal possède une grande résistance vive élastique ; il en est de même pour les tiges de marteaux-pilons, etc.

En résumé, il résulte des considérations qui précèdent, que, sous les réserves déjà faites, c'est

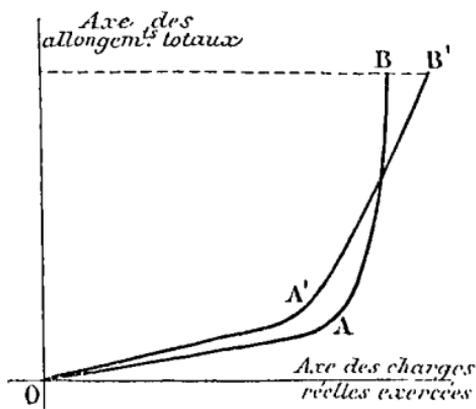


Fig. 9

à la valeur des caractéristiques dont il vient d'être question qu'il conviendra d'attacher une importance très grande plutôt qu'aux valeurs absolues de E et de R.

On voit aisément sur la *fig. 9* que le métal qui a fourni la courbe OAB, bien qu'ayant une résistance à la rupture moindre que celle du métal correspondant à la courbe OA'B', possède

néanmoins une résistance vive élastique et une résistance vive de rupture plus grandes et qu'il absorbera, par suite, une force vive plus considérable.

On se rendrait compte également de l'influence désastreuse d'un défaut dans un métal dont la limite élastique est relativement grande en raison de la réduction de section correspondant au défaut local ; il en sera de même pour un métal essayé sur barreau entaillé, etc.

Les résultats obtenus dans la mesure des résistances vives serviront à comparer entre eux des métaux différents, mais il conviendra de ne pas les considérer comme fixant d'une manière absolue sur la valeur du travail dynamique que la pièce peut emmagasiner pour les motifs déjà donnés.

Aussi, est-il nécessaire de compléter, par des essais de choc judicieusement pratiqués, les essais de traction toujours exécutés ; à ce point de vue, les essais de choc sur barreaux entaillés ne peuvent qu'être recommandés.

3. Limite d'élasticité et limite des allongements proportionnels. — La question de savoir si, en réalité, il existe une période pendant laquelle la déformation est temporaire, a

été longtemps controversée. Le bon sens empêche cependant de répondre à cette question par la négative, puisque la permanence absolue des formes des ouvrages métalliques, convenablement calculés, démontre chaque jour le caractère momentané de certaines déformations, par exemple, les diminutions des flèches des arcs métalliques pendant le passage sur les ponts des trains de chemins de fer.

La preuve directe de ce fait, dans un laboratoire d'essais de métaux, présente toutefois de grandes difficultés et nécessite l'emploi d'élastimètres spéciaux qui enregistrent l'allongement élastique de la fibre neutre en intéressant les allongements de quatre génératrices, situées deux à deux dans des plans diamétraux perpendiculaires entre eux.

La limite élastique est, en fait, très difficile à déterminer avec précision ; certains expérimentateurs ont même prétendu qu'elle n'existe pas, toute charge, si faible qu'elle soit, produisant toujours une déformation permanente correspondante que seule l'imperfection de nos instruments de mesure nous empêche de constater.

En l'état actuel de la science, et pour le motif précédemment donné, il convient de considérer cette limite élastique comme existant réellement.

Un fait non controversé c'est que, lorsque les charges sont petites, les allongements correspondants leur sont proportionnels ; cette proportionnalité cesse de se manifester dès que la charge atteint une certaine valeur que l'on a souvent appelée *limite des allongements proportionnels* ou *limite de proportionnalité*.

Il semble résulter de l'expérience que la limite élastique est légèrement inférieure à la limite de proportionnalité ; celle-ci, comme la première, ne peut d'ailleurs être appréciée d'une façon certaine qu'avec des instruments de précision.

Il importe également de signaler une nouvelle distinction théorique :

On a vu que, dans l'essai de traction, la caractéristique qu'on a définie pour la limite élastique était facilement mesurable, dans les machines à manomètre, par l'arrêt momentané ou même par une certaine chute de la colonne mercurielle, et, dans les machines à leviers, par la chute du levier.

La charge correspondant à chacun de ces phénomènes est-elle bien celle qui correspond, soit à la limite élastique théorique, soit à la limite de proportionnalité ?

Il ne semble pas qu'il soit possible d'apporter

54 ÉTUDE GÉNÉRALE DU PHÉNOMÈNE DE TRACTION

à cette question, actuellement du moins, une réponse satisfaisante.

Il paraît toutefois vraisemblable d'admettre, d'après de récentes expériences, que les phénomènes constatés dans les machines d'épreuve à cette période terminant la déformation élastique ne correspondraient pas à la limite de proportionnalité.

Ces distinctions, inutiles aujourd'hui à considérer en l'état actuel des instruments de mesure industriels, seront peut-être d'une extrême importance dans les études futures concernant les déformations des métaux.

IV. INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE SUR LES RÉSULTATS FOURNIS PAR L'ESSAI DE TRACTION

Cette question, du plus grand intérêt, a été étudiée en détail par M. A. Le Chatelier dans un rapport publié dans le tome II de la Commission des méthodes d'essai.

Nous examinerons successivement l'influence des températures supérieures à 100°, celle des températures inférieures à 100° et enfin nous dirons quelques mots de l'action exercée par les variations de la température atmosphérique.

1. Températures supérieures à 100°. — L'étude de l'influence des températures supérieures à 100° fournit des résultats précieux pour se rendre compte des propriétés mécaniques des métaux dans le fonctionnement normal des chaudières et des machines à vapeur.

Seuls, les essais de traction peuvent être étudiés sous ce rapport avec quelque précision ; pour les autres essais, tels que la flexion et le choc, on est obligé, sous peine d'avoir recours à des installations compliquées, de laisser le métal pendant la durée de l'essai en dehors de tout appareil de chauffage. Dans ces conditions, la température du métal se modifie rapidement, surtout à sa surface qui, dans ces essais, est la région qui fatigue le plus ; aussi ces épreuves ne peuvent-elles donner que des renseignements peu précis.

D'une manière générale, les essais de traction aux températures élevées sont difficiles à pratiquer, car les métaux conduisant tous bien la chaleur, les barreaux d'épreuve qui ont toujours une assez forte section se refroidissent continuellement par l'intermédiaire des mâchoires qui les reliait à la machine d'essai.

Pour maintenir le barreau à la température à laquelle on veut expérimenter, on le place,

soit dans un bain liquide, huile ou métal fondu, soit dans un courant de gaz chauds. Cette dernière disposition présente l'avantage d'éviter toute agitation rendue nécessaire pour uniformiser la température dans le bain liquide et permet, en outre, de relier directement au barreau d'épreuve le couple thermo-électrique de M. H. Le Chatelier ⁽¹⁾ employé dans ces expériences pour la mesure des températures.

Nous ne saurions, sans sortir des limites que nous nous sommes imposées, décrire les divers procédés employés pour obtenir un chauffage régulier ni les artifices auxquels on a recours pour les différents détails d'exécution ; l'essentiel est de faire connaître les principaux résultats acquis sur ce sujet.

Il convient d'ajouter cependant que les essais à température élevée nécessitent une précaution spéciale qui consiste à recuire au préalable les éprouvettes à essayer à une température plus élevée que celles auxquelles on veut expérimenter.

Si, en effet, on essaie une éprouvette écrouie

(1) Voir, pour la description et l'emploi du couple thermo-électrique de M. H. Le Chatelier, le volume de l'Encyclopédie : L. GAGES. — *Travail des métaux dérivés du fer.*

à une température donnée, son métal se recuit au cours de l'expérience, et comme le recuit se fait avec une certaine lenteur, les résultats obtenus varieront beaucoup avec la durée de l'essai.

a) *Fer et acier.* — Les courbes représentées sur la *fig. 10* indiquent les résultats fournis par du fer de Suède et deux échantillons d'acier de Saint-Chamond.

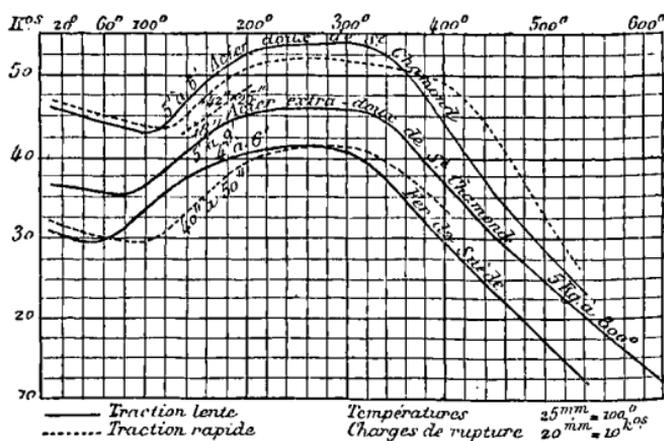


Fig. 10

On constate, avec la traction lente, que la charge de rupture R décroît jusqu'à 60° environ pour le métal doux, ou jusqu'à 80 à 100° pour le métal un peu plus dur; puis R croît jusqu'à un maximum qui est atteint vers 250°

pour décroître ensuite très rapidement à partir de 300°.

La différence entre les résistances à 250° et à 15° est à peu près constante quelle que soit la dureté du métal ; elle varie entre 8 et 10 kilogrammes, les essais étant effectués sur des fers et des aciers de duretés très différentes depuis le fer de Suède jusqu'à l'acier dur ayant une charge de rupture de 65 kilogrammes par millimètre carré de section primitive à 15°.

L'*allongement* varie en sens inverse de la résistance ; l'*allongement proportionnel* a , pour tous les fers et aciers, à peu près la même valeur à 250°, soit 8 à 10 %, alors que sa valeur à 15° est de 17 à 20 % pour les fers et de 25 % pour les aciers doux. Cet allongement croît un peu à partir de 300° et atteint 12,5 et 15 % ; mais les différences de température existant aux températures élevées entre les divers points du barreau d'épreuve rendent sa mesure peu précise.

L'*allongement total* entre repères croît d'une manière continue à partir de 300°.

La *striction* décroît sans cesse depuis la température ordinaire jusqu'à 300 ou 350° ; dès 400°, elle augmente, par contre, très rapidement, pour devenir considérable aux environs de 700 ou 800°.

Les courbes de la *fig. 10* font, en outre, ressortir l'influence exercée par la *durée* des essais.

Entre 100 et 250°, les essais les plus rapides donnent, pour R, les valeurs les plus faibles et, pour A, les valeurs les plus grandes; l'inverse se produit au-dessus de 300°. Ce fait résulte de ce que les variations qu'éprouvent les propriétés mécaniques des fers et des aciers à partir de 60° à 80° sont causées par une transformation moléculaire de nature inconnue se produisant sous la double influence de la chaleur et des déformations permanentes, et cela d'autant plus rapidement que la température est plus élevée.

On voit donc que, dans le cas d'efforts très rapides, la résistance sur laquelle on peut compter est bien plus faible que celle qui résulte des essais de traction lente. Cette transformation moléculaire qui se produit à partir de 60 à 80° se détruit lentement au-dessus de 300°; aussi les essais les plus rapides donnent-ils alors les résistances les plus élevées et les allongements les plus faibles.

La *fragilité* du fer et de l'acier vers 200 à 300° paraît résulter uniquement de la forte réduction qu'éprouve la ductilité à ces températures; cette température, à laquelle correspondra la plus grande fragilité, variera beaucoup avec

60 ÉTUDE GÉNÉRALE DU PHÉNOMÈNE DE TRACTION

la rapidité des efforts ; pour des efforts lents, elle sera voisine de 300 à 350° ; pour des efforts rapides, elle pourra atteindre 500°.

b) *Autres métaux.* — En ce qui concerne les autres métaux, nous ne nous occuperons que des principaux d'entre eux susceptibles d'être employés industriellement aux températures élevées.

La résistance de la *fonte* est à peu près constante jusqu'aux environs de 500°.

La résistance du *cuivre rouge* recuit, ainsi qu'il résulte de nombreuses expériences, peut être calculée par la formule :

$$R = 21^{\text{kg}} - 0,025 t,$$

où t représente la température, et qui correspond à une résistance de 21 kilogrammes à 0° pour le cuivre très pur.

Dans le cas du cuivre soudé, cette formule ne donne plus une garantie suffisante, le chauffage nécessité par la soudure diminuant notablement la résistance du métal, aussi conviendra-t-il d'adopter alors un coefficient de sécurité assez fort.

Au-dessus de 250 à 300°, les *laitons* éprouvent une perte considérable de résistance et d'allon-

gement; à 250°, R est seulement inférieure de 15 % à la valeur obtenue à la température ordinaire.

Les *bronzes ordinaires* fournissent presque toujours, aux environs de 180 à 200°, des résistances et des allongements très amoindris; il semble que les *bronzes phosphoreux* présentent à cet égard le plus de garanties. Le *bronze d'aluminium*, par contre, sauf à l'état laminé, paraît ne pas devoir être employé aux températures élevées.

Enfin, le *laiton d'aluminium* à 1 % qui a fait l'objet, de la part de M. A. Le Chatelier, de nombreuses expériences, conserve ses propriétés mécaniques d'une façon remarquable; il semble que son emploi soit tout indiqué pour remplacer le bronze ordinaire dans les accessoires de chaudières.

2. Températures inférieures à 100°. —

Le fer et l'acier sont les seuls métaux sur lesquels les températures inférieures à 100°, surtout les basses températures, exercent une action spéciale; leur fragilité augmente beaucoup au-dessous de 0°.

M. Schreiber, en comparant, au Canada, le nombre de ruptures de rails et de roues en fonte,

62 ÉTUDE GÉNÉRALE DU PHÉNOMÈNE DE TRACTION

pendant six mois d'été et pendant six mois d'hiver, a fait connaître les constatations suivantes :

Rails d'acier . . .	1	rupture en été pour 30 en hiver		
Rails de fer . . .	1	//	//	45 //
Roues en fonte . . .	1	//	//	35 //

En Russie, on a trouvé des résultats comparables aux précédents.

On n'a pu, jusqu'à présent, fournir aucune explication satisfaisante de ce phénomène ni même en bien préciser la nature, en raison de cette contradiction résultant de toutes les expériences effectuées donnant, pour les essais de traction, des résultats meilleurs aux basses températures qu'à la température ordinaire, alors que les essais de choc conduisent à des résultats très inférieurs.

Les expériences se rapportant à l'étude de la variation des propriétés mécaniques des métaux (fontes, fers et aciers) ont concerné les essais de traction et les essais de choc.

On peut citer les essais de traction exécutés par M. Knutt Styffe en Suède, en 1865, dont les résultats ont été corroborés par ceux de M. Webster en Angleterre, les essais de choc de M. Sandberg en Suède, en 1867, et enfin les essais de

traction et de choc effectués, d'une manière très complète, en 1890, à la Fonderie de canons de Bourges, par le capitaine d'artillerie Bernardon.

Les réfrigérants employés au-dessous de 15° peuvent être les suivants :

Jusqu'à 0°, l'eau refroidie à la glace ;

De 0 à — 18°, le mélange de glace et de sel ;

De 0 à — 45°, le mélange de glace et de chlorure de calcium cristallisé ;

De 0 à — 70°, température extrême à laquelle les essais ont été effectués, l'alcool refroidi avec de l'acide carbonique solide.

Pour les températures comprises entre 100 et 15°, on peut employer un bain d'huile ou d'eau chauffé à la température requise.

Ainsi qu'on l'a indiqué plus haut, les essais de traction effectués à basse température fournissent des valeurs pour E, R et A % supérieures à celles qu'on obtient aux températures ordinaires.

Les résultats des essais de choc montrent, par contre, que la fragilité s'accroît à mesure que la température devient plus basse. On est autorisé à penser, d'après un certain nombre de faits observés, que des variations faibles de température, de 10 à 20° par exemple, suffisent à modifier la fragilité dans une large mesure.

3. Influence des variations de la température atmosphérique. — Les variations de la température atmosphérique ne paraissent pas exercer d'effet sensible sur les résultats des essais de traction, au moins dans les conditions d'expérience où on opère.

Pour les essais de choc, il ne semble pas qu'il en soit de même; aussi, pour la pratique des essais et en vue d'avoir toujours des résultats comparables, conviendrait-il de réchauffer les pièces ou barreaux d'épreuve en les maintenant un temps suffisant dans un bain d'huile ou d'eau porté à cette température.

Cette température de 15°, en général peu différente de la température atmosphérique, se maintiendra à peu près pendant la durée de l'essai.

Il est à remarquer que la température initiale de l'essai n'est pas seule à considérer dans les essais de choc, car les chutes successives du mouton produisent un échauffement considérable en sorte que la fragilité du métal essayé devient de plus en plus faible à mesure que l'épreuve se poursuit.

Il pourra donc être nécessaire, dans un essai de choc au mouton ordinaire, de ramener la pièce à la température de 15° dès qu'elle la dé-

passera. Le mieux sera de réduire le nombre des coups de mouton au minimum, ce qui présentera l'avantage d'augmenter la hauteur de chute et, par suite, de se placer dans les meilleures conditions pour juger de la fragilité.

Le meilleur essai de choc est, pour cette raison, celui qui s'exécutera en un ou deux coups de mouton au plus.

V. INFLUENCE DE LA DURÉE SUR LES RÉSULTATS DES ESSAIS DES MÉTAUX

M. A. Le Chatelier, dans un mémoire très documenté (tome II des rapports de la Commission des méthodes d'essais), a analysé l'influence de la durée sur les résultats des essais des métaux, en ce qui concerne notamment les fers et les aciers.

Cet important travail peut être résumé de la manière suivante :

L'influence de la durée résulte de ce que les déformations produites ne sont pas instantanées; un effort donné produit donc une déformation d'autant plus faible qu'il s'exerce pendant un temps moins long, sans qu'il y ait cependant

proportionnalité entre la déformation et la durée d'application de l'effort.

La majeure partie de la déformation, sauf dans le cas où l'effort est suffisant pour provoquer la rupture, se produit dans un temps très court. Les conséquences de ce fait sont qu'on obtiendra des charges de rupture d'autant plus élevées que l'essai sera plus rapide et que la résistance dynamique ira en croissant avec la vitesse du choc.

Pour les fers et les aciers, il doit être tenu compte de l'influence exercée, même à la température ordinaire, par la durée de l'essai sur les valeurs de la charge et de l'allongement de rupture; néanmoins, ces valeurs ne varient pas très rapidement avec cette durée tant qu'elle ne devient pas sensiblement inférieure à une minute et l'on peut considérer comme comparables les résultats d'essais dont la durée restera comprise entre une et cinq minutes.

Il est bien entendu toutefois que, dans un même essai, la vitesse de traction doit suivre la même loi du commencement à la fin; on peut chercher à rendre uniforme, soit la vitesse d'allongement, soit la vitesse de croissance des charges. Comme il s'agit avant tout d'obtenir des essais comparables entre eux, il faut adopter

Le procédé dont la réalisation est la plus simple ; ce procédé est, sans aucun doute, celui qui consiste à opérer avec une vitesse d'allongement constante.

Il y a lieu enfin de remarquer que, pour tenir compte de l'échauffement que subissent les éprouvettes de traction, échauffement variable avec leur volume, on doit opérer d'autant plus lentement que ce volume est plus grand.

En ce qui concerne les métaux autres que les fers et les aciers, il a été reconnu que l'influence de la durée sur les propriétés mécaniques de l'aluminium, du cuivre, etc., est relativement peu sensible ; par contre, elle est très notable pour le zinc.

CHAPITRE II

—

RÉPÉTITION DES EFFORTS

On a vu, dans l'étude générale du phénomène de traction qui a fait l'objet du chapitre précédent, les conséquences qu'on a cherché à tirer de l'essai de traction, suivant que le métal est soumis à des efforts statiques ou dynamiques qui peuvent se répéter au besoin mais à des époques assez éloignées pour que la pièce ait pu prendre dans l'intervalle son état d'équilibre.

Il est intéressant d'étudier maintenant le cas où les pièces métalliques sont soumises à des forces changeant incessamment de sens et d'intensité, comme, par exemple, certains organes de machines qui subissent des efforts rapidement répétés faisant travailler leurs molécules successivement à la traction et à la compression.

I. EXPÉRIENCES DE WÖHLER ET DE SPANGENBERG

Dans une communication faite le 15 Juillet 1881 à la Société des Ingénieurs civils, M Seyrig classe, de la manière suivante, les lois que Wöhler a déduites de ses expériences de 1849 à 1870, expériences continuées par Spangenberg.

Ces lois résultent d'essais à la traction, à la flexion et à la torsion :

1° Lorsqu'une pièce subit un certain nombre de fois des efforts provenant d'une charge alternativement appliquée et enlevée, ou bien diminuée seulement, la rupture se produit sous une moindre fatigue, par unité de section, que lorsque la charge est appliquée doucement.

Ce fait avait été déjà reconnu par Fairbairn dans un petit nombre d'expériences sur des poutres rivées.

2° Le nombre de répétitions de la charge, nécessaire pour produire la rupture, est d'autant plus grand que l'effort maximum est plus faible, l'effort minimum restant le même.

3° Le nombre de répétitions de la charge nécessaire à la rupture est d'autant plus grand

que l'effort minimum est plus grand, l'effort maximum restant le même.

On peut citer les résultats suivants à l'appui de chacune des deux lois précédentes.

Le nombre n de la répétition de l'effort nécessaire pour déterminer la rupture d'échantillons de fer d'essieux provenant des usines du Phénix, l'effort minimum ayant été nul, a été trouvé :

Pour f max. = 22 ^{kg} ,2 par mm ² ;	$n > 48,20$ millions
// f max. = 25, 0	// ; $n = 1,50$ //
// f max. = 30, 0	// ; $n = 0,86$ //
// f max. = 35, 0	// ; $n = 0,45$ //
// f max. = 40, 0	// ; $n = 0,17$ //

D'autre part, les résultats consignés ci-après ont été fournis par une série d'expériences effectuées sur de l'acier à ressorts :

f max. = 73 par mm ² ;	f min. = 12 ^{kg} ,10;	$n = 0,06$ millions
f max. = 73	// ; f min. = 31, 30;	$n = 0,15$ //
f max. = 73	// ; f min. = 36, 60;	$n = 0,40$ //
f max. = 73	// ; f min. = 48, 20;	$n > 19,67$ //

4° Quand l'effort maximum reste au dessous d'une certaine limite, il n'y a jamais rupture quel que soit le nombre des répétitions.

5° Cette limite de non rupture est d'autant plus élevée que l'effort minimum est plus grand.

La série des résultats suivants, obtenus en expérimentant du fer de très bonne qualité, résume les limites entre lesquelles on a fait varier l'effort dans l'unité de section, pour ne pas aboutir à la rupture.

Ces limites ont été de :

— 11 ^{kg,7}	à + 11 ^{kg,7}	par millimètre carré
0, 0	+ 23, 4	"
+ 17, 5	+ 32, 2	"
+ 32, 9	+ 32, 9	"

ce dernier chiffre correspondant à la charge dite *statique*.

II. EXPÉRIENCES DE BAUSCHINGER

Le professeur Bauschinger a effectué ses expériences sur des barreaux à section circulaire ou rectangulaire, en fer fondu, fer soudé ou acier.

On peut résumer comme il suit les résultats obtenus :

1° Lorsqu'on soumet une pièce à la répétition d'efforts alternant entre une limite inférieure nulle et une limite supérieure voisine de la

limite d'élasticité proportionnelle, la rupture n'a pas lieu, même après un nombre d'efforts de 15 à 16 millions.

Cette proportion n'est vraie qu'autant que la matière expérimentée n'est affectée d'aucun défaut local.

Le moindre défaut, même imperceptible au début, amène la rupture au bout d'un certain nombre d'efforts dont la limite supérieure n'atteint pas la limite d'élasticité proportionnelle. La limite d'élasticité proportionnelle, dite *primitive*, dépend essentiellement du traitement qu'a subi le métal. Elle peut avoir une valeur très peu élevée, comme elle peut aussi avoir été portée jusqu'au voisinage de la rupture; dans ce dernier cas, la proposition pourrait se trouver en défaut.

2° Quand on soumet une pièce à des efforts alternant entre zéro et une limite voisine de la limite d'élasticité proportionnelle primitive, ou dépassant plus ou moins cette limite, la limite d'élasticité proportionnelle s'élève et dépasse souvent très notablement l'effort maximum subi par la pièce; cet accroissement se continue à mesure que le nombre des efforts devient plus grand, sans pouvoir dépasser toutefois une certaine limite.

3° La répétition des efforts alternant entre zéro et une valeur supérieure F , n'amène pas la rupture, si la limite d'élasticité proportionnelle peut être élevée par cette répétition jusqu'à une valeur plus grande que F .

Si, au contraire, F est trop grand pour que la limite d'élasticité proportionnelle puisse dépasser cette valeur, la rupture se produira au bout d'un nombre suffisant d'efforts.

4° Lorsqu'une pièce a été soumise à des efforts plusieurs millions de fois répétés, la résistance à la rupture sous une charge statique n'en est pas diminuée, elle serait plutôt augmentée.

5° On avait conclu des expériences de Spangenberg que la répétition indéfinie des efforts modifie la structure des métaux et notamment celle du fer et de l'acier.

Le professeur Bauschinger a constaté, par contre, que la structure n'était pas modifiée à la suite d'efforts répétés et que l'altération, constatée pour la première fois et étudiée par Spangenberg, était localisée dans le voisinage de la section de rupture et se produisait un peu avant la rupture elle-même.

6° La limite du plus grand effort, alternativement de traction et de compression, dont la répétition n'amène pas la rupture, est égale à la

limite naturelle d'élasticité proportionnelle définie ci-après.

On commence par annuler, ou à peu près, la limite d'élasticité proportionnelle à la traction ou à la compression par un effort de compression ou de traction qui dépasse la limite naturelle d'élasticité proportionnelle primitive; puis, au moyen d'efforts successivement croissants, et alternativement de traction et de compression, on relève cette limite jusqu'à la plus grande valeur qu'on peut atteindre par ce procédé.

On a alors la limite naturelle d'élasticité proportionnelle.

III. DÉTERMINATION DE LA CHARGE RÉDUITE DE RUPTURE

En somme, les résultats des essais de traction, de compression, de flexion et de torsion effectués par les expérimentateurs précédemment cités peuvent se résumer dans la proposition suivante :

Si l'on calcule les tensions extrêmes (positives pour la traction, négatives pour la compression) qui correspondent aux limites des mouvements alternatifs imprimés au métal,

on trouve que, plus la différence algébrique de ces tensions est grande, plus la charge qui détermine la rupture est faible.

Il y aurait évidemment un intérêt considérable à savoir quelle est, pour chaque espèce de métal, la valeur de cette charge réduite qui produit la rupture dans telle ou telle circonstance donnée.

Les expériences faites jusqu'ici ne permettent malheureusement pas de résoudre le problème dont il s'agit d'une manière à peu près satisfaisante.

Dans les essais de Wöhler, où la charge, appliquée pendant moins de $\frac{1}{10}$ de seconde, se reproduisait à des intervalles réguliers un peu inférieurs à une seconde, la charge réduite de rupture φ s'est trouvée, pour les fers et les aciers expérimentés, sensiblement donnée par la formule :

$$\varphi = \frac{\Delta}{2} + \sqrt{R(R - n\Delta)};$$

Δ étant la différence algébrique mentionnée plus haut;

R , la charge de rupture telle qu'on l'obtiendrait dans le cas d'un essai ordinaire de résistance par l'addition lente et graduelle de poids;
 n , un coefficient numérique qu'on peut

prendre égal à environ 1,42 pour le fer d'essieux, et à 1,66 pour l'acier d'essieux Krupp, au moins pour les qualités expérimentées par Wöhler.

R, étant connu pour un métal déterminé, si l'on se donne arbitrairement Δ , on en déduit immédiatement la valeur correspondante de φ et, par suite, celle de l'effort minimum $\varphi' = \varphi - \Delta$.

En opérant de cette façon pour les valeurs $n = 1,42$ et $n = 1,66$ mentionnées plus haut et en prenant $R = 33^{\text{kg}},2$ pour le fer et $R = 73^{\text{kg}},4$ pour l'acier, on trouve que des *mouvements très rapidement et indéfiniment répétés* causent la rupture quand les efforts varient entre les limites suivantes :

Pour le fer d'essieux		Pour l'acier d'essieux	
kg. (tract.)	kg. (tract.)	kg. (tract.)	kg. (tract.)
De + 33,2	à + 33,2	De + 73,4	à + 73,4
+ 25	+ 31,5	+ 60	+ 69,8
+ 20	+ 30	+ 45	+ 64,6
+ 15	+ 28,4	+ 30	+ 58,3
+ 10	+ 26,3	+ 15	+ 50,5
+ 5	+ 23,8	0	+ 40,9
0	+ 21	(compr.)	(traction)
(compr.)	(traction)	+ 22,1	+ 22,1
- 11,7	+ 11,7	.	.

Ces résultats sont traduits sur la *fig. 11.*

Pour $\varphi' = 0$, c'est-à-dire pour le point O, on a :

$$\varphi = 2 R (\sqrt{n^2 + 1} - n).$$

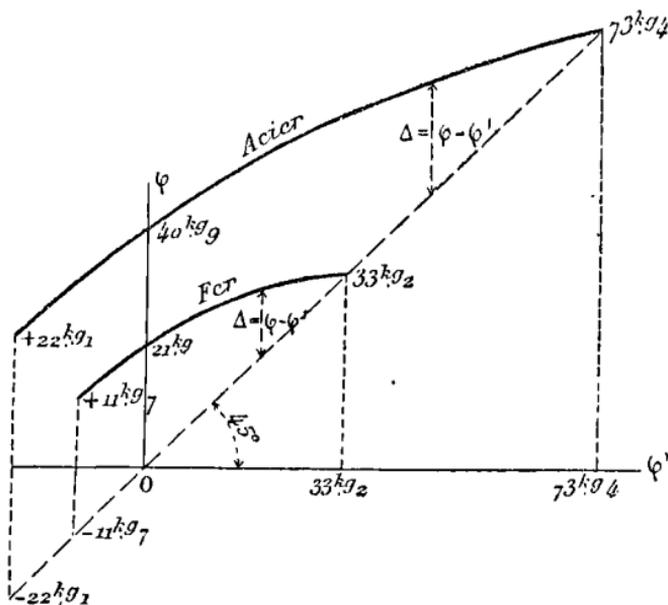


Fig. 11

Contrairement à ce qui a été affirmé plusieurs fois, cette valeur n'est pas égale à la limite d'élasticité, telle du moins qu'on la constate dans un essai ordinaire de résistance à la traction.

Pour $\varphi' = -\varphi$, ce qui correspond à des efforts alternativement égaux de traction et de

compression, on a :

$$\varphi = \frac{R}{2n}.$$

Si, pour une valeur donnée φ' , la charge maxima φ dépasse plus ou moins les chiffres précédents, la rupture est inévitable; elle se produit au bout d'un nombre plus ou moins grand de répétitions de l'effort.

Un point également important à noter c'est que le moindre défaut dans une pièce soumise aux efforts variables dont il est question ici facilite beaucoup sa rupture; les chiffres précédents se rapportent à des barreaux absolument sains.

Il est hors de doute que la valeur à adopter pour le coefficient n doit varier avec les différentes espèces de fer et d'acier; elle dépend non seulement de la charge de rupture ordinaire R , mais encore de l'ensemble des diverses propriétés moléculaires du corps considéré et particulièrement de la limite élastique.

On doit enfin faire remarquer que la science des essais n'est pas encore en possession de données sérieuses concernant les métaux autres que les fers et les aciers; il n'en reste pas moins infiniment probable que des phénomènes du même ordre doivent exister pour eux sous l'action des efforts répétés.

CHAPITRE III

EXPÉRIENCES RELATIVES A LA DISTRIBUTION DES DÉFORMATIONS DANS LES MÉTAUX SOU MIS A DES EFFORTS

Le présent chapitre a pour objet de faire connaître les résultats des expériences exécutées à la Section technique de l'Artillerie par M. le commandant Hartmann (1) en vue d'établir les lois suivant lesquelles se déforment les corps soumis à des efforts.

Nous ne saurions fournir, dans ce volume, une description détaillée des expériences dont il s'agit, mais il est nécessaire d'en faire ressortir le puissant intérêt et d'exposer, en un rapide aperçu, les conséquences importantes qu'on est

(1) Aujourd'hui lieutenant-colonel.

autorisé à en tirer au point de vue des propriétés élastiques de la matière (1).

D'une manière générale, on peut affirmer que les recherches précédemment entreprises au sujet de l'élasticité des corps solides ont été dirigées surtout *en vue de la détermination de la forme et des dimensions des déformations* des corps soumis à des forces extérieures, pour chacune des valeurs des forces appliquées sur leur surface, ou de l'*examen des cassures* au moment de la rupture du barreau d'épreuve.

Les expériences que nous allons décrire présentent un bien plus grand caractère de généralité, en ce sens qu'elles ont porté, d'une part, sur tous les genres d'efforts qu'on est habitué à considérer et que, d'autre part, elles ont mis en évidence *la possibilité d'obtenir, sur les surfaces libres de ces corps, les traces de leurs déformations intérieures.*

(1) Voir à ce sujet :

L. HARTMANN, chef d'escadron d'artillerie. — *Distribution des déformations dans les métaux soumis à des efforts* (Revue d'artillerie, t. 45, 46 et 47, de nov. 1894 à déc. 1895).

Comm^e HARTMANN. — *Sur l'élasticité*. Mémoire de la Commission des méthodes d'essai des matériaux de construction (2^e session), t. II, section A. Métaux, 1900.

Ce chapitre a été divisé en deux parties :

1° Étude expérimentale de la distribution des déformations suivant les efforts exercés ;

2° Exposé des conséquences résultant des expériences au point de vue des propriétés élastiques de la matière.

I. DISTRIBUTION DES DÉFORMATIONS SUIVANT LES EFFORTS EXERCÉS

Pour chaque genre d'efforts, on a fait varier, dans des limites aussi étendues que possible, les dimensions, les formes, ainsi que la nature des métaux employés en étudiant, en outre, l'influence de la vitesse des organes de transmission des efforts.

Le mode opératoire employé pour mettre en évidence les traces des déformations sur les surfaces libres des métaux consiste dans un polissage des surfaces aussi parfait que possible et ne comporte, comme on l'a indûment affirmé, aucun usage d'agents chimiques, ni l'emploi du microscope.

Les jeux de lumière auxquels donnent lieu, par ce procédé mécanique, les plus faibles dé-

pressions et les plus légères saillies résultant des déformations sont suffisants pour donner aux réseaux ainsi formés l'apparence des mouvements ondulatoires des liquides.

En vue d'augmenter la visibilité des spectres, surtout avec l'acier, on a eu recours à l'oxydation superficielle par un bleuissage à 200 ou 300°. Dans ces conditions, il suffit, après l'essai, de frotter légèrement la pièce avec du papier émeri fin pour apercevoir très nettement l'apparence des mouvements ondulatoires signalée plus haut.

1. Traction et compression. — La traction et la compression des prismes droits donnent lieu, sur chaque face, à deux systèmes de déformations, rectilignes, parallèles, symétriques l'un de l'autre par rapport à l'axe du solide.

Les cylindres de révolution se déforment suivant des hélices conjuguées de même pas.

La compression d'une sphère donne des loxodromies.

Ces déformations constituent d'ailleurs, comme on l'a déjà dit, et ce point est essentiel à remarquer, de véritables dépressions ou saillies dont la largeur peut atteindre 2 millimètres.

Les lignes et courbes dont il s'agit s'appliquent aux lignes moyennes tracées à égale distance des

bords des déformations et, par *déformations parallèles*, il faut entendre qu'on a affaire à une définition physique et non à une définition purement géométrique.

L'écart qui peut être constaté dans le parallélisme en question doit être négligé, car il ne saurait être imputable qu'à l'hétérogénéité inévitable existant dans les métaux que nous fournissent les procédés industriels.

Il est donc permis d'affirmer, en raison de la nature des lignes ou courbes de déformation mentionnées plus haut, qu'*elles font un angle constant avec la direction de l'effort*.

En outre, pour un corps donné, *les angles que font respectivement les lignes de traction et celles de compression avec la direction correspondante de l'effort sont complémentaires l'un de l'autre*.

Les essais de traction ou de compression effectués sur des *plaques minces* mettent en évidence un fait de la plus haute importance.

On constate, en effet, qu'il y a correspondance exacte entre les déformations qui prennent naissance sur les deux faces ; d'où il résulte que les déformations constatées sur les surfaces libres des solides ne sont pas des accidents particuliers à ces surfaces et constituent la trace extérieure

de mouvements moléculaires intéressant toute la masse du métal.

En ce qui concerne le phénomène de traction, il convient d'ajouter que les lois de la distribution des déformations sont indépendantes de la vitesse de transmission de l'effort et l'on obtient, par choc, des résultats identiques à ceux que donne une traction lente.

Pour la compression, les conclusions précédentes peuvent être conservées en remarquant toutefois que la densité des lignes de déformations devient de plus en plus grande près de l'appui à mesure que la vitesse de l'effort augmente. Il en résulte que les réseaux, tout en étant alors beaucoup plus nets, se manifestent d'une manière presque continue sur les surfaces libres, au lieu de n'apparaître que dans des régions relativement très éloignées les unes des autres.

Enfin, il est indispensable de noter que la compression de blocs portés à haute température a permis de faire ressortir que l'effort déterminait des déformations semblables à celles qu'on obtient à la température ordinaire, sans aucune modification de l'orientation et des positions relatives des lignes, sous la réserve toutefois qu'il devient de plus en plus difficile de les dis-

cerner au fur et à mesure que la température s'élève.

Cette constatation est importante au point de vue des théories métallurgiques et notamment à celui de la théorie du forgeage aux diverses températures industrielles, soit au pilon, soit à la presse.

Ce travail de transformation, on le sait, ne conduit pas seulement à un changement dans la forme du métal ; il opère, en outre, une modification profonde dans ses propriétés mécaniques et dans sa constitution.

La théorie cellulaire des propriétés de l'acier, en particulier, a permis d'envisager un côté de la question sans pouvoir fournir cependant une solution absolument satisfaisante à tous égards du problème considéré. Il est intéressant de remarquer que la modification des propriétés du métal sous l'action des engins de forgeage, aux températures de travail relativement basses signalées par Tchernoff, peut et doit être attribuée en grande partie au développement de forces élastiques dont l'action se manifeste par les lignes ou les réseaux dus aux déformations.

Les résultats des expériences ont été les mêmes avec les métaux simples (platine, argent, aluminium, cuivre, étain, plomb, zinc) et avec les

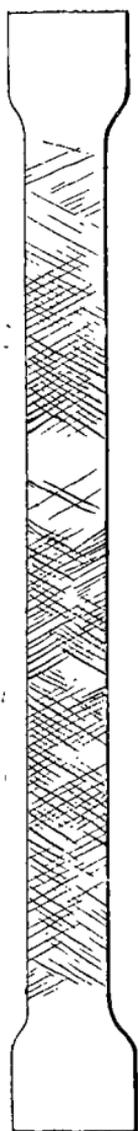


Fig. 12

métaux composés (acier, acier-nickel, bronze, laiton, métal delta, maillechort).

Avec l'acier, le platine, le cuivre, l'argent, les déformations ont, à tout moment, une grande netteté; avec l'aluminium, le laiton, etc., il convient de suivre attentivement les mouvements moléculaires pendant la marche ascendante de l'effort. Il se produit, en effet, avec ces derniers métaux, des déformations successives qui s'effacent ou se recouvrent, et on s'exposerait à ne pas reconnaître le mode de propagation des déformations, si l'on se bornait à examiner les barrettes après l'essai terminé.

En résumé, il importe de retenir les deux énoncés suivants qui synthétisent les résultats qui précèdent :

a) *Dans un corps solide soumis à la traction, les déformations ont pour traces, sur un plan quelconque parallèle à l'axe, des*

lignes droites ou courbes, qui jouissent de la

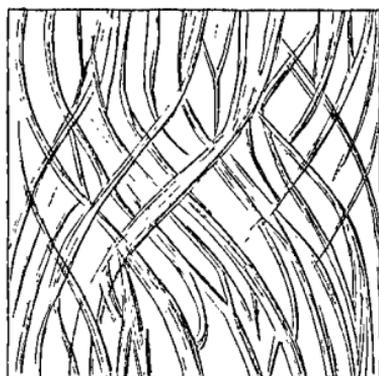


Fig. 13

*propriété de faire un angle constant avec cet.
axe.*

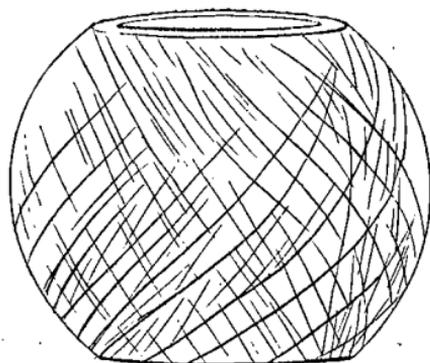


Fig. 14

L'ensemble des résultats obtenus dans les

90 DÉFORMATIONS DES MÉTAUX SOUMIS AUX EFFORTS

expériences de compression des corps solides conduit à un énoncé beaucoup plus général que le précédent, savoir :

b) Dans un corps soumis à la compression, les déformations ont pour traces sur les surfaces libres des lignes, droites ou courbes, qui font toutes le même angle, en tous leurs points, avec la direction constante ou variable des efforts (fig. 12, 13 et 14).

2. Flexion. — Les expériences du lieutenant-colonel Hartmann concernant les déformations produites par la flexion des métaux ont porté sur tous les cas qu'il est nécessaire d'envisager en vue de l'étude pratique de ce genre d'effort.

Ces expériences se rapportent aux cas suivants :

Flexion symétrique et flexion dissymétrique de barreaux rectangulaires posés sur deux appuis en agissant, dans les deux cas, sur un ou plusieurs points de la surface opposée à ces appuis et en faisant varier la répartition de la charge ;

Flexion des poutres encastrées ;

Flexion par compression des barreaux de grande longueur, y compris la résistance au flambement ;

Flexion des poutres courbes ;

Cintrage des tôles minces ;

Compression des solides évidés ;
 Cisaillement des pièces encastrées ;
 Flexion par choc.

Les résultats obtenus fournissent un ensemble de données particulièrement précieuses, tant en raison de l'importance des efforts de flexion dans les constructions métalliques que des conséquences auxquelles conduit l'étude des déformations permanentes pour l'étude de la fibre neutre et, en général, pour la discussion des théories actuelles de la flexion plane.

Nous ne saurions analyser, en détail, le mode opératoire employé, ni décrire, dans chaque cas étudié, le phénomène de la déformation produite ; nous devons nous borner à faire connaître les résultats généraux qu'il importe de retenir.

La flexion des corps solides, dans laquelle on retrouve, en somme, les lignes caractéristiques de la traction et de la compression, donne lieu exactement aux mêmes conclusions que ces deux genres d'efforts :

a) Les déformations se produisent suivant des réseaux formés d'éléments discontinus ;

b) Les déformations conjuguées sont toutes inclinées d'un même angle les unes sur les autres.

Tandis que, dans la traction, les déformations

sont réparties dans toute la longueur de l'éprouvette d'une manière plus ou moins régulière suivant la constitution initiale du métal ; *dans la flexion*, au contraire, la nature même des efforts exercés a pour conséquence de faire apparaître une figure géométrique d'un dessin bien déterminé, composé de deux régions, dont l'une ne renferme que des déformations en relief et l'autre que des déformations en creux, ces deux régions étant séparées par une zone intermédiaire où les déformations sont mixtes.

Les lignes de séparation de cette région intermédiaire et des régions extrêmes de compression et d'extension constituent deux fibres neutres que, dans la plupart des essais, on peut sans inconvénient confondre l'une avec l'autre.

On peut, en outre, d'après l'examen des lignes, étudier séparément l'allongement de la partie convexe du barreau et la contraction de la partie concave ; d'où il résulte qu'il est possible de déterminer, en chaque point d'un barreau de flexion, l'effort de traction ou de compression qui s'exerce à tout moment. Il suffit, à cet effet, de considérer la valeur de la déformation existante et d'en déduire, d'après des essais préalables de traction et de compression, la valeur de l'effort correspondant.

En ce qui concerne les formes générales des lignes et des réseaux dus aux déformations; nous nous contenterons de fournir, au sujet du cas ordinaire de l'essai de flexion, les indications suivantes :



Fig. 15

Pour un prisme de flexion chargé en son milieu et quel que soit l'intervalle des points d'appui, on remarque deux systèmes conjugués de

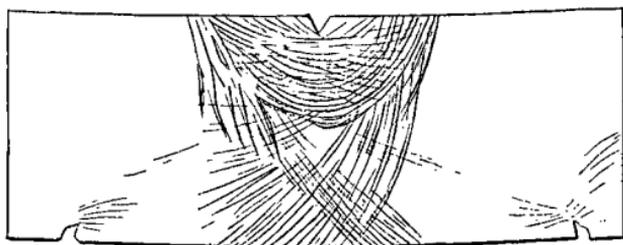


Fig. 16

spirales partant de la base supérieure du barreau et dont les pôles sont dans la région de l'application de l'effort (*fig. 15 et 16*).

Les spirales de la partie centrale du prisme atteignent sa base en conservant la même courbure sur toute leur longueur; celles qui sont placées à droite et à gauche de cette région changent au contraire de courbure et se dirigent respectivement vers les points d'appui.

Les deux faisceaux conjugués se coupent sous le même angle en tous leurs points et, par suite, les déformations font un angle constant avec la direction de l'effort qui coïncide, en chaque point, avec la bissectrice des lignes conjuguées passant par ce point.

Les spirales extrêmes sont en relief sur toute leur longueur; celles de la région centrale sont également en relief jusque vers leur milieu, mais ensuite elles sont en creux jusqu'à leur rencontre avec la base.

La région occupée par ces déformations en creux a la forme d'un triangle et on passe de cette région à la partie en relief qui l'enveloppe en remontant progressivement au niveau primitif de la surface; entre ces deux régions se trouve une zone intermédiaire qui reste le plus souvent élastique et dont l'étendue et l'importance dépendent de la longueur du barreau considéré.

La zone intermédiaire dont il s'agit, sensiblement parallèle aux deux bases en son milieu,

peut être considérée comme étant le tracé de la fibre neutre.

Il convient d'ajouter que la face supérieure du barreau et, le cas échéant, sa face inférieure présentent des déformations à peu près rectilignes, en relief pour la première, en creux pour la seconde, qui appartiennent à deux systèmes conjugués également inclinés sur les arêtes et qui se raccordent exactement avec les déformations correspondantes des faces latérales.

Les épreuves de flexion ont été répétées en opérant *par choc* en vue de se rendre compte de l'influence de la durée des efforts sur la nature des déformations.

Les résultats des observations faites à ce sujet peuvent être résumées en disant qu'à la considération d'un poids P tombant d'une hauteur donnée, on peut substituer celle d'un effort statique F agissant chaque fois pendant un temps très court.

Cet effort est susceptible de déterminer une déformation totale dans le barreau sur lequel il agit moyennant une durée suffisante d'application. Opérant par choc, c'est-à-dire chaque fois pendant un temps très limité, il ne peut donner au corps la déformation qui correspond à sa valeur. Ce résultat ne peut être obtenu qu'après

un nombre de chocs tel que le temps total de l'action de l'effort soit égal à celui qui est nécessaire pour produire tout son effet.

Les déformations vont ainsi en augmentant, comme si elles étaient produites par le même effort durant un temps de plus en plus long, et en dernière analyse on arrivera ainsi à la figure qui correspond à cet effort, quand il s'exerce statiquement d'une façon prolongée.

3. Emboutissage et poinçonnage. — Des plaques appuyées sur leur pourtour et soumises à l'action d'un poinçon en leur milieu subissent, sur les deux faces, des déformations suivant des spirales de deux systèmes conjugués.

Si la plaque, le poinçon et la bague d'appui sont circulaires et concentriques, on obtient des spirales logarithmiques ayant pour pôle le centre du disque (*fig. 17*).

D'une manière générale, le tracé des courbes de déformation dépend de la forme de la plaque, de celle du poinçon, du diamètre de la bague et enfin de la disposition relative de ces divers éléments. Les déformations des deux faces se correspondent, mais elles n'ont pas le même aspect et ne sont pas également importantes. En général, de deux régions opposées, l'une est soumise

à l'extension et l'autre à la compression. De plus, la limite élastique peut être dépassée en certains points d'une des faces, tandis que les points correspondants de l'autre face travaillent encore élastiquement, c'est-à-dire que les déformations

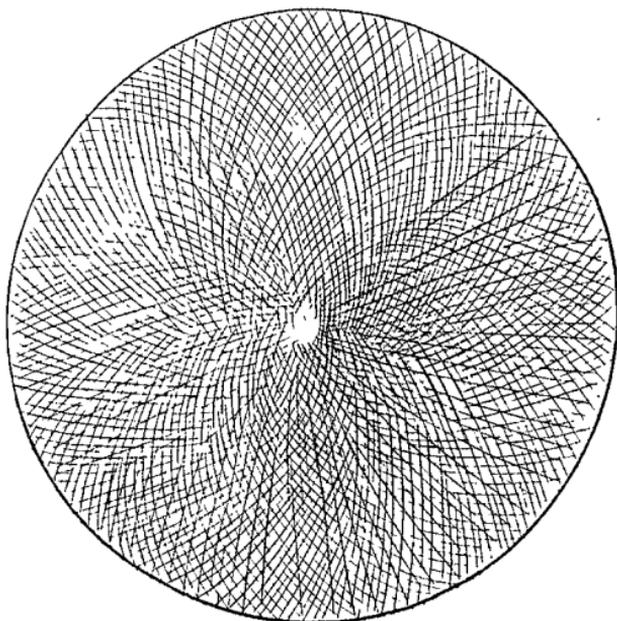


Fig. 17

peuvent apparaître sur une face et passer l'autre, même avec des plaques de faible épaisseur et les lignes peuvent former des dessins de formes différentes sur les deux faces.

Quel que soit le diamètre des disques employés il convient de remarquer la régularité des intervalles compris entre les spirales logarithmiques.

A chaque valeur de l'effort correspond une image géométrique bien définie, et le passage



Fig. 18

d'une image à l'autre se fait en même temps par le prolongement des spirales et par l'interposition de nouvelles lignes qui, dans tous les cas, occupent exactement le milieu de l'intervalle compris entre les spirales primitives.

Il s'agit, en réalité, de réseaux espacés d'après une loi déterminée et on peut les comparer aux franges alternativement brillantes et sombres dues à la diffraction des rayons lumineux passant par une fente étroite.

Les résultats ci-dessus indiqués sont les mêmes que les plaques soient embouties lentement à la presse hydraulique ou qu'elles soient soumises au choc, soit d'un mouton, soit même d'un projectile animé d'une grande vitesse.

La forme de la cassure des plaques embouties donne lieu à des observations très intéressantes permettant de distinguer, dans la cassure, la trace des spirales suivant lesquelles le mouvement moléculaire s'est produit; les bords de cette cassure sont en forme de dents de scie, avec intervalles égaux d'une dent à la suivante (fig. 17).

4. Mandrinage et torsion. — L'étude des déformations dues au *mandrinage* des cylindres creux présente un grand intérêt pour l'artillerie, en raison de nombreuses applications pratiques auxquelles elle est susceptible de conduire.

Lorsqu'on soumet un tube cylindrique à une pression intérieure, il se développe, sur les deux tranches, des spirales logarithmiques, qui partent de l'alésage et dont la longueur augmente avec

l'effort ; à partir du moment où elles atteignent la surface cylindrique, celle-ci se déforme suivant des hélices conjuguées de même pas, qui raccordent les spirales des tranches.

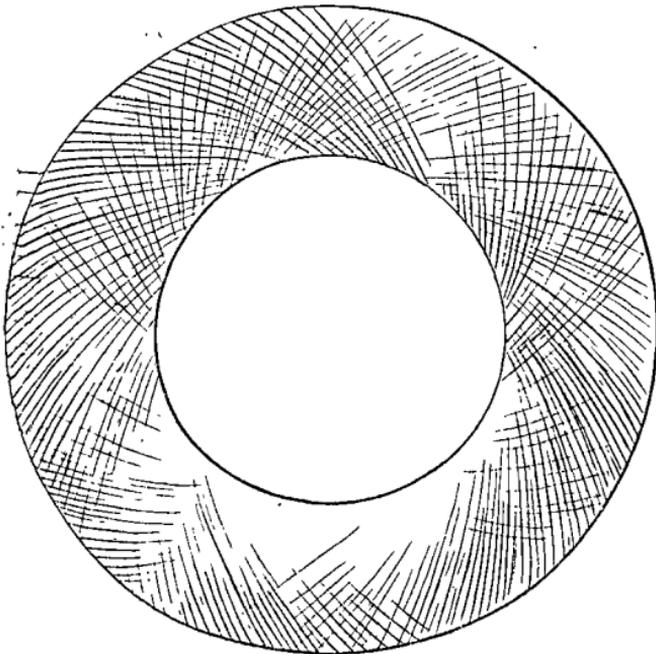


Fig. 19

Dans ces différents cas, il se produit souvent des déformations secondaires dirigées suivant les bissectrices des deux systèmes conjugués des déformations principales.

La rupture se fait tantôt suivant les déforma-

tions principales, tantôt suivant les déformations secondaires.

Quand on opère par choc, en faisant tomber un poids sur le mandrin, les déformations présentent les mêmes caractères ; l'effet du mouton est d'enfoncer progressivement le mandrin, en donnant ainsi lieu chaque fois à une augmentation des déformations déterminées par les coups précédents.

Nous ne saurions donner, sans sortir des limites que nous nous sommes imposées, un résumé même succinct des conclusions d'un si puissant intérêt auxquelles est arrivé M. le lieutenant-colonel Hartmann au sujet du travail de déformation des bouches à feu sous l'action du tir ou de causes anormales s'y rattachant ; nous renvoyons le lecteur pour une étude plus complète de la question, aux mémoires si documentés de cet habile expérimentateur.

Quand on soumet à *la torsion* une tôle mince rectangulaire d'acier doux, après avoir parfaitement poli ses deux faces, on voit apparaître, à la limite élastique, des lignes rectangulaires parallèles aux côtés de la tôle. L'aspect du métal, quand on le frotte après l'essai avec du papier émeri, est celui d'un damier à cases extrêmement régulières.

Les déformations commencent par être en relief sur les deux faces de la tôle ; mais, à mesure que l'angle de torsion augmente, il se produit en même temps des déformations en creux. Pour une valeur très grande de cet angle, il se forme, en outre, sur les bords, des déformations bissectrices inclinées à 45° environ sur les arêtes.

Les déformations des cylindres se font suivant les sections droites et suivant des hélices peu inclinées sur les génératrices.

II. CONSÉQUENCES DES EXPÉRIENCES AU POINT DE VUE DES PROPRIÉTÉS ÉLASTIQUES DE LA MATIÈRE

L'examen des résultats précédemment exposés a fait ressortir que les déformations superficielles des corps obéissent à deux lois fondamentales :

- 1° Elles font en tous leurs points un angle constant avec la direction de l'effort ;
- 2° Elles se propagent par ondulations.

Ces déformations ne sont pas des accidents particuliers aux surfaces, mais elles constituent la trace extérieure de mouvements moléculaires intéressant toute la masse du métal.

Il semble ainsi que les actions moléculaires ne se font pas à l'intérieur des corps solides homogènes, même au-dessous de leur limite élastique, suivant la loi de continuité, qui constitue la base fondamentale de la théorie mathématique de l'élasticité et des théories spéciales de la résistance des matériaux.

On peut concevoir, par suite, une théorie physique de l'élasticité relevant uniquement de l'expérience et reposant sur des principes absolument nouveaux dont nous nous proposons de donner un rapide aperçu.

1. Augmentation de la limite élastique.—

Nous savons que la limite élastique d'un corps prend une valeur supérieure à sa valeur primitive sous l'action d'un effort plus grand que cette limite.

Cela posé, considérons un corps simple ayant été soumis à un recuit parfait et, par suite, réputé *sans tensions*.

Soumis à l'action d'un effort, ce corps subit une polarisation moléculaire se produisant, en chaque point, suivant des éléments inclinés d'un même angle sur la tangente à la courbe de transmission des forces en ce point ; ce corps se trouve pour ainsi dire clivé dès la première action de

l'effort suivant des surfaces régulièrement distribuées.

Les déformations élastiques, dont les zones de clivage sont le siège, n'ont pas la même valeur dans toutes ces zones ; elles sont ondulatoires en passant par des maxima et des minima ; il existe une longueur d'onde entre les zones élastiques de même intensité.

A la limite élastique, les surfaces, où les mouvements élastiques sont maxima, se déforment d'une manière permanente et l'on obtient ainsi des nappes de mouvements moléculaires géométriquement réparties à intervalles réguliers.

En même temps, la quantité de matière déplacée varie d'un point à un autre dans l'intérieur de chacune des zones de déformation.

De cette discontinuité de l'écoulement moléculaire et de sa valeur inégale dans les régions déformées résultent des frettages naturels constituant comme un véritable emmagasinement de forces élastiques.

Le corps ainsi déformé par le premier effort devient susceptible de résister, sans nouvelles déformations permanentes, à un effort plus faible agissant dans les mêmes conditions. Telle pourrait être l'explication du phénomène de l'augmentation de la limite élastique sur

laquelle nous avons fourni de nombreux développements au cours de la présente étude.

2. Retour à l'état initial du corps. — Le même raisonnement peut être appliqué à l'état initial du corps, soit avant qu'on l'ait soumis à un effort supérieur à sa limite élastique.

Le corps, à son état initial, aurait une limite élastique résultant des forces élastiques qui s'y trouvent emmagasinées ; la valeur de ces forces élastiques constituerait alors un minimum capable de s'accroître sous l'action successive des déformations permanentes qu'on y pourrait provoquer. D'après cette hypothèse, tout corps solide ayant une limite élastique ne peut pas, par cela même, être isotrope.

Quand un corps simple, préalablement déformé par un effort, est porté de 0° à t° , puis refroidi de t° à 0° , soit quand il est recuit à t° , il reprend à 0° son état physique initial, c'est-à-dire qu'il conserve l'intégralité de ses forces élastiques emmagasinées, tant que t reste inférieur à une valeur L définissant la *limite d'élasticité théorique* du corps.

Si la température s'élève au-delà de L , il y a déformation permanente ; le corps revenu à 0° a perdu une partie de ses forces élastiques primi-

lives ; la limite d'élasticité thermique est alors devenue la température $L + \theta$ à laquelle le corps a été recuit.

Rigoureusement, le minimum des forces élastiques emmagasinées dans un corps solide se rapporte à l'état cristallin et ne comprend alors

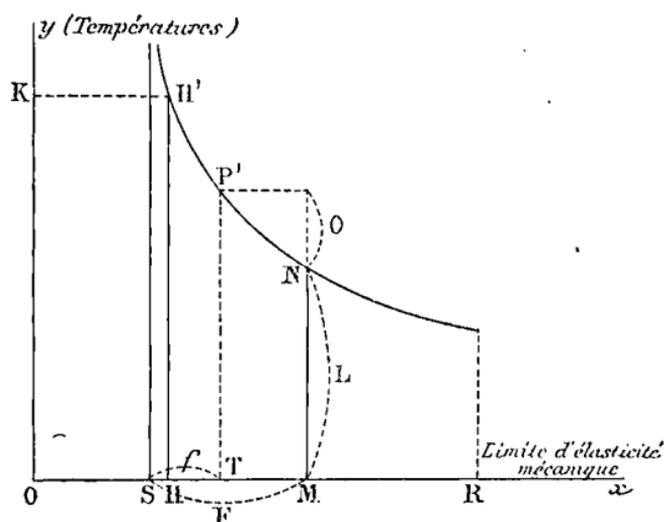


Fig. 20

OH, limite d'élasticité proprement dite ; OR, charge de rupture ; OS, forces élastiques de l'état cristallin ; OK, température du recuit appropriée.

que les forces élastiques dues précisément à l'état de solidité du corps ; mais, en fait, on conserve une fraction, assez petite d'ailleurs, des forces élastiques dues aux actions mécaniques

extérieures, en limitant le recuit à une température R qui donne en même temps le grain le plus fin.

Le minimum pratique des forces élastiques, c'est-à-dire celui qui définit l'état naturel du corps, a ainsi une valeur supérieure à celle qu'il aurait si le corps avait reçu l'état cristallin. Le minimum absolu est irréductible par le recuit, quelle qu'en soit la température.

Il en est de même du minimum pratique pour lequel on ne dépasse pas la température à laquelle il correspond.

3. Succession des différents efforts. —

L'existence de forces élastiques préexistantes peut influencer sur la régularité de la distribution des déformations quand le corps est soumis à un essai d'une autre nature; les zones, suivant lesquelles il a dû se déformer pour résister au premier effort, continuent quelquefois à être le siège de mouvements moléculaires dans le voisinage immédiat de la limite élastique, cette réapparition de lignes antérieures ne contrariant nullement le développement des zones régulières afférentes au nouvel effort.

Les forces développées sont assez puissantes pour produire dans le métal des effets indépen-

dants, dans une large mesure, de son degré d'homogénéité, et les lignes obtenues dépendent de la forme géométrique de la pièce ainsi que de la nature de l'effort et non de sa constitution chimique.

Les idées qui viennent d'être exposées sont, à notre avis, d'une grande fécondité et, si elles paraissent devoir être en contradiction avec certaines hypothèses servant de base à des théories existantes, elles ont pour elles le grand avantage de s'appuyer sur des faits très facilement observables.

En vue de ne leur attribuer qu'une importance secondaire non susceptible d'apporter un trouble à l'enseignement didactique actuel, on a cru pouvoir affirmer que les lignes de la surface des corps déformés ne suivaient, à proprement parler, aucune loi strictement géométrique, et, chose plus grave, qu'elles n'avaient aucune relation avec l'intérieur du métal.

Nous pensons avoir montré, dans ce succinct exposé, qu'on se trouvait en présence d'un phénomène physique d'un caractère absolu de généralité.

Il y a tout lieu de penser que ces expériences qui ont contribué déjà, tant en France qu'à l'étranger, à susciter de fécondes discussions

au sujet des lois énoncées pour la distribution des déformations dans les corps solides marquent une première étape dans la voie largement ouverte aux conceptions nouvelles de la mécanique physique.



TITRE II

PRATIQUE DES ESSAIS

Les essais mécaniques, effectués pour apprécier les diverses qualités de résistance des métaux, sont relatifs aux efforts de *traction*, de *compression*, de *choc*, de *flexion* et de *torsion*.

Ces essais mécaniques se font sur des échantillons spéciaux appelés *éprouvettes* ou *barreaux d'épreuve* ; ils sont presque toujours complétés par des essais dits *de fabrication* dont le but est d'apprécier comment un objet fini se comportera sous l'action d'efforts de l'ordre de ceux qu'il est appelé à supporter, soit en service, soit au cours des transformations mécaniques de son façonnage.

CHAPITRE PREMIER

ESSAIS D'USINES

Afin de se rendre un compte exact de la série des épreuves auxquelles est le plus généralement soumis un métal avant que la pièce qu'il doit fournir soit admise en réception par les différents services qui doivent l'utiliser, nous examinerons tout d'abord quels sont les essais mécaniques ou autres auxquels on procède dans l'usine même qui l'a élaboré.

Ces essais comprennent aussi bien les essais mécaniques à chaud et à froid que des analyses chimiques.

Ils sont effectués dans les usines mêmes, soit par le soin des agents de ces usines pour assurer ultérieurement l'admission en recette de leurs produits, soit par des contrôleurs spéciaux des divers services ou administrations qui peuvent exiger, le cas échéant, certaines garanties dès la coulée du métal en lingot ou en moulage.

I. ESSAIS EN COURS D'ÉLABORATION DU MÉTAL

Les usines productrices exécutent elles-mêmes tous les essais qu'elles jugent utiles ou qui sont nécessaires en vue de l'élaboration d'un métal susceptible de satisfaire aux conditions imposées par les divers cahiers des charges pour les essais mécaniques ou autres.

La composition chimique du métal peut ne pas faire l'objet de prescriptions spéciales, l'industriel n'ayant le plus souvent à se préoccuper que de réaliser un produit répondant aux conditions mécaniques exigées pour les essais usuels.

Ce cas se présente notamment pour la presque totalité des fournitures des métaux dérivés du fer : *fers, fontes et aciers*.

Par contre, pour les *alliages* et pour certains métaux *spéciaux*, il peut n'en pas être ainsi ; les usines étant astreintes à livrer un métal absolument conforme à un échantillon fourni d'autre part, toutes analyses pouvant être faites par les agents de contrôle des différents services ou administrations.

Quoi qu'il en soit, tant pour garantir la composition chimique imposée que pour réaliser un métal donné, les usines disposent le plus ordinairement de laboratoires où sont exécutées, au cours même de l'affinage, les analyses jugées nécessaires.

Pour la fabrication des aciers, en particulier, on opère de la manière suivante :

Le fondeur coule à proximité du four, sur le plancher de travail, une petite quantité de métal en fusion prélevée dans le bain, à l'aide d'une cuiller spéciale à long manche, dans une lingotière appropriée. Ce lingot de dimensions très réduites est démoulé rapidement, puis forgé et transformé en un disque suffisamment chaud pour pouvoir être trempé à l'eau tout de suite.

Après trempe, le disque est ployé et rompu.

La facilité du ployage ainsi effectué et l'examen du grain de la cassure renseignent tout d'abord le fondeur sur le degré d'affinage du métal en cours d'élaboration.

Si besoin est, un fragment du disque rompu est porté au laboratoire de l'usine où, au moyen d'une petite machine à percer, on prélève quelques copeaux que le chimiste analysera par un procédé rapide pour apprécier notamment la teneur du métal en carbone.

Enfin, et lorsque l'affinage est complètement terminé, on coule souvent un nouveau lingot de très petites dimensions qu'on façonne immédiatement à l'aide d'étampes appropriées, en un barreau destiné à être essayé à la traction, trempé ou non trempé, et brut de forge.

L'usine est ainsi fixée, dans une certaine mesure, sur la valeur approximative des caractéristiques du métal à l'essai considéré.

Cet essai est, d'ailleurs, complété s'il est nécessaire, par un essai de ployage et de choc.

II. GARANTIES PRISES AU SUJET DES LINGOTS ET DES MOULAGES

On sait que les métaux sont coulés le plus généralement dans des récipients métalliques donnant, après refroidissement, des blocs plus ou moins compacts appelés *lingots*, de profils et de sections fort simples, mais éloignés des dimensions définitives que doit avoir l'objet une fois confectionné.

C'est par des modifications successives de forme, déterminées par un travail à chaud, le plus ordinairement, qu'on amènera le lingot à l'état d'objet brut de forge ou de barres laminées

qu'un usinage ultérieur à froid ou qu'une nouvelle opération à chaud transformeront, après un plus ou moins grand nombre de traitements métallurgiques spéciaux, en pièce finie.

Pour certains métaux, il est possible d'obtenir presque d'un coup l'objet à confectionner, sous la réserve de procéder après la coulée à des menues opérations de finissage pour la chute des masselottes, le rabotage de certaines faces d'appui, etc., ou à des traitements calorifiques n'agissant plus sur la forme de la pièce tels que trempes, recuits et revenus.

C'est ainsi qu'on obtient les *moulages* de fonte, d'acier, de bronzes et de métaux ou alliages divers.

1. Cas des lingots. — Nous nous occuperons principalement des lingots d'acier en ce qui concerne les garanties à prendre après la coulée pour qu'ils soient susceptibles de fournir ultérieurement un produit transformé acceptable.

Ces garanties doivent être scrupuleusement observées si l'on veut compter sur une sécurité absolue dans l'emploi de métaux d'un usage si général dans les constructions.

Tout lingot d'acier présente des défauts *naturels* qui sont plus ou moins atténués ou dis-

paraissent complètement pour les autres métaux ou alliages.

Ces défauts naturels sont les suivants :

Le *vide central*, appelé aussi *retassure* ou *entonnoir de retassement*, provenant des conditions physiques mêmes du refroidissement du métal dans sa lingotière ;

Les *soufflures* ou poches remplies de gaz.

Comme il n'est pas possible par un travail mécanique à chaud de souder entre elles les parois de la retassure légèrement oxydées, on emploie une solution radicale pour s'en débarrasser et qui consiste à supprimer la partie du lingot qui la contient.

Cette retassure est toujours localisée à la partie supérieure et tous les procédés de coulée sont prévus de manière à la réduire au minimum en hauteur.

Pour les aciers, on effectue deux chutes ; l'une dite *du haut*, par laquelle on élimine 25 à 30 % environ du poids du lingot pour enlever la retassure ; l'autre, dite *du bas*, qui s'élève à environ 4 % et dont l'objet est de ne pas utiliser la partie inférieure du lingot qui contient le métal du premier jet de coulée où ont pu se rassembler un certain nombre d'impuretés, provenant du

chenal de coulée ou localisées au fond de la lingotière.

La valeur de ces chutes peut ne pas être aussi importante pour les aciers ou pour les fers d'un usage courant et qui ne sont pas destinés à des emplois spéciaux exigeant de grandes qualités de ténacité pour résister à de violents efforts dynamiques.

C'est ainsi que, pour les aciers en barres, les profilés et les tôles employés dans les constructions ordinaires et supportant surtout des efforts statiques, on se borne à effectuer des chutes suffisantes pour faire disparaître tous les défauts et dont la valeur, par rapport au poids ou à la longueur des produits, est fixée, dans chaque cas, par le cahier des charges qui les concerne. Ces chutes sont faites, soit sur les lingots, soit sur les produits finis, soit sur les produits à un état intermédiaire, suivant les conventions passées entre le producteur et le consommateur.

En ce qui concerne les soufflures, il appartient au fabricant de métal d'utiliser les procédés chimiques bien connus pour les atténuer dans la plus large mesure ; mais les divers services ou administrations imposent le plus souvent aux produits ferreux demi-finis et bruts de forge qui leur sont livrés une section donnée, réduite

dans une certaine proportion par rapport à la section du lingot d'où dérivent ces produits par transformation à chaud au pilon, à la presse ou au laminoir.

Cette réduction de section constitue le *corroyage* qui varie, d'ordinaire, entre 4 et 3 ; ce qui veut dire que les lingots destinés à la fabrication des barres et gros échantillons ou des pièces en acier auront une section au moins égale à 4 fois ou 3 fois celle de la barre ou de la pièce finie.

Par cette opération du corroyage, les soufflures sont aplaties, leurs parois non oxydées se soudent et le métal finit par acquérir une grande compacité.

Effectué à chaud pour les métaux ferreux au cours de leur travail par les engins de forgeage ou quelquefois à froid par sectionnement du lingot à la mortaiseuse, le corroyage se fait à froid pour les métaux et alliages qui ne supportent pas le forgeage ou le laminage aux hautes températures.

Dans ce dernier cas, c'est par un nombre déterminé de laminages à froid, suivis ou non de recuits, que l'industrie livre les plaques ou barres de ces métaux ou alliages. Souvent même le cahier des charges impose, pour l'épaisseur

du lingot brut de coulée, une valeur limite minima.

Quant aux défauts accidentels des lingots, *tapures, criques, etc.*, il appartient au consommateur de faire connaître à l'industriel dans quelles limites ces défauts pourront entraîner le rebut de la fourniture.

2. Cas des moulages. — Les moulages doivent être, en principe, exempts de soufflures; les métaux qui les constituent doivent avoir été élaborés en conséquence.

Les poids des masselottes peuvent être fixés par les cahiers des charges et varient, ordinairement, du $\frac{1}{5}$ au $\frac{1}{3}$ du poids de la pièce; cette dernière proportion correspondant à la coulée des moulages de fortes dimensions.

Quant à leur emplacement pour chaque pièce, il est rare que des prescriptions précises puissent être imposées, le fabricant cherchant naturellement à disposer les masselottes de manière que le moulage obtenu soit bien venu, tant au point de vue de la pureté du métal qu'à celui de sa forme et de sa compacité.

Souvent, cet emplacement est choisi après entente entre le producteur et le consommateur.

Les cahiers des charges fixent, en outre, les opérations calorifiques à faire subir aux moulages, telles que *recuits*, *trempes* et *revenus* pour les moulages d'acier, etc.

CHAPITRE II

ESSAIS MÉCANIQUES PROPREMENT DITS DE RÉCEPTION DES MÉTAUX DE LA FAMILLE DU FER

Les indications qui suivent ne peuvent qu'être générales, en raison de l'impossibilité de préciser des conditions qui présentent un certain caractère de variabilité d'après la nature des pièces mises en commande.

Les métaux ferreux sont les plus importants à considérer au point de vue des constructions, tant en raison de l'universalité de leur emploi que de la complexité des procédés métallurgiques mis en œuvre pour les obtenir sous des formes et avec des qualités variant dans des limites très étendues.

La classe principale de ces métaux est constituée par les *aciens* dont les épreuves de réception font l'objet des développements qui suivent,

I. ACIERS

Les différents services ou administrations adoptent une classification comprenant toutes les nuances ; cette classification ne se rapportant, en principe, qu'aux aciers dits *au carbone*, sauf toutefois en ce qui concerne les aciers *extra-durs à outils* qui sont presque toujours des aciers *spéciaux*, dans lesquels ce n'est plus le carbone qui donne à ces métaux leurs propriétés caractéristiques mais d'autres éléments, tels que le chrome, le silicium, le manganèse, le vanadium, le nickel, etc.

Les aciers dans lesquels le carbone n'est plus l'élément prépondérant au point de vue des propriétés qui les caractérisent et qui, n'étant pas des aciers *spéciaux à outils*, sont employés dans les constructions ou pour la confection de certains appareils, tels que les aciers *au nickel* à teneurs variées, les aciers *chromés*, etc., font l'objet de classifications particulières.

Quoiqu'on ne puisse pas rattacher ces métaux à l'une des divisions de la classification générale des aciers au carbone, la nature des essais mécaniques auxquels on les soumet est du même

ordre ; les valeurs des caractéristiques aux différents efforts étant indiquées dans des cahiers des charges établis suivant la nature des fournitures qui s'y rapportent.

Cette réserve étant faite, on peut dire, d'une manière générale, que les usines divisent leurs aciers en six grandes classes comprenant les aciers : *extra-doux, doux, demi-doux, demi-durs, durs* et *extra-durs*.

Les aciers à moulages ne sont pas compris dans cette classification ; on verra, ultérieurement, à l'étude des essais les concernant, les catégories dans lesquelles on les a classés.

Les six classes d'aciers qu'on vient de mentionner peuvent comprendre des aciers en barres, des pièces brutes de forge à transformer ensuite par un travail approprié à chaud ou à froid, des tôles d'acier, des profilés et des feuillards.

Il reste entendu que ces diverses pièces ne sont pas afférentes à chacune des classes dont il s'agit.

Les essais mécaniques généralement admis, et dont la totalité n'est pas également applicable à chacune de ces classes, comprennent :

Les *essais à la traction*, soit avant trempe, soit après trempe ;

Les *essais de ployage*, dans lesquels intervient seul le phénomène de la flexion simple ;

Les *essais de choc*, soit sur barreaux pleins au mouton ordinaire, soit sur barrettes entaillées avec appareil enregistreur du travail dépensé pour la rupture.

A ces épreuves qui constituent la véritable base de tous les cahiers des charges, il convient d'adjoindre, suivant la nature plus ou moins spéciale des fournitures, les essais spéciaux de pénétration par choc, soit par *poinçonnage*, soit par *striage*, etc.

Enfin, suivant le cas, les cahiers des charges peuvent imposer des essais dits de *fabrication*.

Les barreaux d'épreuve sont pris dans les pièces mêmes, et, autant que possible, dans les chutes provenant de ces pièces toutes les fois que ces chutes sont suffisamment saines, ou encore en des emplacements imposés par le consommateur.

Souvent, et en vue d'apprécier la qualité du métal à la partie supérieure ou inférieure du lingot, des barreaux sont prélevés dans les régions de la pièce voisine des chutes effectuées.

Les barreaux ou éprouvettes, aux dimensions prescrites, sont détachés à froid, à la machine-outil, sans forgeage préalable; ils correspondent souvent au centre de la barre ou de la pièce.

Pour les essais avant trempe, les éprouvettes

sont généralement soumises à un recuit au rouge cerise clair (900°) suivi d'un refroidissement à l'air libre.

Pour les essais après trempe, on procède, sur ces éprouvettes, à une trempe à l'eau à 28 ou 30° entre le rouge cerise et le jaune oxydant (vers 950°) suivie d'un revenu au rouge sombre (650°) avec refroidissement, à l'air libre ou dans la cendre chaude, suivant la nuance.

Les aciers des quatre premières classes peuvent être soumis aux trois essais mécaniques de *traction*, de *ployage* et de *choc*.

Les aciers durs ne sont soumis qu'à des essais de traction.

Pour les aciers extra-durs, les cahiers des charges ne fixent que la limite minima des caractéristiques de l'essai de traction que doivent au moins atteindre ces métaux. Lorsque ces aciers, ce qui est à peu près le cas général, doivent être utilisés en vue de la confection d'outils, on les soumet à des épreuves spéciales dont il sera fait mention ultérieurement. La plupart des cahiers des charges spécifient, pour les essais au choc des aciers des quatre premières classes, que les barreaux *tremvés* doivent supporter 15 coups de mouton sans se rompre ; pour les aciers de la 5^e classe, cette condition s'applique

aux barreaux *non trempés* ; aucune épreuve de choc n'est spécifiée pour les aciers extra-durs.

Enfin, en ce qui concerne l'épreuve de pliage, les barrettes trempées doivent pouvoir, en général, être ployées à *bloc* pour les aciers doux et extra-doux ; sous un angle de 60° et un rayon de courbure égal à une fois et demie ou deux fois l'épaisseur pour les aciers demi-doux et demi-durs.

Aucun essai de pliage n'est prévu pour les aciers durs et extra-durs.

Il nous paraît inutile d'indiquer les règles admises au sujet du nombre des éprouvettes à prélever, d'après l'importance de la fourniture ou sa nature, ainsi que les prescriptions concernant la réception ou le refus des lots présentés, suivant qu'un nombre donné d'éprouvettes a ou non satisfait, soit pour les valeurs individuelles des caractéristiques, soit pour les valeurs moyennes de certaines d'entre elles, aux conditions imposées.

Il suffit de consulter les cahiers des charges établis à cet effet par les différentes administrations.

Les *aciers à outils* font l'objet de règles spéciales pour leur admission en recette ; il a été reconnu, en effet, depuis longtemps, par la pra-

tique industrielle, que les essais mécaniques usuels ne pouvaient renseigner d'une manière certaine sur les qualités qu'ils doivent présenter pour l'emploi auquel ils sont destinés.

Il semble que les qualités de résistance à l'usure et de dureté qui les font apprécier puissent être difficilement discernées au moyen des caractéristiques fournies par ces essais usuels,

Il y a plus.

Les méthodes d'élaboration elles-mêmes ne donnent pas des échantillons comparables; il paraît acquis que l'acier fondu au creuset, c'est-à-dire obtenu en dehors de tout affinage appréciable par oxydation, est le métal convenant le mieux pour l'acier à outils.

D'une manière générale, on peut affirmer que c'est à l'usage qu'on reconnaît si telle ou telle marque donnée répond bien à son emploi.

Toutefois, les cahiers des charges ont prévu, pour leur réception, des épreuves consistant à confectionner avec ces aciers, suivant leur destination, un certain nombre d'outils correspondants, trempés et revenus de la manière qu'il convient, et à les essayer sur de la fonte blanche ou de l'acier dur trempé ou même sur le métal qui a servi à les confectionner, ce métal n'étant que recuit sans être trempé.

Souvent, les consommateurs achètent directement une qualité donnée d'acier à outils qui a fait ses preuves, sans exiger d'autres garanties que la marque spéciale sous laquelle est désigné l'acier dont il s'agit.

Les *aciers malléables* qui doivent supporter une série de transformations à chaud lors de leur utilisation ; fers, aciers doux, tôles des différentes catégories, sont soumis, en outre, à des *essais à chaud* assez variés comprenant, soit des essais d'écrasement, soit des essais d'emboutissage, soit des essais de perçage, de rabattement et de soudage, etc.

Les *aciers moulés* sont divisés en deux grandes catégories qui se subdivisent souvent elles-mêmes en plusieurs autres :

Moulages en acier doux ;

Moulages en acier dur.

Généralement, les moulages en acier dur sont trempés à l'huile ; tous les moulages durs ou doux sont toujours recuits au rouge cerise clair.

Les moulages doux peuvent être trempés également à l'huile et quelquefois à l'eau chaude ; mais souvent, en raison de leur emploi, cette trempé n'est pas effectuée, comme étant inutile.

Les essais pratiqués sur les moulages sont

ceux de *traction* et de *choc* sur éprouvettes prélevées dans les pièces elles-mêmes en des excédents de métal venus de fonderie, après que ces pièces ont subi les traitements calorifiques ci-dessus visés.

Lorsqu'en raison de la forme des pièces, il n'est pas possible de procéder ainsi, on prélève les essais dans de petits lingots coulés en sable en même temps que ces pièces, ces lingots étant soumis aux mêmes traitements métallurgiques.

Les cahiers des charges autorisent souvent les industriels à réparer, soit par soudure autogène, soit par soudure électrique, les pièces criquées au retrait ou présentant un manque de métal peu important.

Les tableaux des p. 133 à 136 font connaître, à titre d'exemple, la classification générale des aciers au carbone telle qu'elle a été adoptée par le service des forges de l'artillerie, ainsi que la nature des essais mécaniques auxquels doivent satisfaire ces métaux.

II. FERS ET FONTES

Les *fers* et les *aciers puddlés* tendent de plus en plus à disparaître du marché sidérurgique depuis l'extension si grande prise, dans ces dernières années, par la fabrication des aciers extradoux ; néanmoins, il est à prévoir que leur production réduite se maintiendra encore assez longtemps en raison de l'utilisation courante de ces métaux par la petite industrie.

On soumet les fers et aciers puddlés à des essais à froid et à chaud.

Les essais à froid consistent toujours en essais de traction et, suivant la destination des barres, en essais de ployage sur taraudage, de cintrage, d'aplatissement, de mandrinage, de perçage au poinçon.

Les essais à chaud sont des essais d'emboutissage, de perçage, de rabattement, de soudabilité, de rivetage, etc., effectués en une ou plusieurs chaudes suivant la qualité.

Pour les *fontes*, il convient de se reporter aux indications générales précédemment données au Chap. I^{er} du présent titre en ce qui concerne les moulages, pour le poids et pour l'emplacement des masselottes.

Tableau I. — SPÉCIFICATION DES ACIERS

Classes	Nature des aciers	Emplois principaux (pour mémoire)
1 ^{er}	Aciers } Ordinaires. extra- } Pour chau- doux } dières.	Pièces de forge, emboutis, chaudières, boulons, rivets, éclisses, bandages de roues. Métal soudable et ne trempant que très légèrement. Pièces pour lesquelles on employait autrefois le fer au bois et le fer puddlé.
2 ^e	Aciers doux	Pièces de forge, bandages de roues. Profils et tôles pour les constructions de l'artillerie ; flasques, entretoises, etc.
3 ^e	Aciers demi-doux	Vis de pointage, tiges de piston pour marteau-pilon, pièces de forge exigeant une grande résistance, petits rails, traverses, etc.
4 ^e	Aciers demi-durs	Acier nuances canon. Pièces exigeant une grande dureté et une grande résistance, glissières, tiges de piston, arbres de transmission, etc. Ressorts doux, essieux (<i>en général, pour toutes pièces de machines supportant des efforts dynamiques</i>).
5 ^e	Aciers durs	Pièces exigeant une très grande dureté, glissières, etc. Ressorts, marteaux.
6 ^e	Aciers extra-durs	Métal d'une très grande dureté. Matrices, mandrins, outils de forgeron, chasses, bouterolles, etc. Outils.

Tableau II. — CONDITIONS DES ESSAIS DE TRACTION

Nature des aciers des six classes	Barrettes non trempées						Barrettes trempées							
	Aciers en barres; pièces en acier; tôles et profils de plus de 15 mm. d'épaisseur et au-dessous 15 mm. d'épaisseur.			Tôles et profils de 15 mm. d'épaisseur et au-dessous			Aciers en barres; pièces en acier; tôles et profils de plus de 15 mm. d'épaisseur et au-dessous 15 mm. d'épaisseur.			Tôles et profils de 15 mm. d'épaisseur et au-dessous				
Extra- deux	Résistance à la rupture par mm ² (en kilog.)	29	27	35	24	48 au max ^m	Δ 0/0 moyen	Minimum de l'allongement dans les épreuves individuelles	50 au max ^m	Δ 0/0 moyen	Minimum de l'allongement dans les épreuves individuelles	47 au max ^m	Δ 0/0 moyen	Minimum de l'allongement dans les épreuves individuelles
		34		à 45										
Doux	Résistance à la rupture par mm ² (en kilog.)	25	30	34	21	42	21	26	47 au max ^m	21	50	48	65	50 à 60
		à 48		à 40		à 50		18			à 60			à 65

Demi-doux.	46 à 55	22	20	48 à 58	19	16	60 à 80	"	"	60 à 80	"	"
Demi-durs.	55 à 65	18	16	58 à 68	15	12	80 à 105	"	"	80 à 105	"	"
Durs.	65 à 75	13	10	65 à 75	9	7	105 à 130	"	"	105 à 130	"	"
Extra-durs.	Plus de 75	6	4	Plus de 75	"	"	Plus de 115	"	"	"	"	"

NOTA. — a) Les barreaux d'épreuve sont cylindriques et ont un diamètre de 13^{mm},8 et une longueur de 100 mm. entre repères; on peut aussi, le cas échéant, employer des barreaux ayant un diamètre de 9^{mm},8 et une longueur de 70 mm. entre repères.

b) Les barreaux pour tôles ont des longueurs comprises entre 89 mm. et 158 mm. pour des épaisseurs de tôles variant entre 3 mm. et 15 mm.; leurs largeurs sont de 40, 30 et 25, et elles vont en diminuant avec les longueurs des barreaux.

Tableau III. — CONDITIONS DES ESSAIS DE PLIAGE
ET DE CHOC

Nature des aciers des six classes	Essais de pliage	Essais au choc (sur barreaux d'épreuve ayant 200 mm. de longueur et une section carrée de 30 mm. de côté)
Extra-doux	A bloc	Les barreaux trempés doivent supporter sans se rompre 15 coups de mouton (10 coups pour les barreaux soudés d'acier extra-doux soudable).
Doux	A bloc pour 8 mm. d'épaisseur et au-dessous. Rayon égal à l'épaisseur pour plus de 8 mm. d'épaisseur. Les extrémités de la barrette étant parallèles.	Les barreaux trempés doivent supporter sans se rompre 45 coups de mouton (8 coups pour les barreaux soudés d'acier doux soudable).
Demi-doux	Rayon intérieur égal à une fois et demie l'épaisseur Angle de pliage : 60°.	Les barreaux trempés doivent supporter sans se rompre 15 coups de mouton.
Demi-durs	Rayon intérieur égal à une ou deux fois l'épaisseur. Angle de pliage : 60°.	Idem
Durs	//	Les barreaux non trempés doivent supporter sans se rompre 15 coups de mouton.
Extra-durs	//	//
<p>NOTA. — Pour les essais de pliage, l'épaisseur de la barrette est celle de la tôle ou du profilé. Dans le cas des aciers en barres de 20 mm. d'épaisseur et au-dessous, cette épaisseur est conservée; pour une épaisseur supérieure, on ramène à 20 mm. par un étirage l'épaisseur du bout de la barre qui doit fournir la barrette d'essai. La longueur des barrettes de pliage est, en général, de 250 mm., et leur largeur de 40 mm.</p>		

La fonte employée provient le plus souvent d'un appareil de deuxième fusion qui pourra être le cubilot, le four à réverbère ou le creuset ; mais il convient d'ajouter que, pour certaines fabrications, les industriels ont une tendance de plus en plus marquée à utiliser la fonte de première fusion obtenue directement au haut-fourneau, surtout lorsque la marche de cet appareil est très régulière et que son lit de fusion présente une composition à peu près constante.

Les barreaux d'épreuve ne sont pas prélevés, en général, sur la pièce de fonderie, mais ils sont coulés debout dans un moule en sable étuvé ayant une masselotte appropriée en utilisant une petite quantité de la fonte employée pour les moulages de la fourniture.

Ces barreaux sont soumis à des épreuves de choc et de flexion.

Les épreuves de traction ne sont pratiquées que sur des fontes de premier choix ; la charge de rupture ne devant pas être inférieure à environ 18 kilogrammes par millimètre carré de la section primitive du barreau.

CHAPITRE III

ESSAIS MÉCANIQUES USUELS DES MÉTAUX AUTRES QUE LES MÉTAUX FERREUX

Nous examinerons les essais pratiqués sur les principaux métaux et alliages d'un emploi courant dans les constructions mécaniques.

1. Cuivre. — Ce qui distingue, au premier abord, les cahiers des charges relatifs aux fournitures de cuivre de ceux qui concernent les métaux dérivés du fer, c'est qu'ils font intervenir toujours la pureté chimique du métal employé et qu'ils réglementent souvent, dans une certaine mesure, les procédés de fabrication en mentionnant le droit, pour le consommateur, d'exercer une surveillance dans l'élaboration même de ce métal.

Ces exigences s'expliquent, d'une part, en rai-

son du prix élevé du cuivre et, d'autre part, principalement par ce fait que son état de pureté influe d'une manière très appréciable sur ses propriétés mécaniques.

Nous nous proposons de résumer brièvement ci-après, avant de signaler les épreuves imposées, les opérations effectuées dès la coulée par les services du contrôle de la plupart des administrations.

Ces opérations sont les suivantes :

Analyse des échantillons ;

Examen des lingots et rabotage de la croûte crispée par le retrait que présente leur surface dans la lingotière ;

Recherche, après les diverses passes de laminage à froid, des défauts superficiels et enlèvement de ces défauts au burin ;

Examen à la loupe, suivant le cas, des feuilles de doublage employées pour les constructions navales, etc.

Les essais mécaniques usuels de réception comprennent :

a) Les *essais de traction* pour lesquels on se borne généralement à relever la charge de rupture du barreau évaluée en kilogrammes par millimètre carré de la section primitive et l'allongement total, sans s'attacher à apprécier la

limite élastique dont la détermination est d'ailleurs assez difficile sur le cuivre recuit.

La préparation des éprouvettes exerce une grande influence sur les résultats des essais, en raison de l'écroutissage qui résulte du travail à froid de ce métal.

Il faut détacher par rabotage, soit à la scie, à la meule ou à la fraise, la zone altérée par le découpage préalable, terminer l'opération à la lime et même lisser au besoin les surfaces au moyen de papier de verre fin, puis adoucir les arêtes vives.

La Commission des méthodes d'essais des matériaux de construction a proposé, pour le cuivre comme pour les métaux mous, les mêmes dimensions d'éprouvettes que pour le fer.

Au-dessus de 5 millimètres d'épaisseur, ces dimensions sont définies par la loi de similitude de Barba en partant de la relation $L^2 = 66,67 \cdot S$ dont il a été question au titre premier de ce volume.

b) Les *essais de pliage* sur barrettes de 40 millimètres de largeur et de 150 millimètres de longueur ;

c) Les *essais d'emboutissage* pour les feuilles de cuivre, avec un rayon de calotte de 100 millimètres ;

d) Les *essais de confection de collerettes* et de *pression hydraulique* pour les tubes ;

e) Les *essais de mandrinage* pour le cuivre en barres, en vue d'être renseigné sur la fissilité du métal, c'est-à-dire sur l'aptitude qu'il présente à la propagation des fentes sous l'action du travail.

2. Bronzes. — Pour les bronzes aujourd'hui si nombreux employés dans l'industrie, la première garantie à exiger est celle de la composition.

Nous renvoyons le lecteur au volume de cette Encyclopédie : *Les alliages métalliques*, pour les renseignements concernant les variétés si intéressantes de ces métaux usuels.

Les cahiers des charges imposeront, par suite, les analyses nécessaires en vue de forcer le producteur à fournir le bronze ayant la composition demandée.

Quant aux essais mécaniques, ils seront essentiellement variables suivant les usages des pièces à obtenir.

Presque toujours cependant l'épreuve de traction est effectuée en prélevant les barrettes, soit sur les moulages eux-mêmes quand il s'agit de

pièces de fonderie, soit au centre des barres ou des pièces dans les autres cas.

L'épreuve de traction est complétée par des essais analogues à ceux qui ont été spécifiés pour le cuivre ou par un certain nombre d'essais de fabrication.

Les bronzes qui peuvent supporter le travail à chaud sont soumis à des épreuves de forgeage ou de matriçage.

3. Laiton. — Les propriétés du laiton dépendent, en grande partie, du titre de l'alliage qui le constitue; aussi l'analyse chimique forme-t-elle généralement le principal moyen de contrôle.

Comme pour le cuivre pur, on exige également, pour le laiton en planches, des surfaces absolument nettes et l'on a soin d'enlever, entre les laminages à froid successifs, les pailles et autres défauts qu'un examen minutieux a pu révéler.

L'épreuve de traction, surtout pour les laitons dits de *guerre* employés pour la confection des douilles ou étuis de cartouches, est d'une extrême importance; il convient, comme pour le cuivre, d'apporter un soin tout particulier à la préparation des barreaux ou éprouvettes.

On retrouve, pour les laitons, un certain

nombre des épreuves admises pour la réception des cuivres lorsqu'ils sont destinés aux mêmes fabrications. C'est ainsi qu'on pratique, sur les feuilles de laiton qui doivent fournir des tubes, les essais d'emboutissage et les épreuves hydrauliques dont il a été fait mention précédemment.

En outre, pour presque toutes les applications du laiton, on exige un métal doux supportant la *brasure* et la *soudure tendre*, opérations si souvent effectuées sur ce métal dans ses divers emplois pratiques.

4. Aluminium. — Les différents cahiers des charges ne contiennent encore, en l'état actuel de la métallurgie de l'aluminium et de ses alliages, aucune donnée bien précise au sujet des essais mécaniques auxquels il convient de soumettre ces métaux.

On pratique principalement des essais de traction et, suivant le cas, des essais de conductibilité électrique.

Comme pour les aciers à outils, le consommateur s'estime souvent satisfait par la marque du métal dont il s'agit.

5. Nickel et alliages. -- Le nickel pur est largement entré dans les usages industriels à l'état de feuilles et de fils. Ce métal peut atteindre,

après la trempe, une charge de rupture par traction de 60 à 70 kilogrammes par millimètre carré de la section primitive du barreau avec un allongement de 40 %.

Mais ce sont surtout les alliages de ce métal avec le cuivre ou avec le fer qui sont d'une application vraiment pratique.

Les épreuves mécaniques effectuées sur ces alliages consistent principalement en essais de traction complétés, pour certains d'entre eux, par des essais d'emboutissage.

Les alliages avec le fer sont, en somme, des aciers pour la plupart, et il convient de leur appliquer les considérations déjà faites au sujet de l'admission en recette de ces derniers métaux.

6. Zinc, plomb et étain. — Ces métaux ne sont pas soumis généralement, dans les constructions ordinaires, à des efforts susceptibles d'être déterminés d'une manière précise; aussi les essais de réception qui les concernent sont-ils destinés surtout à apprécier la pureté chimique du métal et ne comportent qu'un petit nombre d'essais mécaniques.

Pour le zinc en feuilles, on impose souvent un enroulage sur mandrin avec ou sans léger chauffage préalable.

Quelquefois on prescrit, en outre, un essai de pliage.

Le plomb employé pour la confection des tuyaux est soumis à une épreuve préalable de pression hydraulique.

Le plomb destiné à être étiré subit un essai spécial d'étirage.

Lorsque ce métal est employé pour les balles de cartouches, on impose une épreuve de densité.

L'étain est soumis souvent à une analyse pour juger de son bon emploi dans l'étamage; mais il est surtout examiné en vue de se rendre compte s'il se prête aux usages spéciaux qu'on a en vue.

CHAPITRE IV

—

ESSAIS COMPLÉMENTAIRES

Nous avons réuni, dans ce dernier chapitre, un certain nombre de méthodes ou de procédés ne figurant pas, le plus généralement, dans les divers cahiers des charges mais qu'il est important de connaître pour juger de l'ensemble des moyens susceptibles d'être mis en œuvre en vue d'apprécier les qualités des métaux.

I. EXAMEN DES CASSURES

La classification des types de cassures a été établie, au début, pour les éprouvettes de traction à section circulaire des aciers.

Depuis lors, il a été remarqué que cette classification pouvait être utilisée, sans modification, pour la dénomination de toutes les cassures des

éprouvettes de fer, acier, acier moulé, fonte, cuivre, bronze, laiton, etc. ; aussi les usines ne font-elles aucune distinction entre les divers métaux pour les types de cassures.

Cette classification a été basée sur le degré de déformation (allongement ou striction) que subit l'éprouvette avant la rupture.

Quand un métal s'allonge beaucoup ou éprouve une forte striction avant de se rompre, la cassure prend la forme A ou B de la classification.

La cassure A est à coupelle ; pour les aciers, les lèvres sont lisses et brillantes, à contours très nets et à fond gris terne.

La cassure B présente les mêmes formes générales que la précédente mais un peu embrouillées.

Si le même métal est moins bien travaillé, l'éprouvette peut n'être pas assez homogène pour avoir les cassures B ou A et alors la cassure C se manifeste avec un allongement et une striction moindres.

La cassure C est plane et normale à l'axe de l'éprouvette ; dans les aciers, un anneau de grains brillants entoure une partie grise et terne.

Si le métal est brûlé au feu ou est sulfureux, on obtient la cassure K ou D.

La cassure D rappelle celle du bois pourri,

elle est caractérisée par des lignes parallèles à l'axe longitudinal de la pièce appelées *travers*.

La cassure K est plane, normale à l'axe ; pour les aciers, elle est à gros grains brillants.

Les cassures G et G', à plusieurs sifflets, indiquent qu'une ou plusieurs pailles ou soufflures ont fait casser l'éprouvette en biseau avant la fin de l'allongement ou de la striction du métal.

On obtient la cassure H lorsqu'une paille en long ou en travers a fait céder l'éprouvette avant la fin de son allongement normal.

La cassure F à sifflet indique un travail irrégulier dans le forgeage favorisant le glissement entre les molécules à l'essai de traction ; pour les aciers, cette cassure est lisse et brillante.

Comme la cassure K, la cassure I est observée dans les éprouvettes d'un métal donnant peu ou pas d'allongement, ainsi que ce cas se présente pour la fonte, l'acier moulé et le bronze durs.

D'une manière générale, la classification de cassures dont il s'agit peut servir à tous les métaux quels qu'ils soient, les cassures A et B caractérisant le cuivre rouge, l'acier, le fer, le laiton et le plomb quand ils ont été bien travaillés.

Tout ce qui précède ne s'applique directement qu'aux éprouvettes de traction à section circu-

laire, aucune classification n'ayant encore été établie pour les éprouvettes à section rectangulaire.

II. MÉTALLOGRAPHIE MICROSCOPIQUE

On peut se proposer d'examiner au microscope, soit des cassures, soit des coupes de métaux ; ces deux procédés se complétant l'un l'autre. Cependant, comme les cassures sont des surfaces de faiblesse et ne se prêtent qu'à l'emploi de faibles grossissements, l'usage des coupes s'est généralisé.

Le mode opératoire de l'analyse micrographique ayant été déjà décrit dans le volume de l'Encyclopédie : *Travail des métaux dérivés du fer*, nous le supposerons connu.

Tout d'abord, les constituants de l'acier notamment varient en proportion et en répartition suivant la dureté des échantillons de ce métal supposés soumis aux mêmes traitements.

Non seulement la structure varie avec la teneur en carbone, mais les différences de structure ne sont pas moindres sous différents états ; ce mot *état* représentant l'ensemble des propriétés mécaniques du métal, telles qu'elles ont été constituées, pendant le travail, sous l'influence

des trois variables indépendantes, la température, le temps et la pression.

En plus de ces données que cherche à déterminer l'analyse micrographique, il est évident que cette opération peut fournir de précieux renseignements sur les défauts accidentels tels que : fissures, petites soufflures, présence de scories, etc.

Quels que soient les merveilleux résultats acquis, il ne saurait être question de faire entrer dès maintenant dans les cahiers des charges, au moins pour les aciers, des stipulations empruntées à l'étude de la microstructure ; il faudrait, pour cela, que la métallographie ait relié ses investigations, *par des essais numériques*, aux essais mécaniques qui déterminent aujourd'hui la valeur des métaux.

C'est là un travail considérable qui n'est pas encore commencé à notre connaissance et qui, en tous cas, ne serait pas près d'aboutir en raison de la grande difficulté du problème, d'une part, et, d'autre part, du nombre tous les jours plus considérable des métaux dérivés du fer, pour ne citer que les plus importants.

Cependant il semble que le problème soit moins ardu, au moins dans certaines de ses parties, pour certains alliages du cuivre.

L'analyse micrographique a permis, en effet, dans certains cas, de déterminer sommairement et rapidement la nature d'un bronze ou d'un alliage industriel par la simple inspection d'une surface polie et dérochée, de reconnaître s'il a été coulé à une température convenable, et, par comparaison, s'il possède les qualités d'homogénéité, d'étanchéité, de résistance et d'allongement voulues.

Mais, on ne saurait trop le répéter, il reste encore fort à faire en vue de rattacher d'une façon précise les faits observés, dans l'analyse micrographique des métaux industriels, à leurs conséquences, en définissant les propriétés mécaniques qui correspondent à une structure déterminée.

III. DÉTERMINATION DE CERTAINES CONSTANTES PHYSIQUES

Au point de vue purement physique, les métaux sont caractérisés par certaines propriétés déterminées, comme la *densité*, la *conductibilité thermique*, et surtout la *conductibilité électrique*, les *dilatations* ou *transformations intimes* qu'ils éprouvent sous l'influence des hautes températures.

Ces propriétés peuvent être représentées elles-mêmes par des valeurs numériques qui varient avec l'état du métal et servent ainsi à le définir ; la détermination précise de ces valeurs constitue, par suite, un moyen d'appréciation particulièrement intéressant des qualités des métaux.

1. Détermination de la densité. — On a recours à cette épreuve pour vérifier la pureté d'un métal toutes les fois qu'il a une densité exceptionnelle, faible ou élevée, fort différente de celle des impuretés qu'on peut y rencontrer.

C'est le cas ordinaire du plomb et ce sera sans doute sous peu celui de l'aluminium.

L'essai de densité se pratique sur *éprouvettes* ou sur *pièces finies*.

Dans l'essai sur éprouvettes, le solide en expérience doit avoir une forme géométrique régulière sans dépressions ni anfractuosités capables de retenir les bulles d'air et de fausser par suite les résultats.

On opère, en général, pour le plomb sur de petits cubes de 30 à 40 grammes, à surfaces lisses et brillantes.

Dans l'essai sur pièces finies, on immerge la pièce en totalité dans le bain, mais on ne peut

éviter l'inconvénient de résultats erronés si la pièce est souffleuse ou si sa surface est très rugueuse.

M. Pourcel a indiqué le moyen d'y remédier en remplaçant la pièce elle-même par un modèle identique coulé en bronze ou en tout autre métal bien sain pour en déterminer le volume. Il suffit alors de calibrer les pièces fabriquées sur le même type pour s'assurer qu'elles sont bien aux dimensions et d'en déterminer le poids par une simple pesée, pour vérifier qu'il n'est pas inférieur à une limite fixée.

La détermination de la densité, soit dans l'essai sur éprouvettes, soit dans l'essai sur pièces finies, s'effectue le plus ordinairement au moyen de la méthode bien connue dite de la balance hydrostatique.

2. Conductibilité thermique. — La conductibilité thermique des métaux paraît être en relation avec leur structure et l'étude de cette propriété physique peut donner d'utiles indications à ce sujet.

Si, par exemple, on met une source de chaleur en contact avec un point d'une plaque métallique dont la surface a été préalablement enduite d'une mince couche de cire, la chaleur

pourra ne pas se transmettre avec la même rapidité dans toutes les directions, et la forme de la courbe, délimitée à chaque instant par la cire fondue, manifestera ainsi les variations de structure du métal autour du point chauffé.

La Commission des méthodes d'essais des matériaux de construction a signalé cette importante question à l'attention des expérimentateurs.

3. Conductibilité électrique. — L'essai de conductibilité électrique présente, évidemment, la plus grande importance pour les métaux, cuivres et bronzes, employés par les électriciens pour les conducteurs de toute nature.

Pour le cuivre, en particulier, la conductibilité se trouve grandement influencée par des traces d'impuretés à peine sensibles à l'analyse chimique; il en résulte, que cette épreuve donnera, pour ce métal, une garantie plus complète de son état de pureté et d'homogénéité.

Il résulte de ce fait, que cet essai peut être très utilement pratiqué, même en dehors des applications purement électriques; on a constaté, en effet, que la différence de conductibilité électrique mesurée sur des échantillons de fils d'acier fondu, identiques en apparence, peut

mettre en évidence des écarts presque insensibles dans la fabrication.

4. Variations d'état des métaux sous l'influence des changements de température. — Enfin, l'étude physique des variations d'état des métaux sous l'influence des changements de température, est un procédé d'investigation particulièrement précieux qui peut fournir en même temps des renseignements intéressants pour la détermination de leurs propriétés mécaniques.

A cette manière d'envisager la question se rattachent les épreuves dont il a été fait mention au cours de la présente étude et qui comprennent celles de *façonnage*, de *pliage* et d'*emboutissage* pratiquées à chaud.

Mais il convient d'ajouter qu'on obtient ainsi, en somme, des résultats du même ordre que ceux des essais mécaniques précédemment considérés et fournissant plutôt d'utiles renseignements que des chiffres précis pour les constantes physiques se rapportant aux variations d'état dont il s'agit.

La véritable étude relative aux variations d'état des métaux a surtout trait à la détermi-

nation des températures critiques par la méthode du refroidissement.

L'application de cette méthode est certainement trop récente pour qu'elle puisse faire l'objet d'une réglementation quelconque et figurer dans les conditions imposées par les cahiers des charges.

Bien qu'à proprement parler, elle ne soit pas encore sortie du domaine des laboratoires, il convenait de la signaler. Nous rappellerons seulement, pour mémoire, les résultats si importants qui en ont été déduits pour les métaux ferreux et quels progrès considérables elle a suscités dans les traitements calorifiques rationnels des aciers.

Nous renvoyons le lecteur désireux de connaître le détail de ce procédé au volume de l'Encyclopédie : *Travail des métaux dérivés du fer*.

Il est cependant permis d'espérer que, malgré les précautions si délicates qu'il est nécessaire de prendre, soit pour la mesure du temps, soit pour celle des températures, la méthode ci-dessus mentionnée sera bientôt appelée à pénétrer dans les usines métallurgiques, à côté des méthodes d'analyse chimique les plus rigoureuses.

CONCLUSION

La présente étude a fait ressortir toute l'importance des essais d'ordre mécanique, chimique et physique auxquels les métaux pouvaient être soumis suivant leur nature et leur emploi ultérieur.

Nous avons dû indiquer seulement les modes d'expérimentation les plus universellement adoptés et qui paraissaient s'imposer dans la plupart des cahiers des charges.

L'analyse des principaux travaux concernant les différents efforts a fait ressortir combien cette question des essais est complexe.

De grands progrès ont été accomplis sous l'impulsion de la Commission des méthodes d'essai des matériaux de construction ; mais il reste encore bien des points à élucider, bien des problèmes à résoudre.

A ces problèmes se rattachent notamment ceux qui ont trait à l'étude générale des défor-

mations qui, dans un avenir sans doute peu éloigné, servira à transformer cette partie de la science de l'Ingénieur qu'on appelle la *résistance des matériaux*.

La tâche est d'autant plus ardue que le nombre des métaux fournis par la métallurgie nouvelle s'accroît de jour en jour.

Mais la voie est largement ouverte et l'on est autorisé à penser, si l'on en juge par les résultats actuellement acquis et par l'extension de plus en plus grande que prennent en ce moment les travaux et les études qui se rapportent à cet important sujet que l'impulsion donnée par la Commission des méthodes d'essais, loin de se ralentir, conduira dans un avenir peu éloigné, à de nouveaux progrès.

BIBLIOGRAPHIE

- MORIN (général). — *Résistance des matériaux* (Paris, Hachette, 3^e édition, 1862).
- PONCELET (général). — *Introduction à la mécanique industrielle, physique ou expérimentale* (Paris, Gauthier-Villars, 3^e édition, 1880).
- CALLON. — *Cours de machines professé à l'École des mines* (Paris, Dunod, 1877).
- BARBA. — *Expériences à la traction* (Bulletin de la Société des Ingénieurs civils, 1880).
- MADAMET. — *Résistance des matériaux* (Paris, Gauthier-Villars, 1871).
- UNWIN. — *Éléments de construction des machines* (Paris, Gauthier-Villars, 1882).
- DUGUET (capitaine). — *Limite d'élasticité et de résistance à la rupture* (Paris, Gauthier-Villars, 1882).
- CONSIDÈRE. — *Mémoire sur l'emploi du fer et de l'acier dans les constructions* (Annales des Ponts et Chaussées, Paris, Dunod, 1885).
- MINISTÈRE DES TRAVAUX PUBLICS. — *Commission des méthodes d'essai des matériaux de construction* (Paris, Imprimerie nationale, J. Rothschild et Dunod, 49, quai des Grands-Augustins, éditeurs, 1895 et 1900).

PREMIÈRE SESSION (1895)

TOME I. — *Documents généraux.*

Première partie. — Essais physiques,

Deuxième partie. — Essais chimiques,

Troisième partie. — Essais mécaniques,

Quatrième partie. — Étude détaillée des diverses méthodes d'essais mécaniques.

TOMES II et III. — *Rapports particuliers* (1895).

MÉMOIRES A CONSULTER (TOME II) :

Relevé des conditions d'essai (fers et aciers) par M. Barba;

Sur les essais des métaux autres que le fer, par M. L. Baclé;

Sur les méthodes d'essai des fontes, par M. Durant;

Sur l'influence de la température sur les propriétés mécaniques des métaux et de la durée des essais sur les résultats obtenus, par M. A. Le Chatelier;

Sur la métallographie microscopique, par M. F. Osmond;

Sur l'élasticité, par M. H. Lebasteur.

Sur la métallographie microscopique des alliages de cuivre, par M. G. Guillemin.

Etc., etc.

MÉMOIRES A CONSULTER (TOME III) :

Sur les essais de traction, par MM. Barba et Duplaix;

Sur les méthodes d'essai des métaux à la flexion, par M. Durant;

Sur la résistance des métaux à la torsion, par M. E. Polonceau;

Sur les épreuves hydrauliques, par MM. A. Michel Lévy et C. Walckenaër;

Sur les essais par le choc, par M. Clérault;

Sur la mesure de la dureté des métaux, par M. le lieutenant-colonel Martel;

Etc., etc.

DEUXIÈME SESSION (1900)

TOME II. — *Rapports particuliers.*

MÉMOIRES A CONSULTER :

Sur l'élasticité, par M. le commandant Hartmann ;

Influence de la rapidité des essais de rupture des métaux à la traction sur leurs résultats, par M. Ledoux ;

Étude du poinçonnage envisagé comme méthode d'essai, par M. L. Baclé ;

Essai au choc de barreaux entaillés, par M. Barba ;

Fragilité des aciers, par M. Godron ;

Etc., etc.

GOUILLY (ALEXANDRE). — *Éléments et organes des machines* (Paris, Gauthier-Villars, 1894).

REVUE D'ARTILLERIE. — *Distribution des déformations dans les métaux soumis à des efforts*, par M. le C^t Hartmann, t. 45, 46, 47 et 48.

HIRSCH (J.). — *Résumé du cours des machines à vapeur et locomotives* (Paris, Gauthier-Villars, 1898).

DENFER (J.). — *Charpenterie métallique* (Paris, Gauthier-Villars, 1894).

FRÉMONT, LE CHATELIER (H.). — *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'Industrie nationale* (années 1899, 1900, 1901, 1902 et 1903. Paris, 44, rue de Rennes).

TABLE DES MATIÈRES

THÉORIE ET PRATIQUE DES ESSAIS

TITRE PREMIER

THÉORIE DES ESSAIS

CHAPITRE PREMIER

Étude générale du phénomène de traction

	Pages
I. Notions préliminaires	9
Période dite élastique	10
Période de déformation.	11
Striction	13
Courbe de traction	15
II. Loi de similitude de Barba	20
Mesure des deux allongements permanents.	20
L'allongement pour cent avant striction est constant pour un même métal quelles que soient les dimensions en longueur et en diamètre des barreaux d'épreuve	24
Les allongements pour cent après rupture de deux éprouvettes sont égaux lorsque les éprouvettes sont géométriquement semblables	26
La loi de similitude et la forme des sections	28
Application de la loi de similitude	29
Sur la rigueur de la loi de similitude	34

	Pages
III. Élasticité de traction	36
Cas d'une éprouvette soumise à un effort supérieur à la limite élastique	37
Mesure du travail de déformation	43
Limite d'élasticité et limite des allongements proportionnels	51
IV. Influence de la température sur les résultats fournis par l'essai de traction	54
Températures supérieures à 100°	55
Températures inférieures à 100°	61
Influence des variations de la température atmosphérique	64
V. Influence de la durée sur les résultats des essais des métaux	65

CHAPITRE II

Répétition des efforts

I. Expériences de Wöhler et de Spangenberg	70
II. Expériences de Bauschinger	72
III. Détermination de la charge réduite de rup- ture.	75

CHAPITRE III

*Expériences relatives à la distribution
des déformations dans les métaux soumis à des efforts*

I. Distribution des déformations suivant les efforts exercés	83
Traction et compression.	84
Flexion.	90
Emboutissage et poinçonnage.	96
Mandrinage et torsion	99

TABLE DES MATIÈRES

167

	Pages
II. Conséquences des expériences au point de vue des propriétés élastiques de la matière . . .	102
Augmentation de la limite élastique . . .	103
Retour à l'état initial du corps	105
Succession des différents efforts	107

TITRE II

PRATIQUE DES ESSAIS

CHAPITRE PREMIER

Essais d'usines

I. Essais en cours d'élaboration du métal . . .	114
II. Garanties prises au sujet des lingots et des moulages	116
Cas des lingots	117
Cas des moulages	121

CHAPITRE II

Essais mécaniques proprement dits de réception des métaux de la famille du fer

I. Aciers	124
Tableau I. — Spécification des aciers.	133
Tableau II. — Conditions des essais de traction.	134
Tableau III. — Conditions des essais de pliage et de choc.	136
II. Fers et fontes.	132

CHAPITRE III

*Essais mécaniques usuels des métaux
autres que les métaux ferreux*

	Pages
Cuivre	139
Bronzes	142
Laiton	143
Aluminium	144
Nickel et alliages	144
Zinc, plomb, étain	145

CHAPITRE IV

Essais complémentaires

I. Examen des cassures	147
II. Métallographie microscopique	150
III. Détermination de certaines constantes physiques	152
Détermination de la densité	153
Conductibilité thermique	154
Conductibilité électrique	155
Variations d'état des métaux sous l'influence des changements de température.	156
CONCLUSION	159
BIBLIOGRAPHIE	161

LIBRAIRIE GAUTHIER-VILLARS
55, QUAI DES GRANDS-AUGUSTINS, A PARIS (6°).

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

TRAITÉ DE MÉCANIQUE RATIONNELLE

Par **Paul APPELL**,

Membre de l'Institut.

- TOME I. — *Statique. Dynamique du point*, avec 178 figures; 2^e édition entièrement refondue: 1902..... **18 fr.**
TOME II. — *Dynamique des systèmes. Mécanique analytique*, avec figures. 2^e édition; 1903..... (Sous presse.)
TOME III. — *Equilibre et mouvement des milieux continus*, avec 70 figures; 1903..... **17 fr.**

LEÇONS

DE

MÉCANIQUE ÉLÉMENTAIRE

A L'USAGE DES ÉLÈVES DES CLASSES DE PREMIÈRE
(LATIN-SCIENCES OU SCIENCES-LANGUES VIVANTES)

Conformément aux programmes du 31 mai 1902.

PAR

P. APPELL,
Membre de l'Institut,
Professeur à la Faculté des Sciences.

J. CHAPPUIS,
Docteur ès Sciences,
Professeur à l'École Centrale.

Volume in-18 jésus avec figures; 1902..... **2 fr. 75 c.**

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

LEÇONS SUR L'ÉLECTRICITÉ

PROFESSÉES A L'INSTITUT ÉLECTROTECHNIQUE MONTEFIORE
annexé à l'Université de Liège,

Par **Eric GERARD**,

Directeur de cet Institut.

6^e ÉDITION, DEUX VOLUMES GRAND IN-8, SE VENDANT SÉPARÉMENT.

TOME I : *Théorie de l'Électricité et du Magnétisme. Électrométrie. Théorie et construction des générateurs et des transformateurs électriques*; avec 388 figures; 1900..... 12 fr.

TOME II : *Canalisation et distribution de l'énergie électrique. Applications de l'Électricité à la téléphonie, à la télégraphie, à la production et à la transmission de la puissance motrice, à la traction, à l'éclairage, à la métallurgie et à la chimie industrielle*; avec 387 figures; 1900..... 12 fr.

TRACTION ÉLECTRIQUE,

Par **Eric GERARD**.

(Extrait des *Leçons sur l'Électricité* du même Auteur.)

Volume grand in-8 de vi-136 pages, avec 92 figures; 1900..... 3 fr. 50 c.

MESURES ÉLECTRIQUES,

Par **Eric GERARD**.

2^e édition, gr. in-8 de 532 p., avec 217 fig.; 1901. Cartonné toile anglaise.... 12 fr.

LE FROMENT ET SA MOUTURE

TRAITÉ DE MEUNERIE D'APRÈS UN MANUSCRIT INACHEVÉ

De **Aimé GIRARD**,

Membre de l'Institut,

Professeur au Conservatoire des Arts et Métiers et à l'Institut national agronomique,

Par **L. LINDET**,

Docteur ès Sciences, Professeur à l'Institut national agronomique.

Un beau volume grand in-8, avec 85 figures et 3 planches; 1903..... 12 fr.

LIBRAIRIE GAUTHIER-VILLARS

COURS D'ANALYSE

PROFESSÉ A L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE

Par **G. HUMBERT**,

Membre de l'Institut, Professeur à l'École Polytechnique.

TOME I : *Calcul différentiel. Principes du calcul intégral. Applications géométriques.* Avec 111 figures; 1903. 16 fr.
TOME II. (Sous presse.)

COURS D'ANALYSE INFINITÉSIMALE

Par **Ch.-J. de la VALLÉE-POUSSIN**,

Professeur à l'Université de Louvain.

Un volume grand in-8 de xiv-372 pages; 1903. 12 fr.

LEÇONS

SUR LA THÉORIE DES FONCTIONS

Par **Émile BOREL**,

Maître de Conférences à l'École Normale supérieure.

Exposé de la théorie des ensembles et applications; 1898. 3 fr. 50 c.
Leçons sur les fonctions entières; 1900. 3 fr. 50 c.
Leçons sur les séries divergentes; 1901. 4 fr. 50 c.
Leçons sur les séries à termes positifs; 1902. 3 fr. 50 c.
Leçons sur les fonctions méromorphes; 1903. 3 fr. 50 c.
Leçons sur les séries de polynomes. (Sous presse.)

COURS D'ANALYSE MATHÉMATIQUE

Par **E. GOURSAT**,

Professeur à la Faculté des Sciences de Paris.

TOME I : *Dérivées et différentielles. Intégrales définies. Développements en séries. Applications géométriques.* Grand in-8; 1902. 20 fr.
TOME II. (Sous presse.)

LIBRAIRIE GAUTHIER-VILLARS

ÉLÉMENTS DE LA THÉORIE
DES
FONCTIONS ELLIPTIQUES

PAR
Jules TANNERY et Jules MOLK.

TOME I : Introduction. Calcul différentiel (I^e Partie); 1893..... 7 fr. 50 c.
TOME II : Calcul différentiel (II^e Partie); 1896..... 9 fr. »
TOME III : Calcul intégral (I^e Partie); 1898..... 8 fr. 50 c.
TOME IV : Calcul intégral (II^e Partie) et Applications; 1902..... 9 fr. »

TRAITÉ ÉLÉMENTAIRE
DE
GÉOMÉTRIE A QUATRE DIMENSIONS

INTRODUCTION A LA GÉOMÉTRIE A n DIMENSIONS

Par E. JOUFFRET,

Lieutenant-Colonel d'Artillerie en retraite,
Membre de la Société mathématique de France.

GRAND IN-8 DE XXIX-213 P., AVEC 63 FIGURES; 1903. 7 FR. 50 C.

TRAITÉ D'ÉLECTROMÉTALLURGIE

Théorie de l'électrolyse. Galvanoplastie. Procédés. Tubes. Tôles. Fils galvanoplastiques.

Affinage. Traitement des minerais. Fusion. Soudure. Triage.

Par H. PONTIÈRE,

Professeur de Métallurgie et d'Électricité industrielle à l'Université
de Louvain, Directeur de l'Institut électromécanique.

Troisième Édition.

GRAND IN-8, AVEC 71 FIG. ET 1 PL. EN 4 COULEURS; 1903.. 15 FR.

TRAITÉ DE CHIMIE PHYSIQUE
LES PRINCIPES

Par Jean PERRIN

Chargé du Cours de Chimie physique à la Faculté des Sciences de Paris.

VOLUME GRAND IN-8 DE XXVI-300 P., AVEC 38 FIG., 1903. 10 FR.

RELIÉ (cuir souple)..... 13 FR.

LIBRAIRIE GAUTHIER-VILLARS

Cours de Physique mathématique de la Faculté des Sciences.

TRAITÉ 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*. Volume de xxvii-333 pages avec 14 figures; 1901 10 fr.

TOME II : *Refroidissement et échauffement par rayonnement. Conductibilité des tiges, lames et masses cristallines. Courants de convection. Théorie mécanique de la lumière*. Volume de xxxii-625 pages; 1903. 18 fr.

INSTRUCTIONS MÉTÉOROLOGIQUES

Par **Alfred ANGOT**,

Météorologiste titulaire au Bureau central Météorologique,

Professeur à l'Institut national agronomique

QUATRIÈME ÉDITION, ENTIÈREMENT REFONDUE.

GRAND IN-8 DE VI-163 PAGES, AVEC 29 FIGURES ET PLANCHES; SUIVI DE
TABLES POUR LA RÉDUCTION DES OBSERVATIONS; 1903. 4 FR. 50 c.

MANUEL ÉLÉMENTAIRE PRATIQUE

DES

MESURES ÉLECTRIQUES

SUR LES CABLES SOUS-MARINS,

PAR

H.-K.-G. FISHER et **J.-C.-H. DARBY**.

TRADUIT DE L'ANGLAIS SUR LA DEUXIÈME ÉDITION,

Par **Léon HUSSON**.

VOLUME IN-8 DE IV-174 PAGES, AVEC 67 FIGURES; 1903.... 5 FR.

LIBRAIRIE GAUTHIER-VILLARS

DE L'EXPÉRIENCE EN GÉOMÉTRIE

Par C. de FREYCINÉT,
de l'Institut.

VOLUME IN-8 DE XX-175 PAGES; 1903. 4 FR

TECHNOLOGIE MÉCANIQUE MÉTALLURGIQUE

Par A. LEDEBUR,
Professeur à l'Académie des Mines de Freiberg (Saxe).

TRADUIT SUR LA 2^e ÉDITION ALLEMANDE,

Par G. HUMBERT, Ingénieur des Ponts et Chaussées

Avec un Appendice sur la Sécurité des ouvriers dans le travail par J. JOLY.

GRAND IN-8 DE VI-740 PAGES, AVEC 729 FIGURES; 1903. 25 FR.

GUSTAVE ROBIN,
Chargé du Cours à la Faculté des Sciences de Paris.

ŒUVRES SCIENTIFIQUES

réunies et publiées sous les auspices du Ministère de l'Instruction publique,

Par Louis RAFFY,
Professeur adjoint à la Faculté des Sciences de Paris.

TROIS VOLUMES GRAND IN-8 (25 x 16), AVEC FIGURES, SE VENDANT SÉPARÉMENT.

MATHÉMATIQUES : *Théorie nouvelle des fonctions exclusivement fondée sur l'idée de nombre*. Un volume grand in-8; 1903 7 fr.

PHYSIQUE : Un volume grand in-8, en deux fascicules :

Physique mathématique (Distribution de l'Électricité, Hydrodynamique, Fragments divers). Un fascicule grand in-8 avec 4 figures; 1899.. 5 fr.

Thermodynamique générale (Équilibre et modifications de la matière).

Un fascicule grand in-8 avec 30 figures; 1901..... 9 fr.

CHIMIE : *Leçons de Chimie physique*, professées à la Faculté des Sciences de Paris. Un volume in-8 (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 : *Électrodynamique. Magnétisme. Induction. Mesures électromagnétiques*, avec 221 figures; 1903..... 18 fr.

TOME III : *Électrolyse. Capillarité*..... (Sous presse.)

LIBRAIRIE GAUTHIER-VILLARS

L'ALUMINIUM

SES PROPRIÉTÉS, SES APPLICATIONS.

HISTORIQUE. MINÉRAIS. FABRICATION. PROPRIÉTÉS.
APPLICATIONS GÉNÉRALES.

Par **P. MOISSONNIER**,

Pharmacien principal de l'Armée,
Chef des Laboratoires de l'Usine de Billancourt et du service de l'Intendance
du Gouvernement militaire de Paris,
Ex-secrétaire de la Commission de l'aluminium au Ministère de la Guerre.

VOLUME GRAND IN-8 DE XX-220 PAGES, AVEC 21 FIGURES ET UN TITRE
TIRÉ SUR ALUMINIUM; 1903. 7 FR. 50 C.

L'ACÉTYLÈNE

THÉORIE, APPLICATIONS

Par **Marie-Auguste MOREL**,

Ingénieur, Ancien Élève de l'École des Ponts et Chaussées,
Directeur des Usines à ciment de Lumbres.

GRAND IN-8 DE XII-172 PAGES AVEC 7 FIGURES; 1903. 5 FR.

INDUSTRIES CHIMIQUES ET PHARMACEUTIQUES

Par **Albin HALLER**,

Membre de l'Institut, Professeur à la Faculté des Sciences de Paris,
Rapporteur du Jury de la classe 87 à l'Exposition universelle de 1900.

DEUX VOLUMES GRAND IN-8, AVEC 108 FIG.; 1902; ENSEMBLE. 20 FR.

LIBRAIRIE GAUTHIER-VILLARS

COURS DE PHYSIQUE

DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,

Par J. JAMIN et E. BOUTY.

Quatre tomes in-8, de plus de 4000 pages, avec 1587 figures et 14 planches; 1885-1891. (OUVRAGE COMPLET)..... 72 fr.

TOME I. — 9 fr.

- 1^{er} fascicule. — *Instruments de mesure. Hydrostatique*; avec 150 figures et 1 planche..... 5 fr.
2^e fascicule. — *Physique moléculaire*; avec 93 figures..... 4 fr.

TOME II. — CHALEUR. — 15 fr.

- 1^{er} fascicule. — *Thermométrie, Dilatations*; avec 98 figures. 5 fr.
2^e fascicule. — *Calorimétrie*; avec 48 fig. et 2 planches..... 5 fr.
3^e fascicule. — *Thermodynamique. Propagation de la chaleur*; avec 47 figures..... 5 fr.

TOME III. — ACOUSTIQUE; OPTIQUE. — 22 fr.

- 1^{er} fascicule. — *Acoustique*; avec 123 figures..... 4 fr.
2^e fascicule. — *Optique géométrique*; 139 fig. et 3 planches. 4 fr.
3^e fascicule. — *Étude des radiations lumineuses, chimiques et calorifiques; Optique physique*; avec 249 fig. et 5 planches, dont 2 planches de spectres en couleur..... 14 fr.

TOME IV (1^{re} Partie). — ÉLECTRICITÉ STATIQUE ET DYNAMIQUE. — 13 fr.

- 1^{er} fascicule. — *Gravitation universelle. Électricité statique*; avec 155 figures et 1 planche..... 7 fr.
2^e fascicule. — *La pile. Phénomènes électrothermiques et électrochimiques*; avec 161 figures et 1 planche..... 6 fr.

TOME IV (2^e Partie). — MAGNÉTISME; APPLICATIONS. — 13 fr.

- 3^e fascicule. — *Les aimants. Magnétisme. Électromagnétisme. Induction*; avec 240 figures..... 8 fr.
4^e fascicule. — *Météorologie électrique; applications de l'électricité. Théories générales*; avec 84 figures et 1 planche..... 5 fr.

TABLES GÉNÉRALES des quatre volumes. In-8; 1891..... 60 c.

Des suppléments destinés à exposer les progrès accomplis viennent compléter ce grand Traité et le maintenir au courant des derniers travaux.

- 1^{er} SUPPLÉMENT. — *Chaleur. Acoustique. Optique*, par E. BOUTY, Professeur à la Faculté des Sciences. In-8, avec 41 fig.; 1896. 3 fr. 50 c.
2^e SUPPLÉMENT. — *Électricité. Ondes hertziennes. Rayons X*; par E. BOUTY. In-8, avec 48 figures et 2 planches; 1899. 3 fr. 50 c.

LIBRAIRIE GAUTHIER-VILLARS

ENCYCLOPÉDIE DES TRAVAUX PUBLICS ET ENCYCLOPÉDIE INDUSTRIELLE.

TRAITÉ DES MACHINES A VAPEUR

CONFORME AU PROGRAMME DU COURS DE L'ÉCOLE CENTRALE (E. I.)

Par **ALHEILIG** et **C. ROCHE**, Ingénieurs de la Marine.

TOME I (412 fig.); 1895 20 fr. | TOME II (281 fig.); 1895..... 18 fr.

CHEMINS DE FER

MATÉRIEL ROULANT. RÉSISTANCE DES TRAINS. TRACTION.

PAR

E. DEHARME,

A. PULIN,

Ing^r principal à la Compagnie du Midi. | Ing^r Insp^r p^{al} aux chemins de fer du Nord.

Un volume grand in-8, xxii-441 pages, 95 figures, 1 planche; 1895 (E. I.). 15 fr.

CHEMINS DE FER.

ÉTUDE DE LA LOCOMOTIVE. — LA CHAUDIÈRE.

PAR

E. DEHARME.

A. PULIN.

Un volume grand in-8 de vi-608 p. avec 131 fig. et 2 pl.; 1900 (E. I.). 15 fr.

CHEMINS DE FER D'INTÉRÊT LOCAL TRAMWAYS

Par **Pierre GUÉDON**, Ingénieur.

Un beau volume grand in-8, de 393 pages et 141 figures (E. I.); 1904..... 11 fr.

LA BETTERAVE AGRICOLE ET INDUSTRIELLE

Par **L. GESCHWIND** et **E. SELLIER**, Chimistes.

Grand in-8 de iv-668 pages avec 130 figures; 1902 (E. I.)..... 20 fr.

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 **G. 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 307 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. HAHN, 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 755 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^e 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, CLIMATS, SOLS, ETC., SUR LE VIN, VINIFICATION,
CUVERIE, CHAIS, VIN APRES 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**, Prof^r à la Faculté de Bordeaux,

TOME I: 688 p., avec fig.; 1896. 20 fr. | TOME II: 718 p., avec fig. 1896. 15 fr.

MANUEL DE DROIT ADMINISTRATIF

Par **G. LECHALAS**, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées.

TOME I; 1889; 20 fr. — TOME II: 1^{re} partie; 1893; 10 fr. 2^e partie; 1898; 10 fr.

MACHINES FRIGORIFIQUES

PRODUCTION ET APPLICATIONS DU FROID ARTIFICIEL,

Par **H. LORENZ**, Professeur à l'Université de Halle.

TRADUIT DE L'ALLEMAND PAR **P. PETIT**, et **J. JAQUET**.

Grand in-8 de IX-186 pages, avec 131 figures; 1898 (E. I.)... 7 fr.

COURS DE CHEMINS DE FER

(ÉCOLE SUPÉRIEURE DES MINES),

Par **E. VICAIRE**, Inspecteur général des Mines,

révisé et terminé par **F. MAISON**, Ingénieur des Mines.

Gr. in-8 de 581 pages avec nombreuses fig.; 1903 (E. I.)... 20 fr.

COURS DE GÉOMÉTRIE DESCRIPTIVE

ET DE GÉOMÉTRIE INFINITÉSIMALE,

Par **Maurice D'OCAGNE**,

Ing^r et Prof^r 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

ASSOCIATIONS OUVRIÈRES ET PATRONALES

Par P. HUBERT-VALLEROUX, Docteur en Droit.

GRAND IN-8 DE 361 PAGES; 1899 (E. I.)..... 10 FR.

FOURS A GAZ A CHALEUR RÉGÉNÉRÉE

Par F. TOLDT, Ingén. Traduit par F. DOMMER, Ingén. des Arts et Manufres.

Un volume grand in-8 de 392 pages, avec 68 figures; 1900 (E. I.). 11 fr.

ANALYSE INFINITÉSIMALE

A L'USAGE DES INGÉNIEURS (E.T.P.)

Par E. ROUCHÉ et L. LÉVY,

TOME I : *Calcul différentiel*. VIII-557 pages, avec 45 figures; 1900..... 15 fr.

TOME II : *Calcul intégral*. 829 pages, avec 50 figures; 1903..... 15 fr.

COURS D'ÉCONOMIE POLITIQUE

PROFESSÉ A L'ÉCOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSÉES (E.T.P.),

Par C. COLSON, Conseiller d'État.

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.)

LA TANNERIE

Par L. MEUNIER et C. VANEY,

Professeurs à l'École française de Tannerie

et publié sous la direction de LÉO VIGNON,

Directeur de l'École française de Tannerie.

GRAND IN-8 DE 630 PAGES AVEC 98 FIGURES; 1903 (E. I.). 20 FR.

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.

A B C DE LA PHOTOGRAPHIE MODERNE,

Par W.-K. BURTON.

5^e édition. Traduction sur la 12^e édition anglaise. par G. HUBERSON.

In-18 jésus, avec figures; 1901..... 3 fr.

**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.

LE MUSÉE RÉTROSPECTIF DE LA PHOTOGRAPHIE

A L'EXPOSITION UNIVERSELLE DE 1900,

Par A. DAVANNE, M. BUCQUET et L. VIDAL.

Grand in-8 avec nombreuses figures et 11 planches; 1903..... 5 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^{er} Supplément (A). Un beau vol. gr. in-8 de 400 p. avec 176 fig.; 1892. 14 fr.

2^e Supplément (B). Un beau vol. gr. in-8 de 424 p. avec 221 fig.; 1897. 14 fr.

3^e Supplément (C). Un beau vol. gr. in-8 de 400 pages; 1903..... 14 fr.

Les 7 volumes se vendent ensemble..... 84 fr.

LA PHOTOGRAPHIE SOUTERRAINE

Par E. MARTEL.

In-18 jésus avec 16 planches; 1903..... 2 fr. 50 c.

PRÉPARATION DES PLAQUES AU GÉLATINOBROMURE,

PAR L'AMATEUR LUI-MÊME.

Par RIS-PAQUOT.

In-16 raisin, avec figures; 1903..... 2 fr.

MANUEL DU PHOTOGRAPHE AMATEUR,

Par F. PANAJOU,

Chef du Service photographique à la Faculté de Médecine
de Bordeaux.

3^e 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; 1902..... 4 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.

TRAITÉ PRATIQUE DE PHOTOCHROMIE

Par Léon VIDAL.

In-18 jésus avec 95 figures et 14 planches; 1903..... 7 fr. 50 c.

33958. — Paris, Imp. Gauthier-Villars, 55, quai des Grands-Augustins.

MASSON & C^{IE}, ÉDITEURS

LIBRAIRES DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE

120, boulevard Saint-Germain, Paris (6^o)

~~~~~ *Collection Léauté*  
P. n<sup>o</sup> 364.

EXTRAIT DU CATALOGUE (1)

(Décembre 1903)

*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, BRAULT, BROCCQ, DE BRUN, DU CASTEL, CASTEX, COURTOIS-SUFFIT  
J. DARIER, DEHU, DOMINICI, W. DUBREUILH, HUDELO, L. JACQUET, JEANSELME  
J.-B. LAFFITTE, LENGLET, LEREDDE, MERKLEN, PERRIN, RAYNAUD  
RIST, SABOURAUD, MARCEL SÉE, GEORGES THIBIERGE, TREMOLIÈRES, VEYRIÈRES

*4 forts volumes richement cartonnés toile, très largement illustrés de  
figures en noir et de planches en couleurs. . . . . 150 fr.*

TOME I. 1 fort vol. grand in-8<sup>o</sup> avec 230 figures en noir et 24 planches  
en couleurs. — Anatomie et Physiologie de la Peau; Pathologie  
générale de la Peau; Symptomatologie générale des Dermatoses.  
(Acanthosis Nigricans à Écthyma) . . . . . 36 fr.

TOME II. 1 fort vol. grand in-8<sup>o</sup> avec 168 figures en noir et 21 planches  
en couleurs (Eczéma à Langue). . . . . 40 fr.

TOME III. 1 fort vol. grand in-8<sup>o</sup> avec 201 figures en noir et 19 planches  
en couleurs (Lèpre à Pytiriasis) . . . . . 40 fr.

TOME IV. 1 fort vol. grand in-8<sup>o</sup>, avec 213 figures en noir et 25 planches  
en couleurs (Poils à Zona). . . . . 40 fr.

(1) La librairie envoie gratuitement et franco de port les catalogues suivants à toutes  
es personnes qui lui en font la demande : — Catalogue général. — Catalogues  
de l'Encyclopédie scientifique des Aide-Mémoire : I. Section de l'ingé-  
nieur. II. Section du biologiste. — Catalogue des ouvrages d'enseignement.

OUVRAGE COMPLET

# 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

**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. — QUÉNU. Maladies des veines. — RICARD et DEMOULIN. Lésions traumatiques des os. — PONCET. Affections non traumatiques des os.

**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. — GÉRARD MARCHANT. Nez, 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, glandes 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** 5 vol. grand in-8°. *En souscription : 150 fr.*  
*Chaque volume est illustré de nombreuses figures*  
*en noir et en couleurs.*

# **d'Anatomie humaine**

PUBLIÉ SOUS LA DIRECTION DE

**P. POIRIER**

Professeur d'anatomie  
 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 — Druault — P. Fredet — Glantenay — Gosset  
 P. Jacques — Th. Jonnesco — E. Laguesse — L. Manouvrier — Motais  
 A. Nicolas — P. Nobécourt — O. Pasteau  
 M. Picou — A. Prenant — H. Rieffel — Ch. Simon — A. Soulié

## ÉTAT DE LA PUBLICATION (DÉCEMBRE 1903)

- TOME PREMIER (*Deuxième édition, entièrement refondue*). — **Embryologie.**  
 — **Ostéologie.** — **Arthrologie.** 1 vol. gr. in-8° avec 807 figures. 20 fr.
- TOME II (*Deuxième édition, entièrement refondue*). — 1<sup>er</sup> Fascicule : **Myologie.** 1 vol. grand 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 (*Deuxième édition, revue*) : **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. grand 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.** 1 vol. grand in-8°, avec 205 figures. . . . . 12 fr.
- 2<sup>e</sup> Fascicule (*Deuxième édition, revue*) : **Appareil respiratoire.**  
 1 vol. grand in-8°, avec 121 figures . . . . . 6 fr.
- 3<sup>e</sup> Fascicule : **Annexes du tube digestif. Péritoine.** 1 vol. grand in-8° avec 361 figures en noir et en couleurs. . . . . 16 fr.
- TOME V. — 1<sup>er</sup> Fascicule : **Organes génito-urinaires.** 1 vol. grand in-8° avec 431 figures. . . . . 20 fr.
- 2<sup>e</sup> Fascicule : **Les Organes des Sens.**

---

**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, RUVAULT, SOUQUES, THIBIERGE, THOINOT, TOLLEMER, FERNAND WIDAL.

---

# Traité de Médecine

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.

**DEUXIÈME ÉDITION**

10 vol. gr. in-8° avec figures dans le texte. *En souscription* : 150 fr.

**TOME I.** — 1 vol. gr. in-8° de 845 pages, avec figures dans le texte : 16 fr.

Les Bactéries, par L. GUIGNARD. — Pathologie générale infectieuse, par A. CHARRIN. — Troubles et maladies de la Nutrition, par PAUL LE GENDRE. — Maladies infectieuses communes à l'homme et aux animaux, par G.-H. ROGER.

**TOME II.** — 1 vol. gr. in-8° de 894 pages avec figures dans le texte : 16 fr.

Fièvre typhoïde, par A. CHANTEMESSE. — Maladies infectieuses, par F. WIDAL. — Typhus exanthématique, par L.-H. THOINOT. — Fièvres éruptives, par L. GUINON. — Erysipèle, par E. BOIX. — Diphtérie, par A. RUVAULT. — Rhumatisme, par CÉTINGER. — Scorbut, par TOLLEMER.

**TOME III.** — 1 vol. gr. in-8° de 702 pages avec figures dans le texte : 16 fr.

Maladies cutanées, par G. THIBIERGE. — Maladies vénériennes, par G. THIBIERGE. — Maladies du sang, par A. GILBERT. — Intoxications, par A. RICHARDIÈRE.

**TOME IV.** — 1 vol. gr. in-8° de 680 pages avec figures dans le texte : 16 fr.

Maladies de la bouche et du pharynx, par A. RUVAULT. — Maladies de l'estomac, par A. MATHIEU. — Maladies du pancréas, par A. MATHIEU. — Maladies de l'intestin, par COURTOIS-SUFFIT. — 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. — Maladies du rein et des capsules surrénales, par A. BRAULT. — Pathologie des organes hématopoiétiques et des glandes vasculaires sanguines, par G.-H. ROGER.

**TOME VI.** — 1 vol. gr. in-8° de 612 pages avec figures dans le texte : 14 fr.

Maladies du nez et du larynx, par A. RUVAULT. — Asthme, par E. BRISSAUD. — Coqueluche, par P. LE GENDRE. — Maladies des bronches, par A.-B. MARFAN. — Troubles de la circulation pulmonaire, par A.-B. MARFAN. — Maladies aiguës du poumon, par NETTER.

**TOME VII.** — 1 vol. gr. in-8° de 550 pages avec figures dans le texte : 14 fr.

Maladies chroniques du poumon, par A.-B. MARFAN. — Phtisie pul-

monaire, par A.-B. MARFAN. — **Maladies de la plèvre**, par NETTER. — **Maladies du médiastin**, par A.-B. MARFAN.

**TOME VIII.** — 1 vol. gr. in-8° de 380 pages avec figures dans le texte: 14 fr.

**Maladies du cœur**, par ANDRÉ PETIT. — **Maladies des vaisseaux sanguins**, par W. GÖTTINGER.

Pour paraître prochainement :

**TOMES IX et X.** — **Maladies du Système nerveux.**

## Traité de Physiologie

PAR

**J.-P. MORAT**

Professeur à l'Université de Lyon.

**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.

### VOLUMES PUBLIÉS

II. — **Fonctions d'innervation**, par J.-P. MORAT. 1 vol. gr. in-8°, avec 263 figures noires et en couleurs. . . . . 15 fr.

III. — **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.

IV. — **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.

Sous presse : Tome I. — **Fonctions élémentaires.**

## COLLECTION DE PLANCHES MURALES

DESTINÉES A

### L'Enseignement de la Bactériologie

PUBLIÉES PAR

L'INSTITUT PASTEUR DE PARIS

65 planches du format 80 × 62 c/m, tirées en couleurs sur papier toile très fort, munies d'œillets permettant de les suspendre et réunies dans un carton, avec un *texte explicatif rédigé en français, allemand et anglais.*

250 francs (port en sus). (Les planches ne sont pas vendues séparément.)

## PLANCHES MURALES

DESTINÉES A

CLINIQUE MÉDICALE LAENNEC

### L'Enseignement de l'Hématologie et de la Cytologie

Sang normal, Sang pathologique  
Sérum, Cytodiagnostic

15 planches du format 80 × 62 c/m, tirées en couleurs sur papier toile très fort et munies d'œillets permettant de les suspendre sur deux piliers (avec *texte explicatif en français, allemand et anglais.*)

60 francs (port en sus). (Les planches ne sont pas vendues séparément.)

PUBLIÉES SOUS LA DIRECTION DE MM.

**L. LANDOUZY**

**M. LABBÉ**

Professeur de clinique      Chef de laboratoire

# 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, F. BEZANÇON, R. BLANCHARD, BOINET, BOULAY, BOURCY, BRUN, CADIOT, CHABRIÉ, CHANTEMESSE, CHARRIN, CHAUFFARD, J. COURMONT, DEJERINE, PIERRE DELBET, DEVIC, DUCAMP, MATHIAS DUVAL, FÉRÉ, GAUCHER, GILBERT, GLEY, GOUGET, GUIGNARD, LOUIS GUINON, J.-F. GUYON, HALLÉ, HÉNOCQUE, HUGOUNENQ, LAMBLING, LANDOUZY, LAVERAN, LEBRETON, LE GENDRE, LEJARS, LE NOIR, LERMOYER, LESNÉ, LETULLE, LUBET-BARON, MARFAN, MAYOR, MENETRIER, MORAX, NETTER, PIERRET, RAVAUT, G.-H. ROGER, GABRIEL ROUX, RUFFER, SICARD, RAYMOND, TRIPIER, VUILLEMIN, FERNAND WIDAL.

6 volumes grand in-8° avec figures dans le texte. . . . . 126 fr.

**Tome I.** 4 vol. grand in-8° de 1018 pages avec figures dans le texte. 18 fr.

**Tome II.** 1 vol. grand in-8° de 940 pages avec figures dans le texte . 18 fr.

**Tome III.** 1 vol. in-8° de 1400 p., av. fig. dans le texte, publié en 2 fasc. 28 fr.

**Tome IV.** 1 vol. in-8° de 719 pages avec figures dans le texte. . . . . 16 fr.

**Tome V.** 1 fort vol. in-8° de 1180 pages av. nombr. figures dans le texte. 28 fr.

**Tome IV.** 1 vol. grand in-8° avec figures dans le texte . . . . . 18 fr.

## Nouveaux Procédés d'Exploration

### LEÇONS DE PATHOLOGIE GÉNÉRALE

PROFESSÉES A LA FACULTÉ DE MÉDECINE

Par **CH. ACHARD**

Agrégé, médecin de l'hôpital Tenon



RECUEILLIES ET RÉDIGÉES

PAR

**M. P. Sainton et M. Lœper**

DEUXIÈME ÉDITION, REVUE ET AUGMENTÉE

1 vol. in-8°, avec figures en noir et en couleurs. . . . . 8 fr.

## Manuel de Pathologie externe

PAR MM.

**RECLUS, KIRMISSON, PEYROT, BOUILLY**

Professeurs agrégés à la Faculté de médecine de Paris, chirurgiens des hôpitaux.

*Septième édition illustrée entièrement revue.*

I. Maladies des tissus et des organes, par le D<sup>r</sup> P. RECLUS.

II. Maladies des régions, Tête et Rachis, par le D<sup>r</sup> KIRMISSON.

III. Maladies des régions, Poitrine, Abdomen, par le D<sup>r</sup> PEYROT.

IV. Maladies des régions, Organes génito-urinaires, par le D<sup>r</sup> BOUILLY

4 volumes in-8° avec figures dans le texte. . . . . 40 fr.

Chaque volume est vendu séparément . . . . . 10 fr.

Traité élémentaire de

Vient de paraître

## Clinique Thérapeutique

Par le Dr **Gaston LYON**

Ancien chef de Clinique médicale à la Faculté de médecine de Paris

CINQUIÈME ÉDITION REVUE ET AUGMENTÉE

1 vol. grand in-8° de 1654 pages. Relié peau . . . . . 25 fr.

## FORMULAIRE THÉRAPEUTIQUE

PAR MM.

**G. LYON**

Ancien chef de clinique à la Faculté

**P. LOISEAU**

Ancien Préparateur à l'École de pharmacie

AVEC LA COLLABORATION DE **E. LACAILLE**

Assistant à la Clinique médicale de la Faculté de l'Hôtel-Dieu

1 vol. in-18 en indien très mince, relié maroquin souple. . . 6 fr.

## Traité de Physique Biologique

*publié sous la direction de MM.*

**D'ARSONVAL — GARIEL — CHAUVEAU — MAREY**

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 . . . . . 70 fr.

**TOME PREMIER.** 1 vol. in-8° de 1150 pages, avec 591 figures . . . 25 fr.

**TOME II.** 1 volume de 1144 pages avec 665 figures et 3 planches. . . 25 fr.

**L'ŒUVRE MÉDICO-CHIRURGICAL** (Dr CRITZMAN, directeur)

## Suite de Monographies cliniques

### DERNIÈRES MONOGRAPHIES PUBLIÉES

34. **Le Rhumatisme tuberculeux** (*pseudo-rhumatisme d'origine bacillaire*), par le professeur ANTONIN PONCET et MAURICE MAILLAND.
35. **Les Consultations de Nourrissons**, par Ch. MAYGRIER, agrégé, accoucheur de la Charité.
36. **La Médication phosphorée**, par le prof. GILBERT et le Dr POSTERNAK.

### 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).

Traité de

QUATRIÈME ÉDITION  
REVUE ET AUGMENTÉE

# Chirurgie d'Urgence

Par Félix LEJARS

Professeur agrégé à la Faculté de médecine de Paris  
Chirurgien de l'hôpital Tenon, membre de la Société de Chirurgie.

820 figures dont 478 dessinées d'après nature par le D<sup>r</sup> E. DALEINE; 167 photographies originales et 16 planches hors texte en couleurs.

1 vol. grand in-8° de 1046 pages. Relié toile. . . . 30 fr.

---

## Traité des Maladies de l'Enfance

Deuxième Edition, revue et augmentée

PUBLIÉE SOUS LA DIRECTION DE MM.

J. GRANCHER

Professeur à la Faculté de Paris  
Membre de l'Académie de médecine.

J. COMBY

Médecin  
de l'hôpital des Enfants-Malades.

5 vol. grand in-8° avec figures dans le texte. En souscription. 100 fr.  
Tome I : 22 fr. — Tome II : 22 fr.

---

## Traité de Technique opératoire

PAR

CH. MONOD

Professeur agrégé à la Faculté  
de médecine de Paris  
Chirurgien de l'Hôpital Saint-Antoine  
Membre de l'Académie de médecine

J. VANVERTS

Ancien interne lauréat des Hôpitaux  
de Paris  
Chef de clinique à la Faculté  
de médecine de Lille

2 vol. gr. in-8° formant ensemble 1960 pages, avec 1908 figures  
dans le texte . . . . . 40 fr.

---

## Les Tumeurs du Rein

PAR MM.

J. ALBARRAN

Professeur agrégé  
à la Faculté de médecine de Paris

L. IMBERT

Professeur agrégé à la Faculté  
de médecine de Montpellier

1 vol. grand in-8°, avec 106 figures dans le texte, en noir et en couleurs . . . . . 20 fr.

**Les Maladies infectieuses**, par G.-H. ROGER, professeur agrégé, médecin des hôpitaux. 1 vol. in-8° de 1520 pages. 28 fr.

**Précis d'Histologie**, par le Prof. Mathias DUVAL, membre de l'Académie de médecine. *Deuxième édit., revue*, avec 427 fig. 18 fr.

**Les Maladies du Cuir chevelu.** — I. Maladies séborrhéiques : **Séborrhée, Acnés, Calvitie**, par le Dr R. SABOURAUD, chef du laboratoire de la Ville de Paris à l'hôpital Saint-Louis. 1 volume in-8°, avec 91 figures dont 40 aquarelles en couleurs. . . . . 10 fr.

**Les Maladies microbiennes des Animaux**, par Ed. NOCARD, professeur à l'École d'Alfort, membre de l'Académie de médecine, et E. LECLAINCHE, professeur à l'École vétérinaire de Toulouse. *Troisième édition, refondue et augmentée*. 2 volumes grand in-8° . . . . . 22 fr.

**Syphilis et Déontologie**, par GEORGES THIBIERGE, médecin de l'hôpital Broca. 1 vol. in-8° . . . . . 5 fr.

**Traité d'Hygiène**, par le Prof. A. PROUST, membre de l'Académie de médecine. *Troisième édition revue et considérablement augmentée*, avec la collaboration de A. NETTER, agrégé, médecin de l'hôpital Trousseau, et H. BOURGES, 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 figures et cartes, publié en 2 fascicules. En souscription. . . . . 18 fr.

**L'Anesthésie localisée par la Cocaïne**, par PAUL RECLUS, professeur agrégé, chirurgien de l'hôpital Laënnec, membre de l'Académie de médecine. 1 vol. petit in-8°, avec 59 figures . . . . . 4 fr.

**Les Difformités acquises de l'Appareil locomoteur**, pendant l'Enfance et l'Adolescence, par le Dr E. KIRMIS-SON, professeur de Clinique chirurgicale infantile à la Faculté de médecine, chirurgien de l'hôpital Trousseau. 1 volume 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.

## 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.*

Vient de paraître :

**Manuel de Pathologie interne**, par G. DIEULAFOY, professeur à la Faculté de médecine de Paris. *Quatorzième édition entièrement refondue et augmentée.* 4 vol. avec fig. en n. et en coul. 32 fr.

**Éléments de Physiologie**, par Maurice ARTHUS, chef de laboratoire à l'Institut Pasteur de Lille. 1 vol., avec 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 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

**Manuel de Thérapeutique**, par le Dr BERLIOZ, professeur à l'Université de Grenoble, avec préface du Professeur BOUCHARD. *Quatrième édition revue et augmentée.* 1 vol. . 6 fr.

**Manuel de Bactériologie médicale**, par le Dr BERLIOZ, avec préface de M. le professeur LANDOUZY. 1 vol. avec fig. 6 fr.

**Précis de Chirurgie cérébrale**, par Aug. BROCA, chirurgien de l'hôpital Tenon, professeur agrégé à la Faculté de médecine. 1 vol. avec figures . . . . . 6 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 261 figures . . . . . 8 fr.

**Précis élémentaire d'Anatomie, de Physiologie et de Pathologie**, par P. RUDAUX, ancien chef de clinique à la Faculté de Paris, avec préface, par M. RIBEMONT-DESSAIGNES. 1 vol., avec 462 figures . . . . . 8 fr.

**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 Dr L.-H. THOINOT, professeur agrégé à la Faculté, et E.-J. MASSELIN, médecin-vétérinaire. *Quatrième édition entièrement refondue.* 1 volume, avec figures en noir et en couleurs. . . 8 fr.

**Précis de Bactériologie clinique**, par le Dr R. WURTZ, professeur agrégé à la Faculté de médecine de Paris. *Deuxième édition revue et augmentée.* 1 volume, avec tableaux et figures. 6 fr.

*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> VAURIZ, 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.
- Hygiène thérapeutique des Maladies des Fosses nasales**, par MM. les D<sup>rs</sup> LUBET-BARBON et R. SARREMONÉ.

R. WAGNER et F. FISCHER

Traité deChimie industrielle

QUATRIÈME ÉDITION FRANÇAISE ENTIÈREMENT REFOUNDUE

Rédigée d'après la quinzisième édition allemande

par le D<sup>r</sup> L. GAUTIER2 vol. grand in-8° avec de nombreuses figures dans le texte . . 35 fr.

**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'État. 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 liquours titrés, 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 Cuniasse**, chimiste-expert de la Ville de Paris. 1 vol. 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. Muller**, 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.

## Géographie agricole de la France et du Monde

par **J. DU PLESSIS DE GRENÉDAN**

Professeur à l'École supérieure d'Agriculture d'Angers.

AVEC UNE PRÉFACE DE

**M. le Marquis DE VOGUÉ**

Membre de l'Académie française, président de la Société des Agriculteurs de France.

1 vol. in-8° avec 118 cartes et figures dans le texte. 7 fr.

## Éléments de Commerce et de Comptabilité

Par **Gabriel FAURE**

Professeur à l'École des Hautes-Études commerciales et à l'École commerciale,  
Expert-comptable au Tribunal civil de la Seine.

CINQUIÈME ÉDITION REVUE ET MODIFIÉE

1 vol. petit in-8°, cartonné toile anglaise. . . . . 4 fr.

## D'ALGER au CONGO par le TCHAD

Par **F. FOUREAU**, Lauréat de l'Institut.

1 fort volume in-8°. avec 170 figures et une carte en couleurs.  
Broché : 12 fr.; Richement cartonné : 15 fr.

# 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 : Poissons. 1 vol. gr. in-8° de 366 pages avec 190 figures dans le texte. . . . .                | 10 fr. |
| FASCICULE VII et dernier : Vertébrés marcheurs ( <i>En préparation</i> ).                                     |        |

## Guides du Touriste, du Naturaliste et de l'Archéologue

publiés sous la direction de M. Marcellin BOULE

### VOLUMES PUBLIÉS

- Le Cantal**, par M. BOULE, docteur ès sciences, et L. FARGES, archi-  
viste-paléographe.
- La Lozère**, par E. CORD, ingénieur-agronome, G. CORD, docteur en  
droit, avec la collaboration de M. A. VIRÉ, docteur ès sciences.
- 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.
- La Haute-Savoie**, par MARC LE ROUX, conservateur du Musée  
d'Annecy.
- La Savoie**, par J. RÉVIL, président de la Société d'Histoire  
naturelle de la Savoie, et J. CORCELLE, agrégé de l'Université.
- Chaque volume in-16, relié toile anglaise avec figures et cartes  
en couleurs. . . . . 4 fr. 50

*En préparation* : Le Velay — les Alpes du Dauphiné.

**OUVRAGES DE M. A. DE LAPPARENT**

Membre de l'Institut, professeur à l'École libre des Hautes-Études.

**TRAITÉ DE GÉOLOGIE**

QUATRIÈME ÉDITION ENTIÈREMENT REFONDUE ET CONSIDÉRABLEMENT AUGMENTÉE

3 vol. grand in-8°, avec nomb. fig., cartes et croquis . . 35 fr.

- Abrégé de géologie.** *Cinquième édition, refondue et augmentée.* 1 vol. 157 gravures et une carte géologique de la France en chromolithographie, cartonné toile . . . . . 4 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 235 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

**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. *Sixième édition.*
- Nouvelles Recettes utiles et Appareils pratiques.** *Troisième série,* par Gaston TISSANDIER. *Quatrième édition.*
- Recettes et Procédés utiles.** *Quatrième série,* par Gaston TISSANDIER. *Troisième édition.*
- Recettes et Procédés utiles.** *Cinquième série,* par J. LAFFARGUE, secrétaire de la rédaction de *la Nature*. *Deuxième édition.*

Chaque volume in-18 avec figures est vendu

Broché . . . . . 2 fr. 25 | Cartonné toile . . . . . 3 fr.

**La Physique sans appareils et la Chimie sans laboratoire,** par Gaston TISSANDIER. *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 A 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. — 5970.