



36
278

SOCIÉTÉ INDUSTRIELLE
NORD de la FRANCE
110, Rue de l'Hôpital Militaire
PRINCIPES
GÉNÉRAUX
→ LILLE ←

G. SOLIMAN
Ingénieur des Arts et Manufactures



L'Étirage

ET DU

Tréfilage

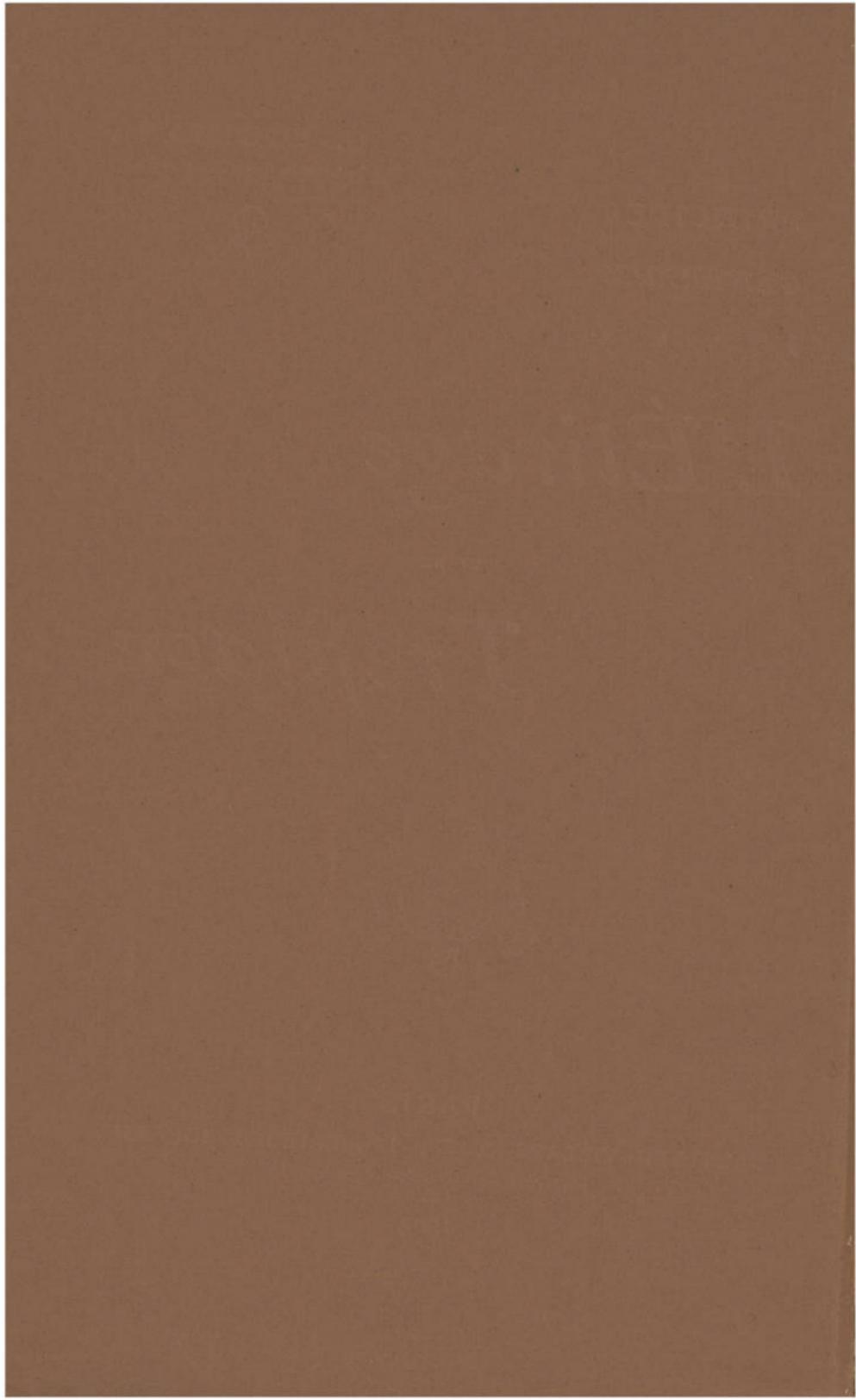


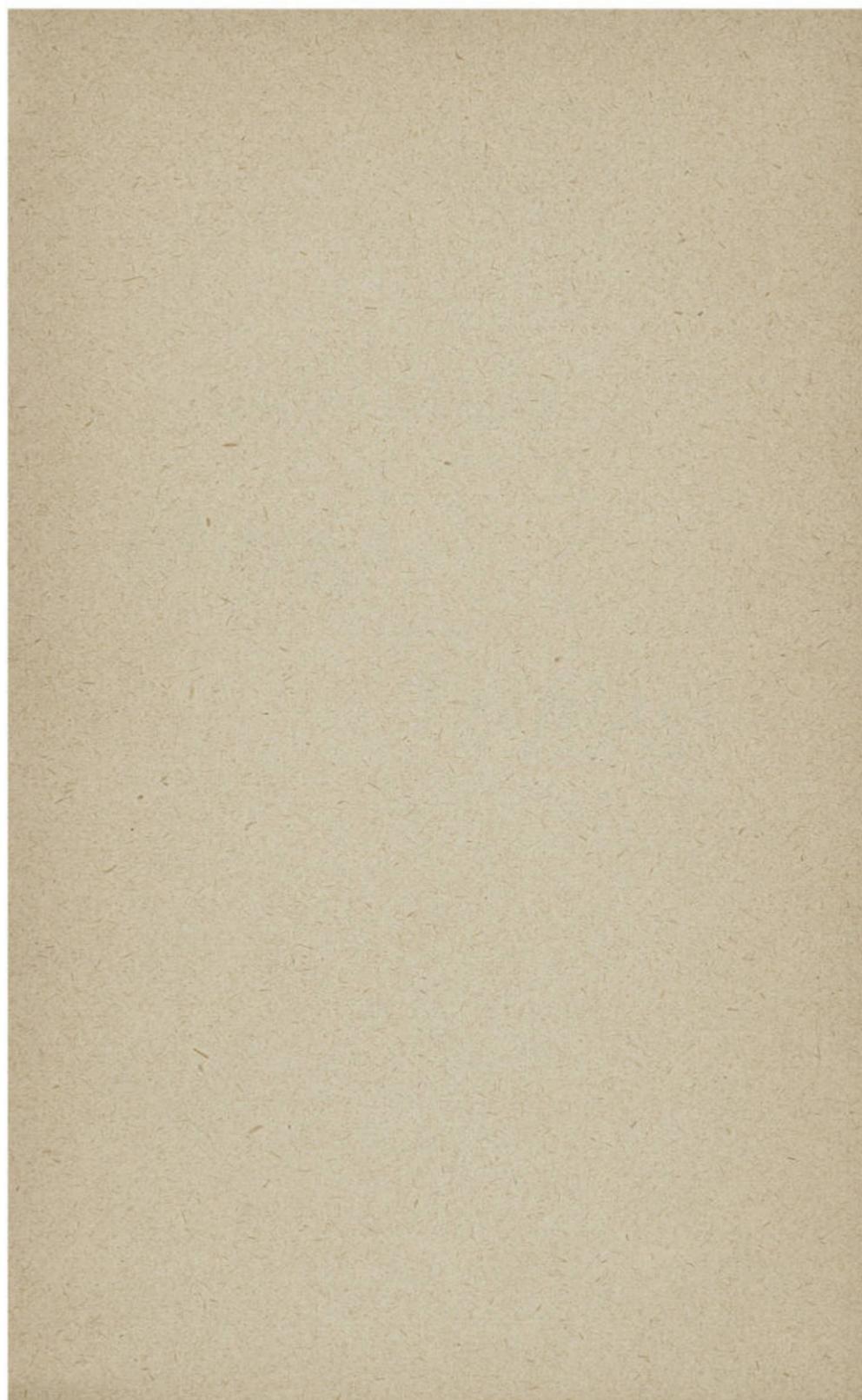
PARIS

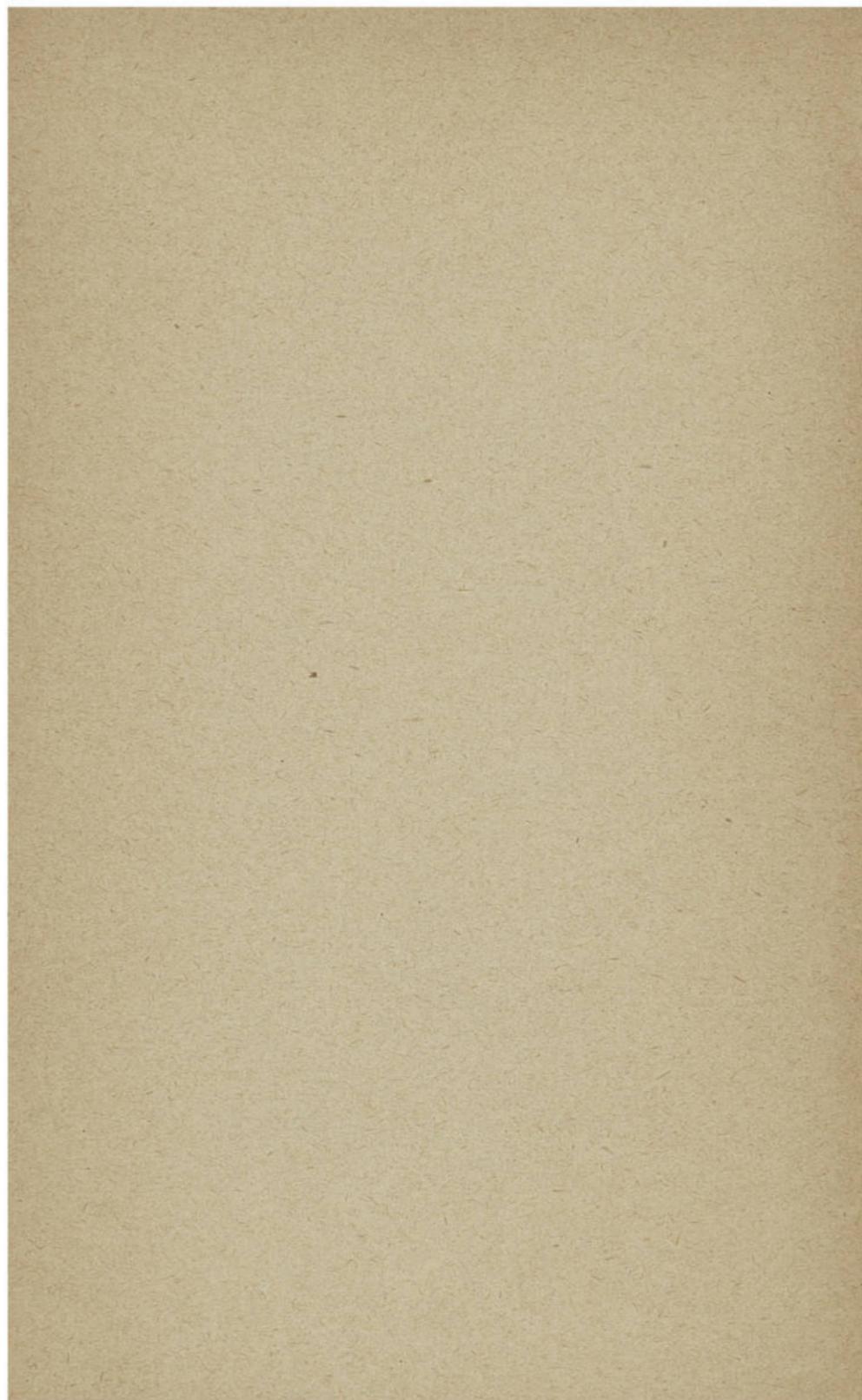
ER-VILLARS & C^o, IMPRIMEURS-EDITEURS
55, Quai des Grands-Augustins, 55

1924









IRHIS / LILLE 3
FONDS SOCIÉTÉ
INDUSTRIELLE

FSI 346
Hommage des Éditeurs

PRINCIPES GÉNÉRAUX

DE

L'Étirage.

ET DU

Tréfilage

PARIS. — IMPRIMERIE GAUTHIER-VILLARS ET C^o,
Quai des Grands-Augustins, 55.

70588-24

G. SOLIMAN

Ingénieur des Arts et Manufactures

PRINCIPES

GÉNÉRAUX

DE % % %

L'Étirage



ET DU

Tréfilage



PARIS

GAUTHIER-VILLARS & Cie, IMPRIMEURS-ÉDITEURS

55, Quai des Grands-Augustins, 55

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

PRINCIPES GÉNÉRAUX

DE L'ÉTIRAGE ET DU TRÉFILAGE

CHAPITRE I.

PROPRIÉTÉS DES PRODUITS MÉTALLURGIQUES.

Les propriétés chimiques, physiques, mécaniques des produits métallurgiques ne présentent pas un égal intérêt pour l'industriel qui, avant tout, a besoin de connaître les qualités de résistance des matériaux qu'il emploie, résistances de toutes sortes, au choc, à la traction, à la compression, à la torsion, etc., afin de prévoir, dans une certaine mesure, comment ces matériaux se comporteront pendant le travail qu'ils subiront aux ateliers et aussi dans l'emploi qui en sera fait ultérieurement; c'est pourquoi nous étudierons spécialement les « propriétés mécaniques » des produits utilisés dans l'industrie de l'étirage.

Comment déterminer ces « propriétés mécaniques »? Par des essais qu'on fait subir à des échantillons appelés *éprouvettes* qui sont prélevés dans les parties normales du métal à étudier et qui ont des formes et des dimensions déterminées une fois pour toutes.

Passons en revue tout d'abord les principaux essais auxquels on

a recours dans ces laboratoires industriels qui sont le complément nécessaire des usines modernes.

Il faut remarquer que, dans beaucoup de ces laboratoires, on pratique des essais chimiques, mais le but qu'on se propose est de déduire par comparaison, de ces recherches, les propriétés mécaniques; ainsi la composition chimique d'un acier n'a d'intérêt que par les qualités de résistance qui correspondent aux proportions des éléments particuliers qui constituent cet acier.

ESSAIS DES PRODUITS MÉTALLURGIQUES.

Nous ne donnerons qu'un résumé extrêmement succinct des essais si variés qu'on fait subir aux produits métallurgiques pour définir leurs propriétés et vérifier leurs qualités.

Les principales méthodes d'étude des produits métallurgiques ont été décrites dans un tout récent et très remarquable ouvrage ⁽¹⁾ de M. Guillet qui les classe de la manière suivante :

ESSAIS PHYSIQUES.

1^o **L'analyse thermique.** — Elle repose sur l'examen de la courbe de refroidissement. Un tel diagramme est constitué par : un liquidus qui est la courbe des températures T où un alliage binaire commence à se solidifier (courbe tracée en fonction de la composition); un solidus qui est la courbe des températures t de fin de solidification (toujours en fonction de la composition). Enfin des lignes de transformation qui sont celles des points où le refroidissement marque, par des anomalies, des phénomènes de transformation interne de la matière. Considérons le mélange de deux métaux A et B; ce mélange pouvant laisser déposer l'un ou l'autre de ces métaux par refroidissement. Traçons la courbe des températures et des compositions. Jusqu'à la proportion a du métal A

(1) *Les méthodes d'études des alliages métalliques.*

dans le mélange AB, les points de solidification donnent la branche A ω . Aux températures inférieures à celles indiquées par cette branche de courbe, c'est le métal B qui se solidifie en même temps que la solution solide formée par la petite proportion de A dissoute dans B.

Au delà de la proportion a , les résultats sont identiques, mais la

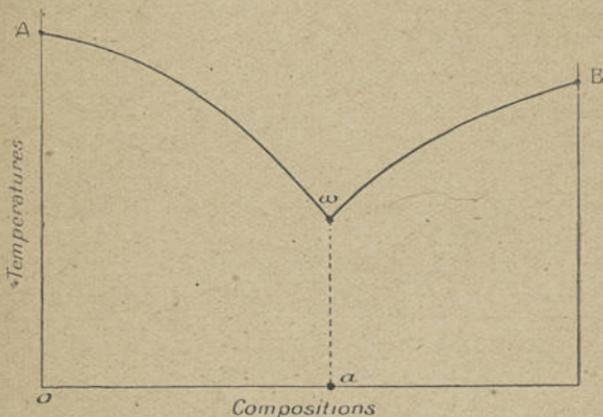


Fig. 1.

courbe remonte, et c'est le métal A qui se solidifie avec la solution solide de B dans A. Le point ω où se coupent les branches des deux courbes est le point eutectique (*fig. 1*).

Si les deux métaux en se mélangeant sont susceptibles de donner une combinaison, cette combinaison agira comme un troisième corps et le diagramme aura l'aspect de la figure 2. Il y a deux eutectiques ω_1 et ω_2 et au maximum O correspond soit une combinaison, soit une solution solide. Il y a lieu de noter également les points de rebroussement situés dans le solidus et ceux faisant partie du liquidus; les premiers sont appelés *eutectoïdes*, les seconds *eutectiques* plus spécialement.

Nous verrons qu'à ces compositions eutectiques correspondent pour les constituants des formes très caractérisées.

Pour mieux faire comprendre la signification des diagrammes de refroidissement, prenons un exemple :

Considérons un mélange des deux métaux A et B dans la proportion figurée par le point m , ce mélange comprend donc Bm unités

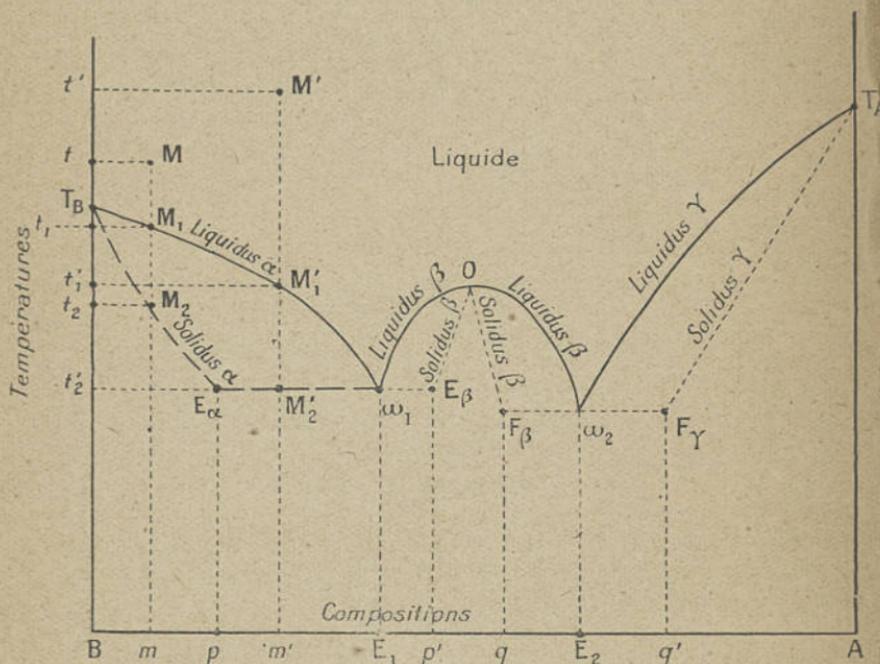


Fig. 2.

de poids de B et mA unités de poids de A, de telle sorte que le total fait 100 unités de poids (fig. 2).

Portons ce mélange à la température t . Nous obtenons le point M figuratif de l'état du mélange et de ses proportions. Si la température baisse, tant que M restera au-dessus de la courbe T_B, ω_1 de refroidissement, le mélange sera à l'état liquide. En M_1 se produit le commencement de solidification, c'est le liquidus correspon-

dant au dépôt de la solution solide α du corps A dans le corps B. Le refroidissement se poursuivant, le mélange se compose d'une partie solide et d'une autre liquide; la première est la solution solide; il en est ainsi jusqu'à M_2 , point relatif à la température t_2 correspondant au solidus α et, au-dessous de cette température, nous avons uniquement la solution solide α .

Considérons la proportion m' . Nous aurons au refroidissement les mêmes changements d'état, mais à la température t'_2 , nous tombons au point de fusion M'_2 de l'eutectique ω_1 .

Remarquons qu'en ω_1 coïncident : 1^o le liquide, 2^o la solution α et 3^o la solution β ; ces deux dernières correspondent aux proportions p et p' . L'équilibre est donc instable en t'_2 , pour la proportion E_1 ; la moindre modification de température entraîne un changement d'état.

Le point T_B est le point de fusion du métal B, puisque la proportion m du métal A est nulle. Pour le point T_A , nous ferions la remarque inverse.

Le point O maximum du liquidus β correspond, nous l'avons dit, à une solution solide β (ou à un composé défini).

La surface du diagramme se décomposera donc ainsi :

$B.p.E_x.T_B$ ne contient que la solution solide α ;

$E_x.T_B.\omega_1$ contient la solution solide α et le métal B à l'état liquide ;

$p.E_x.\omega_1.E_1$ contient l'eutectique ω_1 et la solution solide α ;

$E_1.\omega_1.E_\beta.p'$ contient l'eutectique ω_1 et la solution solide β ;

$E_\beta.O.\omega_1$ contient le métal A à l'état liquide, et la solution solide β , etc.

Nous n'avons donné là qu'un exemple assez simple; dans la pratique, on se trouve souvent en présence de cas plus complexes dont l'étude nous entraînerait trop loin.

2^o **L'étude de la variation de volume.** — *a. Densité.* — Si un alliage binaire ne comporte qu'un simple mélange, sa densité d sera

donnée par la formule

$$\frac{100}{d} = \frac{p_1}{d_1} + \frac{100 - p_1}{d_2};$$

p_1 , proportion pour 100 du métal A; d_1 , densité du métal A; d_2 , densité du métal B.

Cette densité théorique, rapprochée de la densité expérimentale, permet de dire qu'il y a eu contraction ou augmentation de volume; on peut déceler de cette façon la présence de combinaisons. C'est ainsi qu'est vérifiée sur les courbes des densités, qu'on peut tracer en fonction de la composition, des alliages cuivre-zinc, par exemple, l'existence des combinaisons de ces deux métaux : Cu Zn, Cu Zn², Cu Zn⁶.

L'étude de la variation de la densité peut s'appliquer non seulement aux modifications internes apportées par la transformation chimique, mais aussi à celles qui résultent des traitements subis par le métal; ainsi des changements de constitution sont nettement marqués sur la courbe de densités tracée en fonction de la composition, de la température de trempe et de celle du revenu dans les aciers; la trempe abaisse en effet la densité de certains alliages.

b. Dilatation. — C'est le même principe; la courbe des compositions et des coefficients de dilatation entre deux températures données ou celle de ce coefficient en fonction de la température pour une composition donnée, permettent de fixer les points de transformation, comme dans le cas précédent.

3° **La résistance électrique.** — On étudie sa variation en fonction de la composition, en fonction de la température, ou enfin avec les traitements que le métal a subis. Cette méthode présente de l'intérêt, en particulier pour l'étude de l'érouissage :

M. Guillet a comparé la résistance électrique d'un fil éroui avec celle du même fil recuit. A cet effet, le circuit est constitué par le fil éroui sur une certaine longueur et recuit par chauffage sur le

reste de la longueur utilisée. Nous donnerons plus loin les résultats obtenus par cette méthode appliquée à des fils de laiton (1).

4^o **La thermo-électricité.** — Lorsqu'on soude par leurs extrémités des fils de métaux différents de façon à fermer un circuit et si l'on porte les soudures à des températures différentes, un courant électrique parcourt le circuit. Si l'un des fils est d'un métal connu, et l'autre d'une composition à étudier, en faisant varier la température, on pourra tracer, pour une composition donnée, la courbe des variations du pouvoir thermo-électrique. Les variations brusques indiqueront les points de transformation de la composition considérée. On peut aussi tracer la courbe, à une température déterminée, des variations du pouvoir thermo-électrique en fonction de la composition.

Cette méthode, dont M. Galibourg étudie la mise au point dans son application à la distinction des produits métallurgiques, offre un intérêt tout spécial, car elle sera réalisable aisément dans les laboratoires industriels. Voici comment elle sera appliquée. Si la soudure chaude d'un couple thermo-électrique est constituée par deux métaux de même composition et dans le même état physique, l'état de recuit par exemple, aucun courant ne passe dans le galvanomètre en circuit avec le couple. Si au contraire les deux métaux du couple sont différents, un courant s'établit et prend une certaine valeur, fonction de la température de la soudure chaude et de la composition des métaux du couple. Dans le dispositif utilisé, l'un des métaux du couple est constitué par la pièce à étudier, l'autre pôle du couple est un échantillon de métal type.

Pièce et témoin sont partiellement plongés dans un bain de mercure chauffé à température déterminée une fois pour toutes. Le but de ce bain est d'assurer un contact électrique parfait entre les deux pôles du couple, tout en portant à la même température les portions des deux pièces plongées dans le bain.

(1) Voir page 64.

5° **La force électromotrice de dissolution.** — Une pile est constituée en utilisant comme électrodes, d'une part le métal pur A à potentiel le plus élevé de l'alliage, d'autre part l'alliage lui-même à étudier et, comme électrolyte, un sel du métal A. On mesure la force électromotrice de cette pile. Un diagramme est tracé, des variations de la force électromotrice de dissolution en fonction de la composition; les irrégularités de la courbe signalent les modifications internes. Jusqu'ici cette méthode a été assez peu appliquée et en tout cas limitée à des recherches théoriques.

6° **Le magnétisme.** — On se borne généralement à l'observation de l'apparition ou de la disparition du magnétisme.

La chaleur spécifique, la conductibilité thermique, les propriétés optiques, l'examen aux rayons X, la sonorité, donnent des renseignements parfois intéressants. Nous n'insisterons pas sur les méthodes basées sur ces diverses considérations, car elles sont restées jusqu'ici du domaine des laboratoires de recherches.

ESSAIS PHYSICO-CHIMIQUES.

Ils reposent sur l'étude de la métallographie microscopique, de la macrographie et aussi sur celle des chaleurs de formation.

1° **Métallographie microscopique.** — Cette méthode d'essai qui, depuis une vingtaine d'années, s'est généralisée de telle sorte qu'elle est appliquée dans toutes les usines métallurgiques de quelque importance, a pour but de rendre visibles les constituants des métaux et des alliages.

Deux métaux fondus ensemble donnent, quand ils sont à l'état liquide, soit deux couches de composition différente : ils ne sont pas miscibles (il faut aussi que les densités soient différentes), ou bien un produit homogène, la composition chimique est alors constante dans toute la masse; ils sont miscibles. Dans ce dernier cas, un alliage binaire, au refroidissement, pourra donner les constituants suivants :

a. Les deux corps ou l'un d'eux peuvent conserver leur personnalité;

b. Ils peuvent former des combinaisons;

c. Ils peuvent donner des solutions solides, c'est-à-dire qu'un des deux corps s'étant dissous dans l'autre quand ils étaient à l'état liquide, il est resté en solution après refroidissement et solidification. En réalité, la complication est souvent plus grande, car il se forme parfois des combinaisons qui, elles, entrent en solution, laquelle devient solide.

Nous ne pouvons pas étudier tous les détails de cette méthode d'essai si répandue, nous dirons simplement en quoi elle consiste et nous résumerons les résultats auxquels elle conduit.

L'échantillon à étudier est poli, de telle façon qu'il ne reste aucune raie gênant les observations à faire au microscope sous des grossissements atteignant parfois 2000 diamètres. On attaque ensuite cette surface polie avec un réactif qui, dissolvant certains constituants, détermine un relief qu'un éclairage fera apparaître au microscope, par réflexion. En rapprochant cette image, qui peut d'ailleurs être photographiée, de types connus à l'avance, on tirera des conclusions sur la nature des constituants ainsi examinés. Le choix du réactif a une grande importance. Pour les aciers on emploie l'acide picrique en solution dans l'alcool éthylique (4 pour 100 d'acide). Le picrate de soude en solution dans l'eau, utilisé à chaud, décèle le carbure de fer Fe^3C (cémentite), combinaison définie.

Les solutions acides de chlorure ferrique sont utilisées pour les laitons. Un autre mode d'attaque est l'attaque électrolytique : l'échantillon à examiner est placé dans une solution qui n'agit que par électrolyse. Cet échantillon forme un pôle du courant, l'autre pôle étant constitué par la capsule qui contient la solution; en choisissant le sens du courant, en faisant varier son intensité, on gradue son action et les résultats obtenus sont très caractérisés.

On peut aussi opérer par l'attaque en bas-relief; on utilise pour

cela la différence de dureté des constituants, grâce à un polissage approprié généralement fait au moyen d'un feutre.

Les opérations de polissage et d'attaque sont suivies d'un lavage à l'eau, à l'alcool, à l'éther, et d'un séchage à l'air. Le temps d'attaque a une importance, aussi doit-on suivre avec un chronomètre l'action du réactif.

Un produit métallurgique composé d'une seule phase homogène, c'est-à-dire d'un unique constituant, se présente à l'examen microscopique, pratiqué ainsi qu'il vient d'être indiqué, comme composé de grains que l'attaque rend plus ou moins visibles. Les lignes de séparation sont dues soit à des traces d'impuretés déposées entre ces grains, soit à de légères fentes produites par le retrait au refroidissement, soit enfin à l'existence d'un ciment amorphe existant entre les cristaux et plus attaquable que ceux-ci. La figure 3 représente du fer électrolytique recuit.

Les combinaisons montrent en général des cristaux à bords rectilignes. Il en est de même de leurs solutions solides.

Un métal brut de coulée donne lieu à une certaine hétérogénéité; la solidification s'est faite par dépôts successifs, de sorte que le réactif réagit différemment d'un point à un autre. Un recuit à température convenablement choisie et d'une durée suffisante peut faire disparaître cette hétérogénéité. Citons comme exemple le bronze à 5 pour 100 d'étain brut de coulée qui, attaqué à la soude et à l'eau oxygénée, donne la micrographie reproduite par la figure 4; un recuit de 3 heures à 800°, suivi d'une attaque identique, fournit une micrographie présentant l'aspect de la figure 5.

Si le refroidissement détermine simultanément un dépôt de deux constituants (eutectiques, eutectoïdes), la structure ainsi obtenue est caractéristique; les deux constituants sont entremêlés et ils présentent une disposition lamellaire. Leurs lames parallèles et alternées sont séparées par un mince filet noir provenant soit de l'attaque, soit de ce que la dureté des deux constituants n'étant pas la même, il y a après polissage une ombre portée par l'un sur l'autre.

La figure 6 représente de la perlite pure dans un acier lentement

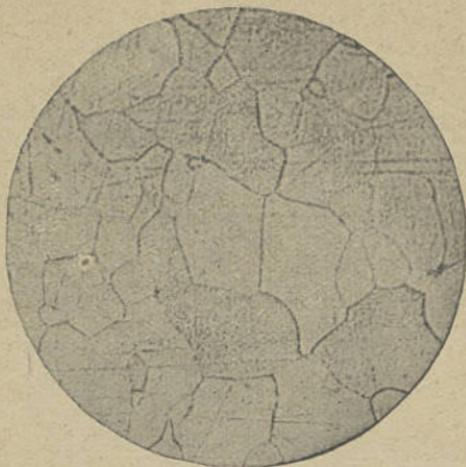


Fig. 3. — Fer électrolytique recuit, attaque par le réactif Bénédicts.
(Grossissement 300 D.)



Fig. 4. — Bronze à 5 pour 100 de Sn.
Brut de coulée, attaque à la soude et à l'eau oxygénée.

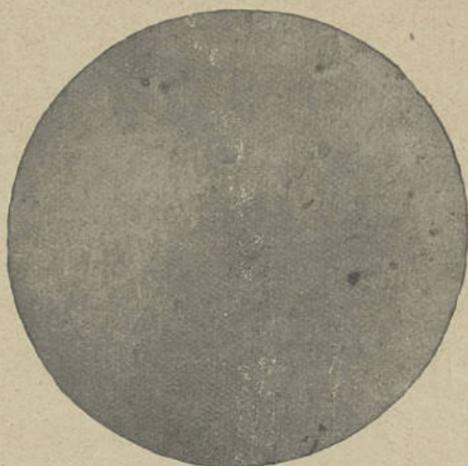


Fig. 5. — Bronze à 5 pour 100 de Sn.
Recuit 3 heures à 800°, attaque à la soude et à l'eau oxygénée.

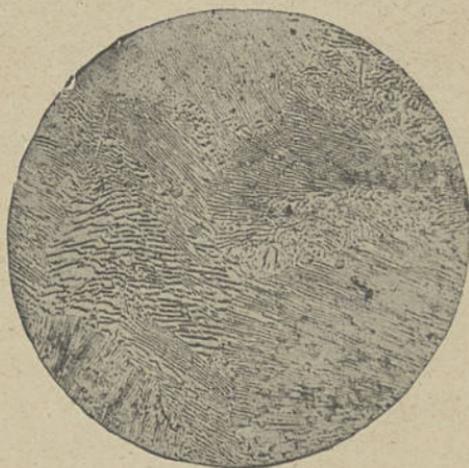


Fig. 6. — Perlite pure (dans un acier lentement refroidi),
attaque à l'acide picrique. (Grossissement 200 D.)

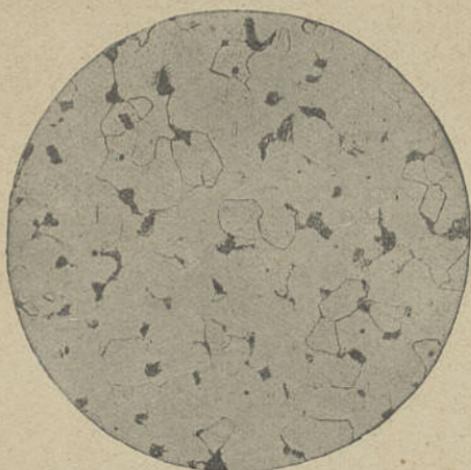


Fig. 7. — Acier à 0,10 pour 100 de C. recuit à 900°, ferrite claire, perlite foncée, attaque au réactif de Bénédicts. (Grossissement 200 D.)

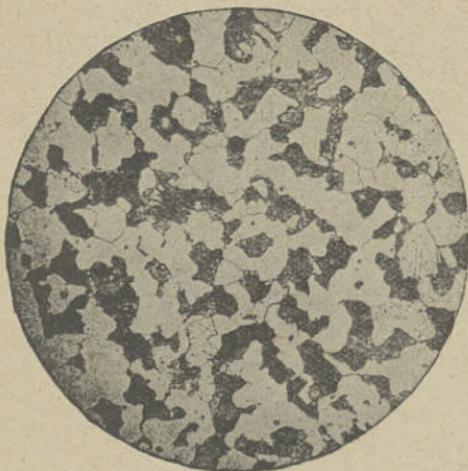


Fig. 8. — Acier à 0,33 pour 100 de C. recuit à 850°, ferrite claire, perlite foncée, attaque au réactif de Bénédicts. (Grossissement 200 D.)



Fig. 9. — Acier à 0,54 pour 100 de C, recuit à 850°, ferrite claire, perlite foncée, attaque au réactif de Bénédicts. (Grossissement 200 D.)

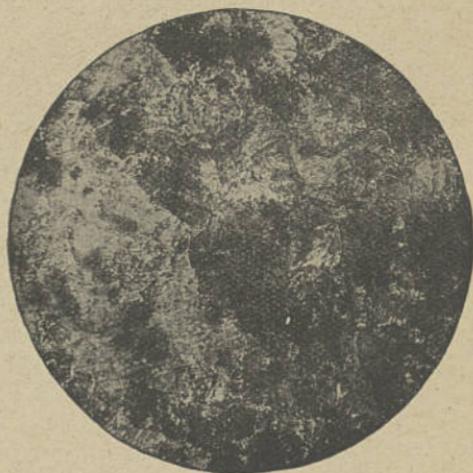


Fig. 10. — Acier à 0,8 pour 100 de C, recuit à 850°, ferrite claire, perlite foncée, attaque au réactif de Bénédicts. (Grossissement 200 D.)

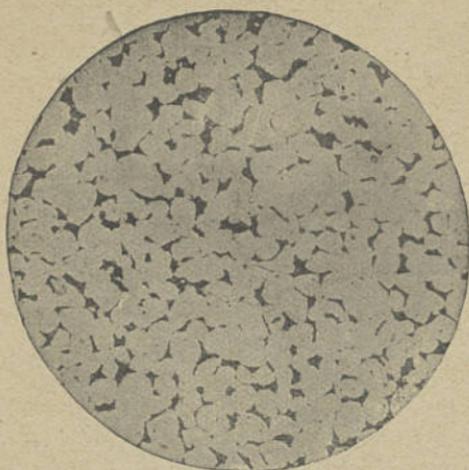


Fig. 11. — Cu = 62; Zn = 38. Laiton recuit = $\alpha + \beta$.
Attaque au perchlorure de fer acide. (Grossissement 50 D.)

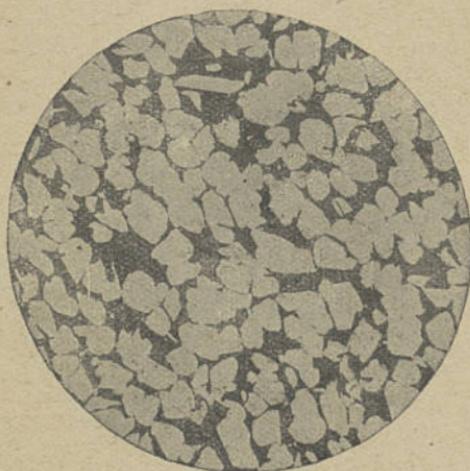


Fig. 12. — Cu = 60; Zn = 40. Laiton = $\alpha + \beta$.
Attaque au perchlorure de fer acide. (Grossissement 50 D.)

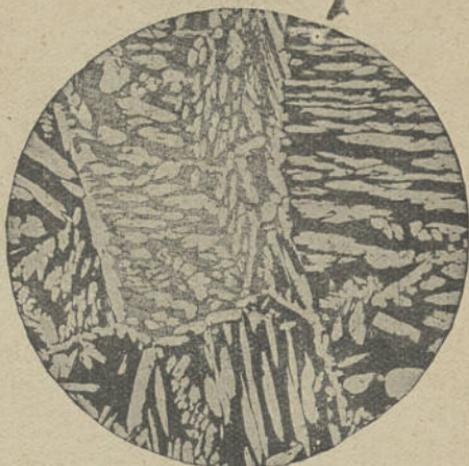


Fig. 13. — Cu = 58; Zn = 42. Laiton = $\alpha + \beta$.
Attaque au perchlorure de fer acide. (Grossissement 50 D.)



Fig. 14. — Cu = 56,5; Zn = 43,5. Laiton = $\alpha + \beta$.
Attaque à l'oxyde de cuivre ammoniacal. (Grossissement 50 D.)

refroidi; l'attaque a été faite à l'acide picrique (grossissement 200 diamètres). La perlite est l'eutectique : ferrite, cémentite; la ferrite est du fer pur et la cémentite est le carbure de fer Fe^3C , nous l'avons déjà dit.

La métallographie microscopique permet, dans la plupart des cas, de reconnaître non seulement la composition, mais aussi la constitution des produits métallurgiques.

Les figures 7, 8, 9, 10 sont des micrographes d'aciers qui, par comparaison, serviront à déterminer approximativement la teneur en carbone d'autres aciers qu'on veut étudier. Les figures 11, 12, 13, 14 sont des micrographies de laitons qu'on utilisera dans les mêmes conditions.

Cette méthode d'essai donne, en outre, la possibilité de reconnaître que l'échantillon considéré a subi un traitement mécanique, thermique ou chimique.

INFLUENCE DE L'ÉCROUISSAGE SUR LA MICROSTRUCTURE. — Lorsqu'un métal est déformé à température relativement basse notamment à la température ordinaire, il devient plus dur, plus fragile; il est écroui. Nous verrons plus en détail l'influence de l'écrouissage sur les propriétés des métaux. Au point de vue de l'étude microscopique, on constate que l'aspect est modifié proportionnellement au degré d'écrouissage. Dans un alliage à une phase, c'est-à-dire présentant uniquement une substance homogène, si l'on vient à l'écrouir, on voit l'importance de ses cristaux diminuer, proportionnellement au degré d'écrouissage. Dans un alliage à deux phases, on remarque que les constituants se déforment par l'écrouissage, par exemple, la perlite et la ferrite dans les aciers s'allongent au fur et à mesure de l'étirage. On peut même mesurer le degré d'écrouissage sur certaines micrographies.

Les figures 15, 16, 17 montrent bien les modifications des structures pour le cuivre. Le degré d'écrouissage est donné par la formule

$$e = \frac{S - s}{s} \times 100, S \text{ étant la section initiale et } s \text{ la section finale (1).}$$

(1) Voir page 81.



Fig. 15. — Cuivre fondu, attaque au perchlorure de fer,
(Grossissement 85 D.)

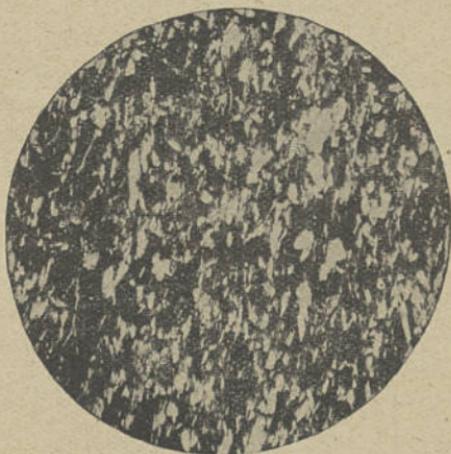


Fig. 16. — Cuivre écouli à 20 pour 100, attaque au perchlorure de fer.
(Grossissement 85 D.)

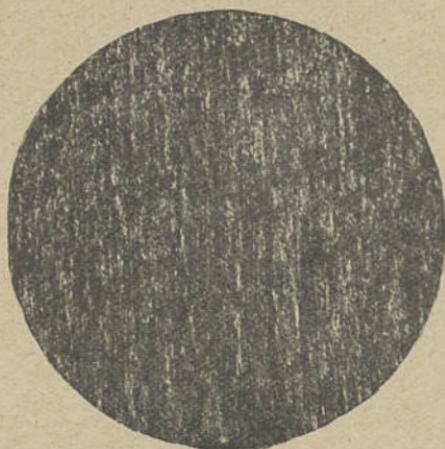


Fig. 17. — Cuivre écroui à 600 pour 100, attaque au perchlorure de fer.
(Grossissement 85 D.)

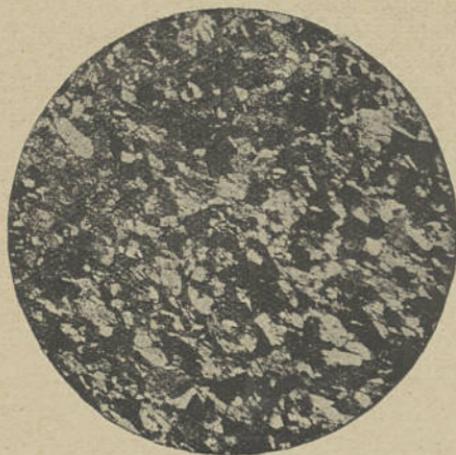


Fig. 18. — Cuivre recuit à 600°, attaque au perchlorure de fer.
(Grossissement 85 D.)



Fig. 19. — Cuivre recuit à 800°, attaque au perchlorure de fer.
(Grossissement 85 D.)



Fig. 20. — Cuivre recuit à 900°, attaque au perchlorure de fer.
(Grossissement 85 D.)

Nous verrons plus loin que le recuit modifie les propriétés mécaniques. Il modifie aussi l'aspect micrographique. On peut même, d'après la grandeur des cristaux, déduire approximativement la température à laquelle a été faite l'opération (*fig.* 18, 19, 20).

Nous dirons en passant que la trempe détermine la formation de constituants spéciaux, le microscope les révèle; on pourra donc, d'après l'aspect, tirer des conclusions sur le traitement subi par le métal. La cémentation augmente superficiellement la teneur en carbone d'un acier, le microscope décèlera cette teneur. Nous n'insisterons pas sur les précieux renseignements que donne cette méthode d'essais; nous prions les lecteurs de se reporter aux ouvrages nombreux qui traitent de cette science nouvelle et de ses applications. Il nous faut cependant dire quelques mots des principaux constituants dont nous aurons à parler au cours de cette étude, et que le microscope permet de reconnaître aisément.

Nous avons déjà cité pour les aciers : la ferrite ou fer pur (*fig.* 8), la cémentite ou carbure de fer Fe^3C , la perlite (*fig.* 6) qui est l'eutectique ferrite-cémentite et qui doit son nom à ce que, vu en lumière oblique, ce constituant a l'aspect de la nacre.

Il faut encore nommer la martensite, solution de carbone dans le fer, la sorbite qui correspond à une forme de la perlite dans laquelle les deux constituants ne peuvent être séparés, quel que soit le grossissement du microscope. Elle s'obtient en chauffant l'acier au-dessus du point de recalescence et en le laissant refroidir à une certaine vitesse sans toutefois aller jusqu'à la trempe.

Nous devons expliquer ce qu'est le point de recalescence. Le fer présente trois états allotropiques désignés par les lettres α , β , γ ; au-dessous de 770° , on a le fer α , fer magnétique ne dissolvant pas le carbone. Cette température transforme le fer α en fer β non magnétique et dissolvant le carbone; il reste à l'état β entre 770° et 917° , c'est le point A_3 ; alors le fer β se transforme en fer γ non magnétique et ne dissolvant pas le carbone.

Ces températures marquent des points de transformation qui s'observent particulièrement bien quand, notant en fonction du temps, la température d'un morceau de fer chauffé au rouge, on le

laisse refroidir de lui-même. On constate que non seulement il y a arrêt dans le refroidissement, mais que la transformation interne se produit avec un dégagement de chaleur tel que la température s'élève à nouveau très nettement pour redescendre ensuite régulièrement jusqu'au point suivant de transformation.

Le carbone dans le fer abaisse ces points de transformation ainsi :

Pour un acier à 0,02 de carbone, les points de transformation sont : $A_1 = 680^\circ$, $A_2 = 730^\circ$, $A_3 = 850^\circ$;

Pour un acier à 0,140 de carbone, $A_1 = 650^\circ$, $A_2 = 720^\circ$, $A_3 = 820^\circ$;

Pour un acier à 0,450 de carbone, $A_1 = 650^\circ$, A_2 et A_3 se confondent à 695° ;

Pour un acier à 1,250 de carbone, A_1 , A_2 et A_3 se confondent à 680° .

Une expérience réalisée simplement et très ingénieusement au laboratoire des Arts et Métiers permet de contrôler l'existence de ces points de transformation. Un fil de fer tendu horizontalement est relié à ses deux extrémités à un circuit électrique. Au milieu du fil repose un crochet léger permettant de soutenir une flèche pouvant osciller autour d'un point fixe et dans le plan vertical du fil lui-même. La pointe de la flèche, par conséquent, peut décrire un arc de cercle. Par le courant on porte le fil de fer au rouge. La dilatation le fait se détendre, le crochet s'abaisse, la pointe de la flèche descend. On coupe le courant, le fil se refroidit, il se tend, la flèche remonte.

On constate qu'à un certain moment, ce mouvement ascendant cesse et même s'inverse. Pendant ce temps, le fil redevient plus rouge comme si le courant le traversait à nouveau. Enfin la remontée reprend et deux autres arrêts analogues, mais moins marqués, peuvent s'observer. Ayant eu soin de tracer sur l'arc décrit par la pointe de la flèche les arrêts constatés, on remplace le fil de fer successivement par des fils d'acier ayant une teneur en carbone croissante, on renouvelle pour chacun d'eux la même expé-

rience. Les mêmes arrêts se produisent au refroidissement, mais en des points différents de l'arc. Il y aurait là un moyen pratique de déterminer par comparaison la teneur en carbone d'un fil.

Nous citerons encore trois autres constituants :

La martensite, qui est caractérisée par des aiguilles que l'on voit à un fort grossissement et qui sont orientées suivant trois directions. Elle est colorée par la teinture d'iode et par l'acide picrique. C'est le constituant des aciers trempés à l'eau à une température supérieure à celle de dissociation de la cémentite.

L'austénite, qui s'obtient quand on exagère les conditions de la trempe, par exemple en chauffant un acier à 1,10 pour 100 de carbone au-dessus de 1000° et en le trempant, à cette température, dans un bain inférieur à 0°.

La troostite est un constituant déterminé dans les aciers par une trempe à l'huile à température élevée.

2° **Macrographie.** — C'est un examen fait à très faible grossissement, ou même à l'œil nu, d'un produit poli. On opère en somme comme pour obtenir une micrographie, mais en poussant moins loin le soin donné au polissage. Cette méthode permet de déceler très rapidement certaines hétérogénéités, par exemple dans les aciers, la présence du soufre, du phosphore, des scories, des silicates notamment; enfin de toutes les impuretés qui s'accumulent dans le haut du lingot au voisinage de la poche de retassure au moment de la solidification. Les hétérogénéités provenant du traitement mécanique sont également observées par cette méthode d'examen, l'endroit de soudure de deux pièces (on reconnaîtra par ce procédé les tubes étirés sans soudure des tubes soudés), les déformations des fibres dans les rivets, dans les pièces forgées, laminées, étirées.

3° **Chaleur de formation.** — Nous ne ferons que citer cette méthode, car elle est d'une application très difficile, partant très restreinte.

Nous ne dirons rien non plus des essais chimiques; ils servent

avant tout à séparer et doser les constituants chimiques de composition bien déterminée; ainsi Moissan a pu isoler le carbure de fer Fe^3C par le courant électrique en utilisant comme anode une fonte et comme électrolyte une solution diluée d'acide chlorhydrique.

Nous insisterons, au contraire, sur les essais mécaniques qui ont une application plus directe dans notre étude.

ESSAIS MÉCANIQUES.

Les principaux sont : les essais de traction, de dureté, de choc, de compression, de flexion, de frottement ou d'usure, enfin les essais alternatifs.

Il est évident que la forme extérieure du produit métallurgique et la nature de l'effort qu'il aura à supporter pendant son utilisation déterminent le genre d'essais qu'on doit lui faire subir.

Ainsi les fils à haute résistance employés dans les câbles devront être essayés à la torsion et à la traction; les tôles seront soumises au pliage, au poinçonnage, au cisailage; les barres seront tractionnées.

Les essais n'ont évidemment pas pour but de déterminer les défauts du métal, car il faudrait dans ce cas, essayer la totalité du produit à étudier, mais simplement de donner des indications très précises sur les qualités de ce produit, dans les endroits sains, et ceci d'une manière générale.

Autrefois, on jugeait d'un métal par l'examen de sa cassure. On faisait aussi des essais de pliage et de choc, mais cela se pratiquait d'une façon bien peu scientifique. On pliait et redressait successivement une barre et, après un certain nombre d'opérations, on examinait comment le métal s'était comporté. Ou bien on jetait avec force la barre sur un coin de fer solidement fixé; lorsqu'elle se brisait le métal était déclaré fragile.

Une note du Ministre de la Guerre, en 1838, recommanda aux officiers chargés de la réception du matériel de ne pas trop se fier à l'examen des cassures et d'appliquer les essais de pliage et de

choc. Ce n'est qu'en 1860, lorsque David Kerkaldy eut étudié très soigneusement l'essai à la traction, que les ingénieurs des grands établissements commencèrent à entrevoir tout le parti qu'on en pouvait tirer.

Actuellement, les essais à la traction sont encore les plus employés.

Essais de traction. — Une éprouvette prise dans le métal à étudier est confectionnée au tour; sa forme et ses dimensions sont déterminées. On la place dans une machine qui exerce aux deux extrémités un effort longitudinal de traction. Ces essais sont trop connus pour que nous insistions sur les détails; nous rappellerons simplement que pendant l'essai, tandis que l'effort de traction augmente, on constate quatre périodes :

1^o *Période des allongements élastiques.* — Sous l'influence des efforts de traction l'éprouvette s'allonge, mais si l'effort cesse l'éprouvette reprend sa longueur primitive; il y a d'autre part proportionnalité entre les allongements et les efforts.

2^o *Période des allongements permanents.* — Ils sont beaucoup plus importants que les précédents et la proportionnalité n'existe plus.

3^o *Période de striction.* — L'effort de traction continuant à croître, l'éprouvette, qui jusque-là s'était déformée régulièrement, présente un phénomène plus ou moins accusé, en un point généralement unique : la section diminue, un étranglement se produit, c'est la striction.

4^o *Période de rupture.*

Ces essais définissent :

1^o *Charge de rupture à la traction R.* — C'est la charge maximum que peut supporter, par millimètre carré de section, le métal avant de se rompre.

R est évidemment le quotient de la charge totale R_T par la surface S de la section primitive de l'éprouvette (exprimée en millimètres carrés)

$$R = \frac{R_T}{S}.$$

2° *Limite élastique à la traction E.* — C'est la charge maximum qu'un millimètre carré de section peut supporter avant que les déformations ne deviennent permanentes.

Comme pour R :

$$E = \frac{E_T}{S}.$$

3° *Allongements A pour 100.* — C'est l'allongement présenté par l'éprouvette rompue, rapporté à la longueur initiale

$$A \text{ pour } 100 = \frac{L-l}{l} \times 100;$$

l est la longueur comprise entre deux points marqués à l'avance sur l'éprouvette; L , la longueur comprise entre ces deux mêmes points, quand, après rupture, on a rapproché, aussi parfaitement que possible, les deux parties de l'éprouvette brisée.

4° *Striction Σ .* — Elle traduit la déformation transversale, elle exprime donc la réduction de section de l'éprouvette

$$\Sigma = \frac{S-s}{S} \times 100,$$

s est la section la plus petite après rupture (généralement c'est la section de rupture elle-même).

5° *Module d'élasticité μ .* — C'est le rapport de la charge aux allongements dans la période des allongements élastiques; par conséquent, c'est le coefficient angulaire de la droite qui graphiquement les représente puisque nous avons dit qu'il y avait proportionnalité pendant cette période.

Nous ne décrivons pas les machines en usage; il y en a de verti-

cales et d'horizontales, certaines produisent l'effort par l'action d'un piston hydraulique ou par l'intermédiaire d'engrenages mis en mouvement par un moteur électrique. La mesure des efforts est faite soit par un manomètre, soit par un balancier qu'on maintient en équilibre au moyen d'un poids mobile le long de ce balancier; l'évaluation des allongements s'obtient par le déplacement d'une aiguille sur un cadran, cette aiguille étant en liaison par des fils avec les deux extrémités de l'éprouvette. Des diagrammes enregistrent d'ailleurs la pression et l'allongement correspondant pendant toute la durée de l'essai. Les autres mesures sont faites sur l'éprouvette elle-même.

Voici quelques résultats obtenus sur des métaux purs :

| Métal laminé et recuit. | Charge de rupture R. | Allon- gements A pour 100. |
|-------------------------------|----------------------------|----------------------------------|
| Nickel..... | 50 ^{kg} | 40 |
| Fer électrolytique..... | 30 | 40 |
| Platine..... | 25 | » |
| Cuivre..... | 22 | 50 |
| Zinc..... | 17 | » |
| Magnésium..... | 14 | 36 |
| Aluminium..... | 10 | » |
| Argent..... | 22 | 30 |
| Or..... | 11 | 40 |
| Étain..... | 8 | 30 |
| Plomb..... | 3 | » |

On peut noter que les fils d'acier dur trempés et écrous employés pour les cordes à piano, les tendeurs d'aéroplane, donnent le maximum pour R et pour E :

$$R = 220^{\text{kg}},$$

$$E = 210^{\text{kg}} \text{ à } 220^{\text{kg}},$$

mais l'allongement A pour 100 n'atteint pas toujours 2 pour 100; il est même souvent nul.

Il est intéressant, en particulier pour l'étude de l'étirage, de noter l'influence de la température pendant l'essai de traction. Dans la pratique, on opère à la température ordinaire.

Le laminage est réalisé à une température telle que la limite élastique soit faible et les allongements importants, mais il faut en outre une certaine marge, car la durée de l'opération entraîne une variation de la température du produit travaillé. Nous verrons que le fil d'acier sortant du laminoir (5^{mm} de diamètre) ou le fil de laiton (8^{mm} de diamètre), appelés *fils machine* , ne peuvent plus être laminés, ils se refroidissent trop vite. On les étire aisément au contraire, parce que cette opération se fait à température constante.

ESSAIS DE TRACTION DES ACIERS DOUX. — M. Frémont a présenté le 5 février 1923 à l'Académie des Sciences une Note sur les essais de traction des aciers doux dans laquelle il rappelle qu'au moment où la limite d'élasticité est atteinte, un arrêt et parfois même une chute brusque de l'effort se produisent, alors que l'allongement permanent de l'éprouvette tractionnée continue. Le diagramme enregistre par un décrochement ou un palier parallèle à la ligne des abscisses, c'est-à-dire des allongements, cette constance de l'effort pendant cette partie de l'essai.

Ce point sert généralement de mesure pour la limite élastique. La remarque peut paraître paradoxale. Dès qu'un métal subit une déformation permanente, il s'écroute et sa nouvelle limite d'élasticité est plus élevée que l'ancienne. Or pour l'acier doux, au lieu d'augmenter de résistance par suite de l'effort de traction, une fois la limite d'élasticité atteinte, on constate au contraire une diminution brusque de la résistance, suivie d'une constance que note le palier du diagramme. M. Frémont, dans des expériences très méticuleuses, s'est rendu compte des conditions dans lesquelles s'effectuent les déformations permanentes. Il existe deux types de déformation permanente : 1^o la déformation permanente graduée qui, à la limite d'élasticité, est très faible et augmente lentement, tandis que l'écroutissage correspondant du métal croît rapidement

comme les diagrammes l'indiquent ; 2^o la déformation permanente brusque qui, au contraire de la précédente, est très grande, même dès le début et dont l'érouissage correspondant est relativement faible.

La conséquence de l'allongement brusque est qu'il se produit dans une zone un rétrécissement sensible de la largeur de l'éprouvette soumise à l'essai de traction (dans les expériences de M. Frémont, ces éprouvettes étaient de sections rectangulaires).

Pour déformer d'une manière permanente les zones immédiatement voisines de celle de l'étranglement, il faudra un effort moindre que celui qui a été nécessaire pour produire la déformation permanente de la zone étranglée, puisqu'elles ont déjà subi une déformation intime, une déformation élastique, d'une façon graduée à partir de la zone rétrécie. Par suite, sous un effort moindre, la déformation permanente se propage de proche en proche; c'est l'explication du palier de diagramme. Après la déformation permanente totale sur toute la longueur de l'éprouvette, commence à s'effectuer une nouvelle déformation permanente, superposée à la première, et se propageant dans les mêmes conditions.

Une étude de la limite élastique et des déformations permanentes dans le cas de l'étrépage à travers une filière présenterait, au point de vue industriel, un très réel intérêt. Le cas se rattache d'ailleurs au précédent, mais il est plus complexe puisque le métal subit des déformations permanentes par compression et par traction en même temps.

LIMITE ÉLASTIQUE. — L'évaluation de la qualité des matériaux dépend des formules de la théorie de l'élasticité dont l'élément essentiel est le module d'élasticité. Ce module est une relation linéaire entre la charge et la déformation élastique dans la limite de proportionnalité des allongements et des efforts, ainsi que nous l'avons défini précédemment.

Les Allemands ont adopté comme définition de la limite élastique la charge limite à partir de laquelle les déformations permanentes apparaissent.

L'imperfection des appareils est cause que la limite d'élasticité proportionnelle et la limite élastique théorique ne coïncident pas.

La charge pour laquelle l'allongement continue à croître sans que la charge soit augmentée correspond à la limite d'élasticité apparente ou limite de fluidité qu'il ne faut pas confondre avec la limite d'élasticité proportionnelle. Cette dernière seule dans la pratique offre de l'intérêt; elle permet de juger de la bonne constitution d'un acier, elle caractérise la résistance au choc qui, rapportée à l'unité de volume, s'exprime par la formule

$$\frac{E^2}{2\mu};$$

E est la limite d'élasticité, μ le module d'élasticité.

On peut tirer de cette formule une explication du fait qu'un corps soumis à des tensions résiste mal à des chocs; en effet, cette résistance étant proportionnelle au carré de la limite d'élasticité se trouve en majeure partie déjà épuisée par l'effort de traction.

Nous signalerons les deux formules que les Américains Moore et Seely ont établies en 1915 pour le calcul de la résistance des matériaux soumis à des efforts répétés :

$$1^{\circ} \quad S = \frac{B}{[1 - Q]N^{\frac{1}{8}}};$$

Cette formule convient pour les cas où l'on veut une grande sécurité;

$$2^{\circ} \quad S = \frac{B}{(1 - Q)N^{\frac{1}{8}}} \times \left[1 + 0,015 N^{\frac{1}{8}} \right].$$

Dans ces formules, S est l'intensité de l'effort appliqué pour déterminer la rupture, Q le rapport entre les efforts maximum et minimum, N le nombre de ces efforts, B une constante fixée par l'expérience et qui dépend du métal.

Pour le cuivre durci étiré, B est pris = 140 000.

Pour le fil en acier dur trempé, $B = 600\ 000$.

Essais de dureté. — La dureté s'évalue soit par la méthode du scléroscope Schore, soit par la méthode à la bille de Brinell.

La première consiste à mesurer la hauteur du rebondissement d'un petit marteau terminé par un cône arrondi ou par une pointe de diamant, qui tombe d'une hauteur déterminée sur le métal à essayer. Cette méthode est moins employée que celle de Brinell dont l'industrie fait usage couramment. Le métal à essayer est simplement dressé; une bille d'acier pour roulement, de diamètre connu (généralement de 10^{mm}), est appliquée sur la surface sous une charge déterminée P.

La bille s'imprime dans le métal et la calotte sphérique ainsi obtenue est évidemment d'autant plus importante que le métal est plus mou. Soit *a* la surface exprimée en millimètres carrés de la calotte sphérique ainsi obtenue. Le chiffre de Brinell Δ est défini par la relation

$$\Delta = \frac{P}{a};$$

a est déterminé quand on connaît D le diamètre de la bille et *d* celui de l'empreinte dans le plan d'affleurement.

Il existe une relation entre R et Δ dans le cas des produits recuits :

$$R = C \times \Delta;$$

C est une constante caractérisant une même catégorie d'alliages.

Il existe plusieurs types d'appareils :

1^o Les appareils à levier où la pression est fournie par des poids;

2^o Les appareils à pression hydraulique;

3^o Les appareils à ressorts;

4^o Les appareils opérant par choc;

5^o Les appareils à pression directe ou à engrenages.

Une méthode nouvelle, par comparaison, présente l'avantage de n'utiliser qu'un appareil portatif. Le principe est le suivant : par un montage spécial, la bille s'appuie d'une part sur un morceau

de métal de résistance connue, disposé au-dessus d'elle; une tige rappelée par un ressort forme percuteur et peut agir sous l'influence d'un coup de marteau pour imprimer la bille dans le métal à essayer placé au-dessous d'elle; le même coup de marteau forme donc une empreinte dans l'étalon et dans l'échantillon. L'appareil est tel que la pression avec laquelle la bille s'applique reste constante, même si l'action du marteau est très violente. On mesure le diamètre des deux empreintes; les chiffres de Brinell sont sensiblement proportionnels aux carrés de ces diamètres; donc

$$\frac{\Delta_e}{\Delta_m} = \frac{D_m^2}{D_e^2},$$

d'où

$$\Delta_m = \Delta_e \times \frac{D_e^2}{D_m^2}.$$

Essais au choc. — Ils ont pour objet d'évaluer la plus ou moins grande fragilité du métal.

Ils se font par traction, par flexion, et par compression, mais les plus couramment effectués sont les essais au choc par flexion. Cependant, comme dans l'étirage et le tréfilage, la traction brusque marque le début de l'opération, il y aurait un grand intérêt à soumettre à des essais de ce genre les fils et les barres; d'ailleurs les pièces d'attelage des wagons sont essayées au choc par traction.

Autrefois l'essai au choc par flexion se faisait très simplement par l'action d'un mouton de poids déterminé tombant d'une hauteur également connue, au milieu d'un barreau reposant par ses deux extrémités sur deux couteaux. La mesure résultait du nombre de coups supportés par le barreau avant la rupture, ou bien de la flèche prise après un seul coup. Cette méthode, appliquée encore pour la fonte, ne donne pas de chiffres suffisamment précis; celle qui consiste à entailler les barreaux s'est répandue d'une façon très générale; le principe réside dans la mesure de la « résilience » qui est le nombre de kilogrammètres consommés pour rompre une éprouvette de forme déterminée, entaillée de façon définie

sur la face opposée à celle qui reçoit le choc; ce nombre de kilogrammètres étant rapporté au centimètre carré de section rompue.

L'association des méthodes d'essais, au Congrès de Copenhague, en 1909, a adopté divers types créés par Charpy et qui fixent les dimensions de l'éprouvette.

L'éprouvette normale a une section carrée de 30^{mm}, une lon-

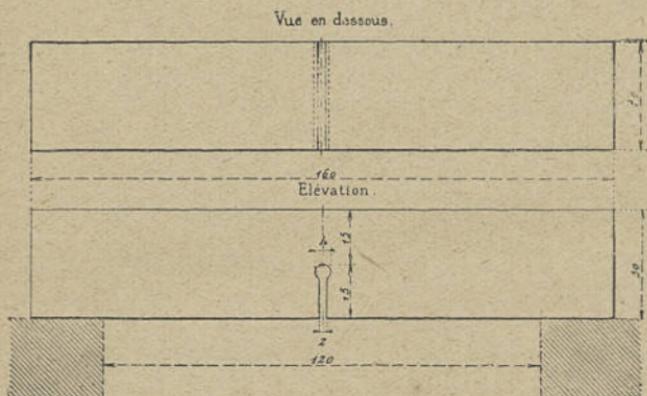


Fig. 21.

gueur de 160^{mm}; l'entaille est formée par un trou cylindrique tangent à l'axe de l'éprouvette, ayant 4^{mm} de diamètre, et débouché à l'extérieur par un trait de scie de 2^{mm} (fig. 21).

La Commission permanente de standardisation a adopté un type plus petit. La section est un carré de 10^{mm}, la longueur est de 55^{mm}, l'entaille a un fond cylindrique de 1^{mm} de rayon et une profondeur de 5^{mm}. L'énergie utilisée pour briser l'éprouvette est celle déterminée par la chute d'un mouton (appareil Frémont) ou celle produite par la rotation d'un volant portant sur sa jante un couteau venant frapper l'éprouvette qu'on lui présente quand la vitesse atteint un chiffre fixé (mouton rotatif de Guillery). Enfin, le pendule mouton de Charpy fournit un troisième type d'appareil; l'énergie provient de la chute d'un pendule dont la masse oscillante, en tombant de sa position initiale, vient frapper, par l'inter-

médiaire d'un couteau, l'éprouvette placée à la partie inférieure, à l'aplomb de l'axe de rotation.

Quel que soit l'appareil employé, le principe reste le même : connaître l'énergie totale utilisée, mesurer l'énergie résiduelle après le choc et la rupture, la différence donne l'énergie utilisée à briser l'éprouvette. Cette différence se lit d'ailleurs directement sur les graduations des appareils :

Voici quelques résultats d'essais faits sur des aciers au carbone, l'éprouvette étant du type de M. Mesnager (10 × 10 × 55, entaille 2 × 2 à fond rond) :

| Teneurs en carbone. | Résilience en kilogrammètres. | Angle des deux parties rapprochées après rupture. |
|---------------------------|-------------------------------------|--|
| Traces..... | 32 ✓ | éprouvette pliée non rompue |
| 0,2..... | 25 | 130° |
| 0,5..... | 15 | 150 |
| 0,7..... | 7 | 160 |
| 0,9..... | 2 | 170 |
| 1,1..... | 0 | 180 |

Dans l'étude du tréfilage, nous donnerons quelques détails sur les essais au choc appliqués aux fils.

Essais de compression. — Ils déterminent la charge de rupture à la compression, la limite d'élasticité à la compression, la contraction, l'expansion; ces deux derniers coefficients correspondent aux allongements et à la striction des essais de traction.

On utilise, en les faisant fonctionner en sens inverse, les machines de traction.

La charge de rupture R_c pratiquement est supérieure à celle à la traction R_t .

Pour les fontes, on admet le rapport

$$\frac{R_c}{R_t} = 1,4 \text{ à } 2.$$

Il n'a pas encore été possible d'établir une relation entre les limites d'élasticité à la traction et à la compression.

Essais de flexion. — Nous n'en dirons rien, car ils ne sont utilisés que pour les ressorts et pour les fontes.

Essais de torsion. — Rarement effectués sur les arbres et les vis, ils le sont davantage sur les fils. Leur interprétation est complexe. On détermine l'effort ou l'angle de rupture ainsi que l'effort ou l'angle pour lequel apparaît la déformation permanente.

Entre la résistance à la torsion et celle à la traction, un rapport a été trouvé variant de 0,82 à 1,60, suivant la forme du barreau, et selon que la barre est pleine ou creuse.

Les autres essais n'ont pas à être étudiés ici.

PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES.

Disons maintenant quelques mots sur les propriétés mécaniques des principaux produits susceptibles de supporter les opérations d'étirage. Il faut qu'ils possèdent avant tout une propriété particulière qu'on appelle la *ductilité*.

Théoriquement, tous les métaux peuvent être étirés; il suffit de donner la passe d'étirage convenable, mais dans la pratique cela conduirait parfois à des réductions si minimes de la section que le rendement serait industriellement inacceptable.

Les produits susceptibles d'être laminés sont presque tous propres à l'étirage; ceci n'est pas général cependant, et il est préférable de dire que tous ceux qui présentent des allongements importants, après l'essai de traction, supportent facilement un étirage comportant une réduction notable de la section.

Cette réduction sera d'autant plus importante que le produit fournira de plus grands allongements à l'essai à la traction.

En un mot, les produits fragiles ne s'étirent pas en général.

Nous verrons plus loin que l'écouissage réduit la valeur des allongements; aussi, après une série d'étirages, faudra-t-il, pour certains produits, procéder à un recuit qui leur fera retrouver la faculté de donner les allongements qu'ils avaient primitivement ou, ce qui revient à peu près au même, leur fera perdre la fragilité acquise par eux à la suite des opérations d'étirage.

La grande ductilité du platine a permis de tirer de ce métal des fils ayant $\frac{1}{1200}$ de millimètre de diamètre. Pour arriver à un tel résultat, on enveloppa un fil de platine de $\frac{1}{4}$ de millimètre avec une feuille d'argent, et on le tréfila. Par une attaque à l'acide azotique, l'argent fut ensuite dissous et l'on obtint un fil dont le kilomètre pesait 5^{es}. Avec l'or, on a pu préparer un fil ayant 3000^m de longueur et ne pesant que 1^g.

Pour l'étirage, les aciers les plus employés sont les aciers extra-doux, doux, demi-doux et demi-durs. Voici les compositions et les propriétés mécaniques de ces différentes séries :

| Désignation. | Teneurs en carbone pour 100. | Charges | | |
|------------------------|------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| | | de rupture. (en kg). | Limites élastiques (en kg). | Allon- gements pour 100. |
| Aciers extra-doux..... | 0,050 à 0,150 | 32 à 38 | 20 à 24 | 34 à 28 |
| » doux..... | 0,150 à 0,250 | 38 à 46 | 24 à 28 | 28 à 25 |
| » demi-doux..... | 0,250 à 0,400 | 46 à 55 | 28 à 32 | 25 à 22 |
| » demi-durs..... | 0,400 à 0,600 | 55 à 65 | 32 à 38 | 22 à 18 |

On utilise aussi, pour la confection des câbles à haute résistance, les aciers durs et extra-durs dont voici les teneurs en carbone et les résultats qu'ils donnent dans les essais de traction :

| Désignation. | Teneurs en carbone pour 100. | Charges | | |
|-------------------|------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| | | de rupture (en kg). | Limites élastiques (en kg). | Allon- gements pour 100. |
| Aciers durs..... | 0,600 à 0,700 | 65 à 75 | 38 à 45 | 18 à 14 |
| » très durs..... | 0,700 à 0,800 | 75 à 85 | 45 à 50 | 14 à 8 |
| » extra-durs..... | 0,800 et plus | 85 à 100 | 50 à 55 | 8 à 5 |

Les laitons, c'est-à-dire les alliages cuivre-zinc, convenant à l'étirage, sont les suivants :

| Compositions de quelques types. | | Charges de rupture | Allon- gements | Stric- tion. | Angle de torsion. | Usages. |
|---------------------------------------|-------|--------------------------|-------------------|-----------------|-------------------------|--|
| Cuivre. | Zinc. | (en kg). | p. 100. | | en degrés. | |
| 60 | 40 | 35 | 35 | 84 | 201,8 | Fils et barres pour le décolletage. |
| 62 | 38 | 30 | 40 | 83 | 229,8 | |
| 65 | 35 | 28 | 42 | 75 | 256,8 | Fabrication des tubes. |
| 67 | 33 | 25 | 45 | 85 | 202,3 | Fils fins. |
| 70 | 30 | 23 | 48 | 79 | 268,7 | Fabrication des tubes. |

En résumé, les fils de laiton ordinaire et les barres pour décolletage contiennent de 55 à 72 pour 100 de cuivre, et les tubes de 65 à 70 pour 100.

Nous donnons, pour compléter ces renseignements sur les propriétés des cuivres et laitons employés par les Compagnies de chemins de fer, la marine et l'artillerie, quelques types de cahiers des charges (tableaux des pages 38 et 39).

La Compagnie des chemins de fer du Midi essayait autrefois les fils de la façon suivante : le fil était enroulé sur un mandrin cylindrique de 15^{mm} de diamètre, les spires se touchant, le mandrin était ensuite remplacé par un autre de 18^{mm} de diamètre au minimum, ceci pour un fil de 1^{mm},5; pour 1^{mm}, l'épreuve était la même, mais les diamètres des mandrins étaient de 10^{mm}, puis 12^{mm}.

En plus des indications qui précèdent, il y a d'autres stipulations extrêmement variées, du genre de celles-ci : le métal fournira à l'analyse une composition déterminée; les diamètres des fils, par exemple, seront compris entre deux limites (dont la différence n'est que de quelques centièmes de millimètre); les couronnes seront d'un seul brin et pèseront tant de kilos; la surface sera lavée après la dernière passe d'étirage; elle sera exempte d'oxydes, rayures, pailles, criques; les extrémités seront nettes, sans bavures, etc.

| DÉSIGNATION. | NORD. Fil de cuivre. | NORD. Fil de laiton. | ARTILLERIE. Fil de cuivre. | ARTILLERIE. Fil de laiton. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--|-------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------|----|----|---|---|---|----|-----|------|------|------|------|------|------|---|----|----|----|----|----|
| Métal (composition). | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Essais de traction. | <p>Résistance par millimètre carré, Allongemens pour 100.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Fils de</th> <th>Moyennes.</th> <th>Minima.</th> <th>Moyens.</th> <th>Minima.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>15/10</td> <td>45^{kg}</td> <td>40^{kg}</td> <td>2</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>4^{mm}</td> <td>40</td> <td>36</td> <td>3</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>35</td> <td>30</td> <td>5</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>30</td> <td>25</td> <td>6</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>11</td> <td>25</td> <td>20</td> <td>15</td> <td>12</td> </tr> </tbody> </table> | | | | Fils de | Moyennes. | Minima. | Moyens. | Minima. | 15/10 | 45 ^{kg} | 40 ^{kg} | 2 | 1 | 4 ^{mm} | 40 | 36 | 3 | 2 | 5 | 35 | 30 | 5 | 4 | 6 | 30 | 25 | 6 | 5 | 11 | 25 | 20 | 15 | 12 |
| Fils de | Moyennes. | Minima. | Moyens. | Minima. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15/10 | 45 ^{kg} | 40 ^{kg} | 2 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 ^{mm} | 40 | 36 | 3 | 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | 35 | 30 | 5 | 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | 30 | 25 | 6 | 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | 25 | 20 | 15 | 12 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Pliages | 5 pliages à 90° | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DÉSIGNATION. | POSTES ET TÉLÉGRAPHES. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Métal (composition). | Fil de cuivre rouge de haute conductibilité. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Essais de traction | Cuivre rouge. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Pliages | Fils de | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Résistance électrique à 0° par km (en ohms) | <table border="1"> <thead> <tr> <th>2^{mm}.</th> <th>3^{mm}.</th> <th>3^{mm}.</th> <th>4^{mm}.</th> <th>5^{mm}.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>44^{kg}, 6</td> <td>43^{kg}, 8</td> <td>39^{kg}, 6</td> <td>42^{kg}, 5</td> <td>34^{kg}, 1</td> </tr> </tbody> </table> <p>par millimètre carré (allongement maximum : 2 %).</p> <table border="1"> <tbody> <tr> <td>6</td> <td>5</td> <td>7</td> <td>6</td> <td>5</td> <td>4</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>5,3</td> <td>3,39</td> <td>2,36</td> <td>1,73</td> <td>1,33</td> <td>1,05</td> <td>0,85</td> </tr> </tbody> </table> | | | | 2 ^{mm} . | 3 ^{mm} . | 3 ^{mm} . | 4 ^{mm} . | 5 ^{mm} . | 44 ^{kg} , 6 | 43 ^{kg} , 8 | 39 ^{kg} , 6 | 42 ^{kg} , 5 | 34 ^{kg} , 1 | 6 | 5 | 7 | 6 | 5 | 4 | 4 | 5,3 | 3,39 | 2,36 | 1,73 | 1,33 | 1,05 | 0,85 | | | | | | |
| 2 ^{mm} . | 3 ^{mm} . | 3 ^{mm} . | 4 ^{mm} . | 5 ^{mm} . | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 44 ^{kg} , 6 | 43 ^{kg} , 8 | 39 ^{kg} , 6 | 42 ^{kg} , 5 | 34 ^{kg} , 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | 5 | 7 | 6 | 5 | 4 | 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5,3 | 3,39 | 2,36 | 1,73 | 1,33 | 1,05 | 0,85 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

BARRES DE LAITON.

| DÉSIGNATION. | MARINE. Barres de laiton. | MARINE. Barres métal naval. | ARTILLERIE. Barres laiton à décoller. |
|---------------------|--|---|---|
| Métal. | Métal contenant 2 % de plomb et quelques millièmes d'étain. | Cuivre 62 % ; Étain 1 % ; Zinc 37 % . | Cuivre 60 à 62 % ; plomb 1 à 1,5 % ; zinc 35 à 40 % ; mat. étr. moins de 0,2 % . |
| Tolérances. | Plus ou moins 3,10 % | Moins de 0 ^{mm} ,5 sur le diamètre ; plus ou moins 5 ^{mm} ,2 sur la longueur. | Plus ou moins 50 ^{mm} sur la longueur ; plus ou moins 0 ^{mm} ,2 sur le diamètre. |
| Essais de traction. | Résistance $R = 30^{kg}$ Allongement $A = 40 \%$ Avec compensation de 1 ^{kg} de R par 2 % de A et <i>vice versa</i> sans descendre au-dessous de : $R = 28^{kg}$, $A = 36 \%$ Essais sur des éprouvettes de $100L \times 150mm^2 S$. | $R = 35^{kg}$, $A = 10 \%$. Toutefois un déficit de 3 ^{kg} sur R peut être compensé par un excès d'allongement de 3 % . | |
| Essais divers. | On prend les bouts de barre dont la longueur sera égale à 20 fois le calibre ou l'épaisseur, et on les enroulera à froid en forme d'anneau circulaire; il ne devra se manifester, dans ce travail, ni pailles, ni fentes, ni gerçures ou autres défauts. On exécutera sur quelques barres des soudures bout à bout. | | <i>Essais de décapage.</i> Les barres seront plongées dans un bain alcalin à 100°, puis décapées à l'acide nitrique, elles seront ensuite exposées à l'air pendant une heure ou deux. Cette opération ne devra faire apparaître sur les barres ni criques ni fentes ni pailles. |

Nous ne pouvons reproduire ici la multitude des exigences de l'industrie qui figurent dans ces cahiers des charges et qui sont appropriées à la destination.

Les bronzes ordinaires, c'est-à-dire les alliages cuivre-étain susceptibles d'être étirés, contiennent au moins 90 pour 100 de cuivre, car, sans cela, ils ne présenteraient pas un allongement suffisant.

Voici des résultats d'essais à la traction pratiqués sur différents types :

| Composition. | | Charge de rupture (en kg). | Limite élastique (en kg). | Allon- gements pour 100. | Essais au choc. | Essais |
|--------------|---------|----------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|-----------------------|---|
| Cui. re. | Etai r. | | | | | de dureté à la pression de 500 ^{kg.} |
| 95 | 5 | 19,2 | » | 20 | 9 | 65 |
| 91 | 9 | 25,4 | 10,3 | 19,5 | 7 | 76 |
| 89 | 11 | 26,3 | 12,7 | 16 | 5 | 88 |
| 87 | 13 | 25,4 | 13,7 | 3 | 3 | 95 |
| 84 | 16 | 25 | 17 | 1,4 | 0 | 117 |
| 79 | 21 | 20 | 20 | 0 | 0 | 140 |

Les types les plus courants sont :

1^o Cuivre = 96; étain = 4;

2^o Cuivre = 92; étain = 8.

Les bronzes à faible teneur en étain donnent à l'étirage certaines particularités bien connues des praticiens; elles doivent être rapprochées des résultats que fournissent sur ces alliages les essais mécaniques. En effet, entre 85 et 95 pour 100 de réduction, on note des anomalies dans les essais à la traction et à la dureté. Les propriétés mécaniques sont altérées, alors que pour des réductions moindres les résultats suivent des modifications régulières.

CHAPITRE II.

RECUIT ET ÉCROUISSAGE.

Considérations générales. — Dans le Chapitre précédent nous n'avons pour ainsi dire pas parlé de l'influence du recuit et de l'écroissage sur les propriétés des produits métallurgiques. Elle joue un rôle si important dans l'étirage qu'il nous a paru nécessaire de l'étudier à part.

Le recuit est un traitement thermique qui consiste à porter un produit métallurgique à une température élevée, variable suivant la composition, dans le but de modifier certaines propriétés.

L'écroissage est un traitement mécanique qui consiste, soit dans le martelage à froid, soit dans le passage à la filière ou au lami-noir, et qui a pour conséquence de rendre le produit à la fois plus dense et plus élastique.

Nous trouverons plus loin d'autres définitions de ces traitements.

Ils déterminent deux états particuliers : l'état recuit, l'état écroi.

Le recuit complet a pour effet de détruire totalement les propriétés que les traitements mécaniques ou physiques ont pu produire antérieurement.

Au point de vue du degré d'écroissage, deux points sont à considérer :

1^o Tous les traitements mécaniques ne donnent pas le même résultat ;

2^o Il existe une limite d'écroissage, comme l'a montré M. André

Le Chatelier, qui est pratiquement atteinte pour une déformation relativement faible; limite impossible à dépasser quelle que soit la déformation ultérieurement réalisée. Lorsque ce degré est atteint, la charge de rupture est double de celle que présentait le métal après recuit complet, c'est-à-dire dans un état d'écrouissage nul.

Voici quelques exemples :

| Métaux. | Charges de rupture | |
|----------------|-----------------------|----------------------------|
| | après recuit complet. | après écrouissage complet. |
| | kg | kg |
| Cuivre..... | 25 | 51 |
| Nickel..... | 55 | 108 |
| Aluminium..... | 12 | 25 |
| Argent..... | 18 | 38 |
| Cadmium..... | 2,5 | 5 |

Ces chiffres semblent cependant un peu élevés à M. Guillet, tout au moins pour le cuivre et le nickel. Il faudrait admettre 21^{kg} au lieu de 25 pour le premier, et 50^{kg} au lieu de 55 pour le second.

L'étirage détermine un état d'écrouissage plus avancé que le laminage, c'est-à-dire que la charge de rupture et la limite élastique sont moins élevées après celui-ci qu'après celui-là. Les allongements, eux, au contraire, sont plus grands.

Voici, par exemple, un laiton qui donne les chiffres suivants :

| Propriétés mécaniques. | Brut de coulée. | Brut d'étirage | | |
|---------------------------|--------------------|--|--|---|
| | | Laminé à chaud étiré et recuit. | Brut de laminage c'est-à-dire non recuit. | (étirage pratiqué après laminage). |
| R..... | 37 ^{kg} | 45 ^{kg} | 49 ^{kg} | 57 ^{kg} |
| E..... | 17 ^{kg} | 18 ^{kg} | 22 ^{kg} | 27 ^{kg} |
| A..... | 25 % | 30 % | 25 % | 12 % |

Il est évident que l'influence de l'écrouissage se fait d'autant

plus sentir que la passe d'étirage, c'est-à-dire la réduction de la section, est plus forte,

Les impuretés contenues dans les alliages élèvent la limite d'écroissage. Voici ce que M. André Le Chatelier dit à ce sujet :

« On observe que, pour certains alliages, l'écroissage reste limité comme pour les métaux simples, c'est le cas du maillechort et du laiton; ces produits se tréfilent indéfiniment sans recuit, à condition que chaque passage à la filière ne produise qu'une faible réduction du diamètre; d'autres, au contraire, en particulier les bronzes d'étain, les bronzes et les laitons d'aluminium, les alliages de cuivre et d'argent, etc., se comportent tout différemment : chaque passage à la filière augmente leur résistance et diminue leur malléabilité, et l'on arrive rapidement à un état où le métal est complètement fragile et ne peut plus se tréfiler; ainsi, pour les bronzes à 10 pour 100 d'étain ayant, après recuit complet, une résistance de 36^{kg}, la résistance croît régulièrement à chaque passage à la filière; mais je n'ai pu dépasser le chiffre de 125^{kg}, le métal étant devenu trop brisant et n'ayant plus aucune malléabilité. »

Pour le recuit, voici les résultats auxquels M. Le Chatelier est arrivé :

1^o Le recuit ne détermine pas un phénomène instantané. Les effets s'accroissent progressivement à mesure que sa durée augmente. Les transformations dont il est la cause, rapides au début, deviennent de plus en plus lentes, de telle sorte que la diminution d'écroissage tend vers une limite déterminée à chaque température.

2^o Cette limite de l'écroissage est d'autant plus faible et est pratiquement d'autant plus rapidement atteinte que la température du recuit est plus élevée;

3^o Le recuit peut être considéré, dans la pratique, comme complet, à partir d'une certaine température au-dessus de laquelle la charge de rupture ne subira plus aucune diminution. Cette charge

de rupture aura alors atteint la valeur la plus petite qu'un même métal puisse présenter. Au-dessus de cette température, il peut se produire ce que M. Le Chatelier a appelé « la cristallisation par recuit », phénomène qui s'accroît avec la durée; elle a pour effet de diminuer la striction, la charge de rupture et l'allongement, le métal se rapprochant de l'état qu'il avait après simple fusion.

4°. Les impuretés retardent l'effet du recuit. La limite de ce dernier, à une température déterminée, sera donc atteinte plus rapidement par un métal pur que par ses alliages. De même, le recuit complet sera obtenu à une température plus basse.

5° La cristallisation par recuit, dont nous venons de parler, est due aux impuretés contenues, dont le point de fusion est inférieur à celui du métal ou encore à celles qui forment avec lui des composés plus fusibles.

Examinons l'influence du recuit sur les aciers.

Un acier écroui s'adoucit lorsqu'on le porte à une température assez élevée. Si l'on prolonge cette action, le métal devient très cristallin, ne possède plus aucun allongement et présente une grande fragilité. Il existe une température qui joue un grand rôle dans les transformations causées par l'échauffement et le refroidissement du fer et des aciers; c'est le point de recalescence. Lorsqu'on laisse refroidir lentement une barre d'acier portée à 900°, il se produit à une température déterminée un phénomène moléculaire qui est marqué par une augmentation d'éclat de la barre, d'où le nom de recalescence. Ce phénomène, que nous avons déjà signalé, est la reconstitution, amenant un dégagement de chaleur, du carbure de fer Fe^3C , appelé *cémentite*, qui s'était dissocié pendant l'échauffement, la cémentite se décomposant en fer et carbone à la température de 700°. De sorte que si l'on chauffe un acier à 0,850 pour 100 de carbone contenant, à la température ordinaire, de la cémentite, celle-ci se dissocie en fer et en carbone dissous dans le fer.

« L'acier chauffé à des températures notablement supérieures

au point de recalescence, dit Stansfield (1), devient fragile par le fait de deux phénomènes différents qui se superposent : d'une part, les grains augmentent dans le métal surchauffé, mais par un chauffage ultérieur à une température peu supérieure à celle du point de recalescence, on peut restaurer la qualité première de l'acier. Mais un chauffage plus prolongé, à une température plus élevée, entraîne une altération du métal, qui ne peut plus être effacée par le même procédé. Ce métal est *brûlé*. »

La *brûlure* est produite par une fusion partielle accompagnée le plus souvent d'oxydation, car cette fusion détermine certains dégagements gazeux qui donnent lieu à des vides offrant une grande facilité d'action à l'oxygène.

Avant cette fusion partielle, l'acier subit une transformation qui fait dire dans l'industrie qu'il y a brûlure, même lorsque le phénomène ne s'est pas encore produit, cela tient à ce que le métal a déjà perdu ses qualités par ce surchauffage, mais nous venons de voir qu'on peut le régénérer par un recuit à une température bien déterminée (légèrement supérieure au point de recalescence).

La brûlure proprement dite, c'est-à-dire la fusion partielle, peut présenter trois caractéristiques :

1^o La fusion a simplement produit la ségrégation du carbone dans les joints des cristaux. On peut régénérer l'acier, dans ce cas, par un recuit à température élevée, suivi d'un rechauffage au point de recalescence pour détruire le surchauffage;

2^o La fusion a été accompagnée de liquation et a produit des défauts. Le forgeage peut seul rendre au métal ses qualités premières;

3^o La fusion a eu lieu avec liquation profonde et oxydation dans les défauts. La régénération est ici à peu près impossible.

Recuit spontané. — Un métal écroui par un traitement méca-

(1) *Iron and Steel Institute*, septembre 1903.

nique quelconque se recuit de lui-même peu à peu sous l'influence du temps. On constate, en effet, que la malléabilité augmente et que, parfois même, la charge de rupture diminue. Ainsi, on a observé que des fils de cuivre ou d'argent, écrouis au maximum, avaient, après plusieurs heures, une résistance inférieure de 3^{kg} à 4^{kg} à celle qu'ils présentaient immédiatement après le tréfilage. C'est ce qui explique l'existence de la limite d'écrouissage, limite qui joue un grand rôle dans la pratique puisqu'elle permet de déformer indéfiniment les métaux simples.

En effet, à partir d'un certain moment, tout accroissement du degré d'écrouissage, résultant de nouvelles déformations, est détruit par le recuit spontané. On peut faire de très curieuses expériences à ce sujet sur du fil de cuivre : si l'on veut réduire trop fortement la section à chaque passe de tréfilage, après un petit nombre d'opérations, le fil casse, car il a perdu, par suite de l'écrouissage, une partie de sa malléabilité. Lorsque la réduction est moins grande, il casse encore si les passes sont faites sans interruption. Mais si on laisse 10 minutes d'intervalle entre deux opérations successives, on peut réaliser la même réduction de section que dans le cas précédent et continuer la succession des tréfilages aussi longtemps qu'on voudra.

On voit donc que le temps, à la façon de la température, exerce une influence remarquable sur les propriétés mécaniques des métaux. On en tire deux conclusions très intéressantes :

1^o La charge de rupture d'un métal, à une température déterminée, est d'autant plus élevée que la vitesse de traction est plus grande;

2^o La déformation d'un métal sous l'influence d'une charge ne se produit pas instantanément, elle continue à croître sous l'influence du recuit spontané, mais conformément aux lois du recuit que nous avons énoncées.

M. Le Chatelier a observé qu'un fil de zinc pouvait supporter, pendant 2 ou 3 secondes, une charge de 20^{kg} par millimètre

carré de section et 6^{kg} seulement pendant 11 secondes en donnant progressivement, sous l'influence du recuit spontané, 173 pour 100 d'allongement.

L'état d'érouissage peut être évalué par suite de la correspondance qui existe entre la limite élastique d'un métal éroui et l'effort qu'il a supporté pour arriver à cet état. Une loi parfaitement vérifiée par l'expérience a été exprimée ainsi :

« La limite d'élasticité acquise par un métal déformé est précisément égale à l'effort qui a produit cette déformation. »

Voici quelques chiffres qui en montrent l'exactitude :

Correspondance entre l'état d'érouissage et la limite élastique.

| Charges supportées antérieurement. | Limites élastiques. |
|---------------------------------------|------------------------|
| kg | kg |
| 1000..... | 1003 |
| 2000..... | 2001 |
| 2500..... | 2514 |
| 2600..... | 2588 |
| 3000..... | 2977 |
| 3500..... | 3511 |

M. Charpy a étudié très complètement l'influence du recuit sur les laitons. Nous allons résumer brièvement les principaux résultats de cette intéressante et remarquable étude.

Le phénomène du recuit présente quatre périodes :

- 1° Les propriétés du métal ne subissent aucune influence;
- 2° L'état d'érouissage diminue, et cela d'autant plus que la limite est plus élevée;
- 3° Les propriétés restent constantes et le maximum de malléabilité est atteint;
- 4° Le métal acquiert des propriétés nouvelles (diminution des allongements et de la charge de rupture); il est brûlé.

Exemple :

| Laiton (Cu = 70; Zn = 30). | |
|----------------------------|-----------------------|
| Température du recuit, | Charge de rupture. |
| ° | kg |
| 0..... | 49,5 |
| 200..... | 51,2 |
| 280..... | 46,5 |
| 420..... | 34 |
| 500..... | 34 |
| 560..... | 30 |
| 600..... | 27,5 |
| 650..... | 27,5 |
| 730..... | 29,3 |
| 780..... | 28,7 |
| 800..... | 28,7 |
| 850..... | 27,5 |

Mais ces résultats paraissent varier très sensiblement avec les impuretés contenues dans le métal, aussi peut-on résumer les lois du recuit de la façon suivante, lorsqu'il s'agit d'alliages purs :

Partant d'un métal complètement écroui à une température donnée, c'est-à-dire se rompant sans déformation aucune, on obtient, en élevant progressivement la température, d'abord une diminution graduelle de la charge de rupture, une augmentation correspondante de l'allongement, puis, au-dessus d'une certaine température, la charge et l'allongement restent constants jusqu'à une petite distance du point de fusion. Cette zone de recuit complet est d'une étendue de plus en plus petite, à mesure que la teneur en zinc augmente, la limite inférieure s'élevant en même temps que s'abaisse la limite supérieure par suite de l'abaissement du point de fusion ⁽¹⁾. Nous reprendrons la question plus loin.

(1) Léon GUILLET, *Étude industrielle des alliages métalliques*.

Le tableau suivant reproduit les chiffres trouvés par M. Charpy, relatifs à l'état de recuit complet.

Propriétés mécaniques de quelques laitons

| Compositions. | | Charge de rupture. | Allongements pour 100. | Strictions. |
|-------------------|---------------------|-----------------------|---------------------------|-------------|
| Zinc pour 100. | Cuivre pour 100. | | | |
| 0,0 | 100 | 21,84 ^{kg} | 31,61 | 66 |
| 10,1 | 89,9 | 24,10 | 36 | 56 |
| 14,3 | 85,7 | 24 | 43,80 | » |
| 18,4 | 81,6 | 26,80 | 41,40 | 53 |
| 20,2 | 79,8 | 27,20 | 47,20 | » |
| 27,1 | 72,9 | 32,40 | 57,50 | 52 |
| 29 | 71 | 27,80 | 53,70 | » |
| 30,2 | 69,8 | 28,90 | 56,70 | 57 |
| 32,3 | 67,7 | 32,10 | 55,70 | 54 |
| 34,7 | 65,3 | 31,70 | 52,10 | 54 |
| 37,6 | 62,4 | 37 | 48 | 52 |
| 40,4 | 59,6 | 38,40 | 35,20 | 58 |
| 41,7 | 58,3 | 42,40 | 33,90 | 60 |
| 44,7 | 55,3 | 48 | 18,30 | 87 |
| 49,7 | 50,3 | 10 | 2 | 97 |

L'examen d'un métal dans cet état permet de fixer d'une façon précise les propriétés mécaniques.

D'autres expériences ont été faites sur les mêmes laitons par application des méthodes d'essais au choc, à la compression, etc., et ceci a permis à M. Charpy d'établir les conclusions suivantes :

« Il sera bon, dans la pratique, de ne pas dépasser une proportion de 45 pour 100 de zinc, à cause de l'apparition de la fragilité; d'autre part, il n'y aura aucun intérêt à employer des alliages contenant moins de 30 pour 100 de zinc qui deviennent plus coûteux et dans lesquels on a, à la fois, moins de résistance et moins de malléabilité (dans certains cas, cependant, on cherche à obtenir des

colorations particulières, on y arrive en utilisant des laitons à très faible teneur en zinc). En faisant varier la proportion de zinc entre 30 et 43 pour 100, on aura toute une série de métaux de nuances différentes, le plus malléable ayant jusqu'à 60 pour 100 d'allongement, avec une résistance à la rupture de 27 à 28^{kg}, le plus tenace ayant encore plus de 40 pour 100 d'allongement avec une résistance de 37 à 38^{kg}, en ne considérant que l'état de recuit complet; avec un emploi judicieux du recuit et de l'écroutissage, on pourra augmenter la résistance jusqu'à 60^{kg} environ pour les barres et les tôles et atteindre beaucoup plus pour les fils. »

Écroutissage. — L'étude de l'écroutissage est très complexe et jusqu'ici incomplète. Nous allons essayer de résumer les principaux travaux et les conclusions importantes auxquelles on est arrivé.

Une définition de l'écroutissage est la suivante :

C'est le résultat de l'opération qui détermine un changement permanent de la forme du métal à une température inférieure à la température critique.

Nous considérons seulement l'acier doux à faible teneur en carbone; prenons un fil de cette substance que nous allons écrouter par torsions en opérant dans les deux sens.

Remarquons que l'écroutissage par tension ou par compression représente le même phénomène, mais réalisé par des efforts de sens opposé. De sorte que dans les tractions et compressions on retrouve les mêmes modifications que dans les torsions, puisque ces dernières peuvent se faire dans les deux sens, alternativement.

Nous savons que la limite élastique est la force pour laquelle la courbe représentative des efforts et des déformations cesse d'être une droite.

La limite d'étirage ou la limite d'élasticité apparente est la force par laquelle l'acier commence à se déformer rapidement pour des augmentations très faibles de la force agissante.

Ce point n'est pas très nettement marqué comme le précédent sur le diagramme.

Les effets de l'écroissage ne dépendent pas des procédés qui ont déterminé les déformations. La traction à froid augmente la limite d'élasticité de traction, de même que la compression à froid élève la limite d'élasticité de compression.

Si l'on fait subir une compression et une traction, la limite d'élasticité après compression est la même que celle après compression et traction, cependant la limite d'étirage est un peu plus élevée.

Influence du temps et de la température sur l'acier écroi à froid.

A. Essais dans le sens de l'effort d'écroissage et immédiatement après l'écroissage :

1^o La limite élastique est abaissée au-dessous de sa valeur primitive, et la limite d'étirage atteint à peu près la valeur de l'effort auquel l'écroissage a été arrêté.

2^o Si l'échantillon n'est laissé au repos qu'un court espace de temps, la limite d'étirage est augmentée, mais l'élasticité n'est pas améliorée.

3^o Si l'échantillon a subi un revenu dans l'eau bouillante, l'élasticité de l'acier est améliorée et la limite d'étirage est augmentée de 10 à 20 pour 100 au-dessus de l'effort auquel l'écroissage a été arrêté.

En laissant un certain temps de repos après l'écroissage, l'élasticité est améliorée dans les mêmes proportions que si l'acier avait subi un recuit à basse température; c'est ce qu'on appelle le *recuit spontané*.

B. Dans une direction opposée à l'effort d'écroissage :

L'action du temps et du revenu est beaucoup plus prononcée.

Si l'on fait subir à un échantillon d'acier un effort brusque, on obtient un certain allongement. Si cet effort agit pendant une heure,

on a le même allongement, ce qui démontre que l'influence de l'écroutissage sur les propriétés élastiques de l'acier est fonction des déformations et indépendant des efforts. En faisant revenir les échantillons dans l'eau bouillante, on trouve la même valeur à peu près pour la limite élastique.

Lois. — 1^o. Quand de l'acier doux est écroui et laissé après cet écroutissage un certain temps en repos, si on le soumet au revenu, et si ensuite on l'essaie dans le même sens que l'effort qui a déterminé l'écroutissage, la limite d'élasticité est élevée de plus de 100 pour 100.

2^o Quand de l'acier doux a été écroui dans une direction et laissé en repos ou revenu dans des conditions appropriées, puis soumis à des essais dans l'un ou l'autre des deux sens d'une direction différente à celle ayant déterminé l'écroutissage, sa limite d'élasticité peut être augmentée de 50 pour 100.

3^o Quand de l'acier doux a été écroui dans un sens, laissé en repos, ou revenu dans des conditions appropriées, puis soumis enfin à des essais dans le sens opposé, la limite d'élasticité atteint sa valeur primitive, mais la limite d'étirage est augmentée.

4^o Quand de l'acier doux est écroui dans un sens quelconque et essayé dans une direction ou dans un sens quelconque sans repos, ni revenu, la limite d'élasticité tombe alors au-dessous de la valeur de la limite d'élasticité primitive, elle peut même devenir nulle.

5^o De l'acier écroui revenu à des températures variant de 100^o à 300^o ou de l'acier écroui laissé longtemps en repos ont tendance à voir améliorées leurs propriétés élastiques. Le revenu à ce point de vue exerce une action plus rapide que le temps. Ces lois s'appliquent également aux aciers spéciaux (1).

Théorie de Bellby : Explication de l'effet d'écroutissage sur les propriétés élastiques de l'acier. — Cette théorie, développée

(1) VAN DEN BROCK, *Iron and Steel Institute*.

par Rosenhain, permet d'expliquer les faits constatés, au cours des recherches sur l'écroissage.

Elle consiste en ceci : L'acier existerait sous deux phases : la phase amorphe et la phase cristalline.

Quand l'acier cristallise, la dimension des cristaux varie en raison inverse de la vitesse de refroidissement. Ces cristaux sont de nature parfois différente et ils sont orientés d'une façon variée de telle sorte qu'en venant en contact ils peuvent enserrer une petite quantité de matière qui reste à l'état amorphe. On la suppose plus résistante que l'acier cristallin, parce que si l'on brise l'échantillon, la fracture traverse les cristaux.

Quand un échantillon d'acier est soumis à un effort croissant, il existe une valeur de cet effort pour laquelle les cristaux se brisent, et cette rupture marque la limite élastique de l'acier; elle se fait suivant des plans de clivage définis, que l'on appelle les *lignes Neumann*.

Le travail interne qui est dépensé dans le métal pendant qu'il est soumis à un effort transforme une partie du métal cristallin en métal amorphe. Ce métal amorphe avant de durcir est plastique.

Donc quand un échantillon est soumis à un effort, aussitôt après écroissage, il y a une production constante de métal amorphe qui se trouve soumis à un effort permanent, si bien que l'échantillon forme un tout qui s'étire plus ou moins.

Si l'échantillon est soumis à un effort aussitôt après écroissage dans une direction différente de celle de l'écroissage, le ciment amorphe nouvellement formé est encore plastique. Les cristaux brisés ont tendance à glisser le long des lignes de Neumann pour revenir à leur position primitive et l'échantillon s'étire d'une façon importante.

S'il est soumis à une action modérée de la chaleur, le ciment amorphe durcit avec le temps. Après revenu, les essais dans le même sens et la même direction que l'écroissage font constater que les plans de moindre résistance se sont étirés au cours de l'écroissage et les cristaux ne se sont pas brisés, la limite d'élas-

ticité n'est pas atteinte tant qu'on n'a pas appliqué un effort supérieur à celui auquel fut arrêté l'érouissage.

D'après Beilby, l'acier amorphe a un poids spécifique inférieur à celui de l'acier cristallin, ce qui explique que l'acier éroui, étant donné la proportion importante de substance amorphe qu'il contient, a une densité inférieure à celle qu'il avait avant l'érouissage.

Un autre argument en faveur de l'existence de l'acier amorphe réside dans l'explication des phénomènes de polissage de l'acier. Il se formerait un ciment amorphe sur la surface de l'acier, au cours du polissage. Une comparaison fait bien comprendre le phénomène, c'est celle de la teinture appliquée au pinceau sur une surface.

Aussitôt après le passage du pinceau, on distingue les traces de ses poils. Ces traces disparaissent presque aussitôt par l'action de la tension superficielle de la substance. De la même manière s'explique la disparition des traces d'usure quand on fait subir un meulage à l'acier, même si l'on examine la surface au microscope avec un fort grossissement.

Le polissage est une opération d'érouissage superficiel et qui n'agit que sur l'acier amorphe, plus dur que l'acier cristallin. C'est ainsi que des billes d'acier, essayées à l'écrasement, sont moins résistantes avant le polissage qu'après.

Et l'on cite cet exemple curieux : Essayées à l'écrasement, des billes de 25^{mm}, meulées grossièrement, étaient de 25 pour 100 moins résistantes que des billes polies. Au point de vue industriel, on érouit un acier pour augmenter ses propriétés élastiques; par exemple, les câbles d'extraction, les câbles de ponts suspendus, les fers utilisés pour les armatures de poutres en béton armé, sont tordus à froid en vue d'augmenter leurs propriétés de flexion; et c'est un moyen d'obtenir une résistance plus élevée dans l'emploi de fers servant à la construction.

Tension superficielle de la couche intercrystalline et limite élastique des métaux. — Le ciment dont nous avons parlé a été

très étudié, en particulier en Angleterre par Thompson. Ce savant a trouvé que le ciment amorphe en question est plus résistant que les grains eux-mêmes. Il a constaté en effet qu'une fracture quelconque passait toujours par le corps des cristaux et contournait les masses du ciment, nous l'avons déjà dit.

Si l'on applique les lois d'attraction aux tensions superficielles d'un liquide surfondu dans le cas qui nous occupe, la théorie d'après laquelle l'espace intercrystallin est rempli par une matière amorphe s'appuie sur des bases scientifiques.

Dans le cas ordinaire d'un liquide en couche mince séparant deux plaques d'un solide, la pression atmosphérique est la cause de l'attraction des deux plaques.

Cette hypothèse devrait s'appliquer logiquement aux cristaux dont les faces planes seraient séparées par une couche mince de métal amorphe; mais on arriverait à ce résultat, contraire à la réalité, que la limite élastique serait fonction des dimensions de l'échantillon.

Si, au contraire, on pose comme source d'attraction les forces vectorielles de cristallisation, on peut appliquer la formule

$$E = \frac{2T}{d};$$

E, limite élastique;

T, tension superficielle de la couche de ciment, considérée comme une couche de liquide;

d, épaisseur de la couche.

Voyons maintenant si les conclusions qu'on peut en tirer sont en accord avec les effets produits sur les métaux par des efforts statiques et dynamiques.

1° *Efforts statiques.* — La limite des déformations temporaires correspond à une résistance de la matière, inférieure à la limite élastique. Si la charge qui agit est supérieure aux attractions totales qui s'exercent entre les cristaux adjacents, on atteint la limite élastique. Tout effort ultérieur amène une séparation des cristaux

et détermine ensuite une déformation permanente; mais avant que ne soit atteinte la limite des déformations temporaires, il est possible de constater une période d'instabilité; la matière intercrystalline, coulant des régions de grandes pressions vers celles de pressions moindres, empêche ainsi la rupture des cristaux.

L'épaisseur d du ciment augmente; par conséquent l'attraction, d'après la formule précitée, entre deux cristaux voisins, diminue; par suite, diminue également la résistance à la traction.

Cette épaisseur d de la masse intercrystalline serait déduite de la formule si la tension T était connue, mais cette dernière n'est déterminée qu'entre le point de fusion f et le point critique c ; par une extrapolation entre ces deux températures, on peut en tirer la valeur approchée de T à la température ordinaire en appliquant la formule de Hook :

$$T_0 = T_f \frac{\theta_f - \theta_c}{\theta_c - \theta_0};$$

T_0 , tension à la température ordinaire;

T_f , tension au point de fusion;

θ , température absolue;

c , point critique;

f , point de fusion;

o , la température ordinaire.

La température critique, pour un bon nombre de métaux, n'est pas déterminée; elle se déduit approximativement des densités du métal à la température ordinaire et à une température au delà du point de fusion, grâce à la formulé de Thorpe et Ruecker :

$$\frac{\Delta \eta}{2\theta_c - \theta_0} = \frac{\Delta_0}{2\theta_c - 273}.$$

Conduit ainsi, le calcul donne successivement la tension superficielle des couches amorphes et leur épaisseur en partant de la détermination de la limite élastique.

Les résultats sont les suivants :

| Métal. | Limite élastique (multipliée par 10 dynes par cm ²). | Tension superficielle des pellicules amorphes en dynes par cm ² . | Épaisseur des pellicules (en cm). |
|------------------|--|---|--|
| Plomb..... | 0,93 | 443 | $9,5 \times 10^{-6}$ |
| Antimoine..... | 1,04 | 285 | $5,5 \times 10^{-6}$ |
| Étain..... | 1,86 | 501 | $5,4 \times 10^{-6}$ |
| Argent..... | 2,17 | 1040 | $9,5 \times 10^{-6}$ |
| Cuivre..... | 2,35 | 1246 | 11×10^{-6} |
| Zinc..... | 4,08 | 726 | $3,55 \times 10^{-6}$ |
| Nickel..... | 17,80 | 1350 | $1,52 \times 10^{-6}$ |
| Fer recuit..... | 14,80 | 1350 | $1,82 \times 10^{-6}$ |
| Fer normalisé... | 18,60 | 1350 | $1,45 \times 10^{-6}$ |
| Fer trempé..... | 21,60 | 1350 | $1,25 \times 10^{-6}$ |

Deux anomalies sont à noter :

a. Pour l'antimoine, bien que la limite élastique soit supérieure à celle du plomb, la tension superficielle est inférieure : 285 au lieu de 443;

b. Pour le zinc la limite élastique est très supérieure à celles du cuivre et de l'argent, cependant la tension superficielle est inférieure à celles de ces métaux : 726 au lieu de 1246 et 1040.

Cela tient à ce que la fracture se produit pour le zinc et l'antimoine sans le moindre allongement, probablement avant même que la limite élastique soit atteinte.

L'état physique a une influence sur la limite élastique du fer ; la tension reste cependant la même, mais l'épaisseur des pellicules varie avec cet état.

On a cherché à déterminer le nombre des cristaux ; on est empiriquement arrivé à une formule de laquelle on tire la conclusion suivante :

Pour une valeur de la tension T , un métal sera d'autant plus résistant que la finesse de sa structure cristalline sera plus grande.

La théorie de Van der Waals, relative aux attractions mutuelles des molécules d'un liquide, appliquée aux phénomènes que nous étudions ici, permet de constater que la limite élastique, la charge de rupture et le chiffre de dureté (méthode Brinell) augmentent en même temps que la pression interne du métal.

Ainsi, pour le fer, on peut dresser le tableau suivant :

| | Pression interne (en méga- baries). | Limite élastique (en kg par cm ²). | Charge de rupture (en kg par cm ²). | Pression (chiffre de dureté Brinell). |
|-----------------|--|---|--|--|
| Fer recuit. . . | 323 900 | 673 | 1477 | 70 |
| Fer normalisé | 323 900 | 840 | 1526 | 83 |
| Fer trempé . . | 323 900 | 980 | 1624 | 105 |

Pour le fer, la fracture a toujours lieu à travers les cristaux; on ne pouvait donc s'attendre à une forte variation de la charge de rupture, la légère augmentation provient de la présence d'une plus grande quantité de ciment intergranulaire lorsque les cristaux sont petits. Par contre, la forte variation de la limite élastique est due à la structure de la masse intercrystalline.

2° *Efforts dynamiques.* — Si l'effort appliqué est de même grandeur que la force d'attraction mutuelle des cristaux, ceux-ci sont légèrement séparés les uns des autres; l'épaisseur de la masse intercrystalline augmente, la matière devient moins résistante à des tractions alternées. L'hyperbole équilatère que traduit la formule du début

$$Ed = \text{const.}$$

est en accord avec l'observation; la vitesse suivant laquelle l'effort est appliqué a une influence, de sorte que si la vitesse est grande il se produit un travail qui s'oppose aux effets de la force de tension, cela donne lieu à un refroidissement.

Dans le cas du fer et de l'acier, les différents éléments en présence compliquent la question. La finesse des produits cristallisés (perlite) influe sur les propriétés élastiques; un acier formé de perlite

pure (0,9 pour 100 de carbone) donne, dans des conditions normales, une limite élastique de 68^{kg}. Si on le recuit pendant 82 heures à 1000°, la limite élastique tombe à 33^{kg}.

Ces résultats s'expliquent par la différence des finesses des granules de carbure; les efforts de tension superficielle se produisent probablement au contact des cristaux de fer et de carbure de fer au même titre qu'entre les cristaux de fer eux-mêmes et la formule doit s'appliquer. Le recuit favorisant la formation de gros cristaux de carbure, diminuant par conséquent l'importance des surfaces de contact, réduit la limite élastique. Si la ségrégation continuait jusqu'à amener une structure voisine de la ferrite pure parsemée de grosses masses de carbure, les propriétés mécaniques de l'acier deviendraient tellement mauvaises qu'il serait inutilisable.

L'introduction de 0,2 pour 100 de vanadium dans un acier à 0,71 pour 100 de carbone rend la division du carbure dans la perlite extrême.

On constate par suite que la résistance a doublé.

Si par un recuit de 850°, suivi d'un refroidissement à l'air ou mieux d'une trempe à l'huile, suivie elle-même d'un recuit à 350°, on normalise un acier, le nombre des cristaux est augmenté, la limite élastique l'est aussi, l'épaisseur d est réduite.

Ainsi, un acier Martin auquel on fait subir ce traitement et dont la composition est la suivante : 0,20 pour 100 de carbone; 0,054 de phosphore; 0,05 de silicium; 0,57 de manganèse; 0,04 de soufre, ayant pour caractéristiques une limite élastique de 2800^{kg} par centimètre carré, un nombre de cristaux par centimètre carré, $N = 68$, une épaisseur des parois intercrystallines

$$d = 4,46 \cdot 10^{-6} \text{ cm,}$$

donne, après le premier traitement,

$$E = 1050,$$

$$N = 416,$$

$$d = 1,16 \cdot 10^{-6},$$

et, d'après le deuxième traitement,

$$E = 1225,$$

$$N = 500,$$

$$d = 1,06 \cdot 10^{-6}.$$

La même différence n'existe pas pour les charges de rupture.

Dans les trois cas, on a 1920, 2160, 1500^{kg} par centimètre carré. Ainsi la résistance dépend des cristaux eux-mêmes, la limite élastique dépend de la masse qui les unit. Il faut remarquer toutefois que si la différence est moins grande, il y a un certain parallélisme car la pression interne des cristaux et la tension superficielle de la masse varient dans le même sens.

On n'a pu jusqu'à présent démontrer expérimentalement l'existence des couches amorphes et certains savants critiquent cette théorie, la trouvant compliquée, disant qu'en tout cas, il suffirait d'admettre tout simplement que la masse amorphe est plus résistante que les cristaux.

Allongement des laitons, des bronzes, etc. — Les laitons, les bronzes, certains alliages d'aluminium, présentent aux essais à la traction des irrégularités dans leurs allongements. La théorie du ciment amorphe, théorie de Beilby et Rosenhain, est susceptible de donner une explication à ces irrégularités. Nous avons déjà exposé ⁽¹⁾ cette théorie d'après laquelle le durcissement déterminé par le travail du métal à froid serait dû à la formation, dans les plans de glissement des grains cristallins, d'une couche de métal amorphe, très dur et fragile, qui assurerait à l'ensemble une certaine rigidité et, de la façon dont se comporteront les deux éléments : cristaux et masse amorphe, pendant la traction, dépendra la résistance du métal examiné.

Un métal durci, lorsqu'il est tractionné, perd l'équilibre de ses forces internes. Il faut un temps plus ou moins long, parfois une

⁽¹⁾ Voir page 52.

semaine à la température ordinaire, pour que cet équilibre soit établi et pour que ce métal donne son maximum de résistance à la traction.

Si la température est plus élevée, l'équilibre est atteint plus tôt.

Ce résultat peut être dû soit à la recristallisation partielle de la couche amorphe, soit à l'accroissement de la fluidité de cette couche,

Un métal soumis à une charge constamment croissante se laisse étirer uniformément si la température et la vitesse d'augmentation de la charge sont telles que le ciment n'atteigne que lentement son état d'équilibre, car les blocs de matière cristalline, se déplaçant dans les plans de glissement, sont supportés par la couche amorphe qui, très visqueuse, s'oppose à tout mouvement rapide. L'augmentation de la surface due à l'étirage gêne par suite le mouvement des cristaux, le ciment devenant plus dur. La courbe des allongements présentera donc une certaine régularité.

En élevant la température, la viscosité du ciment s'atténue, sa formation est d'ailleurs plus rapide, le glissement des cristaux est facilité.

A la température du recuit, les masses amorphes n'existent plus que dans les espaces intercrystallins; la masse cristalline englobe très probablement la couche de ciment amorphe qui se trouvait entre les plans du glissement; les glissements deviennent plus faibles.

La courbe des allongements en fonction de la charge est en effet alors parfaitement régulière.

Si la matière visqueuse vient céder sous l'effort de traction, la courbe se brise; elle devient parallèle aux abscisses (où sont mesurés les allongements); quand le ciment reprend son équilibre, un durcissement se produit de lui-même et la courbe tend à être parallèle aux ordonnées (qui notent les charges), l'allure générale est dans ce cas une succession de redents.

Jusqu'à 57° les bronzes phosphoreux donnent des courbes régulières; à 126° apparaissent des sinuosités, très accusées à 180°.

Si la charge croît lentement, le nombre des sinuosités augmente. Nous citerons en dernier lieu l'exemple d'un fil de laiton. La courbe

est régulière après un certain nombre de recuits; elle est rendue sinueuse à nouveau quand augmente la durée de l'opération de traction. Enfin, après un recuit à haute température, la courbe redevient très régulière.

Déformation plastique d'un acier soumis à un effort excessif. —

Nous allons résumer le travail de savants américains, MM. Howe et Lévy, sur les déformations plastiques qui résultent d'un effort excessif comme celui des opérations d'étirage.

L'écoulement du métal présente quatre formes différentes :

1^o Mouvement des grains individuels l'un par rapport à l'autre ou mouvement intergranulaire;

2^o Mouvement relatif des masses de ferrite, de cémentite ou de perlite, à l'intérieur de ces grains;

3^o Mouvement de ferrite perlitique par rapport à la cémentite. Mouvement intraperlitique;

4^o Mouvement dû au glissement des petits cristaux, l'un à côté de l'autre, par rapport à certains plans de glissement et donnant lieu à la formation de bandes de glissement qui ont été observées par M. Rosenhain.

Certains auteurs concluent, après des examens d'aciers diversement riches en carbone et après les premières phases du tréfilage, que :

1^o Les mouvements intergranulaires se constatent aisément par l'aspect caractéristique que prend une surface polie dès qu'on dépasse la limite élastique.

2^o Au microscope, on constate que les masses de perlite et de ferrite se sont étirées en fils. Cet étirement n'est guère accompagné du glissement des masses individuelles de ferrite et perlite l'une par rapport à l'autre. Mais ces glissements des masses ne sont pas apparents. Il se produit une infinité de petits glissements donnant lieu à une friction totale qui seule est appréciable.

D'autre part, chaque grain de ferrite, primitivement en contact

avec un autre grain de ferrite, augmente énormément sa surface en devenant filiforme. Venant en contact avec la perlite, la continuité est assurée, dans l'hypothèse de Beilby, par l'interposition d'une masse amorphe plus ou moins fluide.

Les aciers recuits, pauvres en carbone, donnent lieu à la formation de la cémentite aux dépens de la perlite. Cette cémentite forme des îlots dans la masse de ferrite et confère une aigreur très caractéristique au métal.

Dans une déformation mécanique d'un tel acier, les îlots de cémentite sont brisés et, aux endroits de rupture, la masse de ferrite vient plus ou moins bien remplir les interstices et ressouder l'ensemble. Cette soudure a plus de chance de se produire dans le cas d'une déformation élastique lente que dans le cas d'un choc brusque. On en conclut que l'essai au choc convient mieux que l'essai à la traction, pour déceler l'aigreur d'un métal, consécutive à la formation de cémentite.

3° La stratification de la perlite est parallèle à la direction de l'effort dans le cas de la déformation intraperlitique. L'écoulement a allongé la perlite dans le sens de cette stratification; les lamelles de ferrite se sont allongées proportionnellement et celles de cémentite, qui ne sont pas extensibles, se sont brisées, conservant leur direction d'origine; et si, au contraire, on comprime parallèlement à sa stratification le métal observé, on constate que la structure devient brisée, arrangée en échelon.

Avant de se rompre, les lamelles de cémentite se courbent parfois très fortement.

Dans la masse, la structure perlitique subit des courbes et des déformations très marquées; mais, au voisinage même de la fracture, la déformation est presque nulle.

Dans l'ensemble, cette déformation reste nettement apparente, même si l'acier renferme peu de carbone.

M. Guillet a présenté à l'Académie des Sciences une Note intéressante sur les points critiques dus à l'écroissage. Nous y avons

déjà fait allusion (1), à propos de la méthode d'essai par l'examen des résistances électriques.

Dans ses recherches l'auteur a eu pour but de comparer les résistances électriques d'un fil écroui au même fil recuit. Il a réalisé à cet effet un circuit par un fil écroui sur une certaine longueur et recuit par un chauffage sur le reste de la longueur utilisée.

Ce circuit est constitué de façon que le fil écroui se trouve en opposition avec une partie du fil recuit, les deux parties intéressantes du fil étant placées dans la zone isotherme d'un four, dont la température peut varier d'une façon continue. Le courant qui traverse le circuit est fourni par une batterie d'accumulateurs.

Le dispositif expérimental comporte des boîtes de résistance et un galvanomètre qui enregistre les températures au moyen d'un couple thermo-électrique placé dans le four.

Les expériences ont été appliquées à des fils de laiton dont la composition est la suivante :

1° Laiton (67 de cuivre, 33 de zinc).

| | Charge de rupture. | Poids spécifique. | Résistivité. |
|----------------------|-----------------------|----------------------|---------------------------------------|
| | mm ² | | ρ (microhms cm ² /cm) |
| A l'état écroui..... | 56,5 | 8,509 | 6,99 |
| A l'état recuit..... | 36,6 | 8,512 | 6,61 |

2° Laiton (60 de cuivre, 40 de zinc).

| | Charge de rupture. | Résistivité. |
|----------------------|-----------------------|--|
| | mm ² | ρ (microhms cms ² /cm) |
| A l'état écroui..... | 73 | 6,58 |
| A l'état recuit..... | 46,6 | 6,30 |

La méthode dilatométrique ne donne pas des résultats très nets, parce que la dilatation est probablement masquée par l'affaissement de l'éprouvette sous l'action des ressorts de l'appareil.

(1) Voir page 6.

C'est pourquoi la méthode différentielle de résistance électrique fournit des renseignements plus précis.

On voit en effet une chute brusque de la résistance électrique aux environs de 365° et qui se poursuit jusqu'à 410° pour la première composition.

En suivant la courbe différentielle de résistance électrique, on peut noter les phénomènes qui accompagnent la perte d'écroissage, et cette courbe a la même allure que la courbe classique des variations des propriétés mécaniques d'un produit écroui en fonction de la température du recuit.

Pour la deuxième composition, la courbe de dilatation ne donne pas non plus de résultats nets, tandis que la courbe différentielle de la résistance électrique indique, comme pour l'échantillon précédent, une chute brusque entre 360° et 400° .

Cas de l'acier dur (0,80 de C). — Le métal trempé revenu et écroui dans l'état où il est livré par le commerce sous le nom de « corde à piano » n'a pas une courbe différentielle de résistance électrique qui soit nette (la variation de résistance du fer par écroissage est bien moins élevée que pour le laiton). On n'aperçoit aucune chute brusque. Par contre, le même métal simplement trempé donne une courbe montrant une diminution progressive de la résistance en fonction de la température. Ainsi la courbe température, différence de la résistance électrique, d'un fil écroui et du même fil recuit obtenue par le dispositif décrit plus haut, fournit pour différents alliages, en particulier pour les laitons, des résultats précis sur la variation de l'écroissage en fonction, de la température; et cette méthode sera susceptible de donner sur l'écroissage des renseignements relatifs à l'influence des différents facteurs qui ont déterminé cet écroissage.

Lorsqu'on impose à un métal un effort déterminé, une traction par exemple, il subit des déformations.

Si ces déformations cessent quand l'effort cesse, on dit que ces déformations sont élastiques. Elles sont habituellement très petites

par rapport aux forces qui leur donnent naissance. De plus, elles leur sont proportionnelles.

C'est ce qu'on appelle la « loi de Hooke ».

En faisant croître les efforts de traction, les déformations deviennent permanentes et elles ont ceci de particulier, c'est qu'elles sont très grandes par rapport aux déformations élastiques.

Si l'on considère plus particulièrement les forces qui agissent sur un métal dans une direction déterminée, la limite d'élasticité pour cette direction sera la valeur des forces rapportées à l'unité de surface, pour laquelle on commence à observer une déformation permanente du métal dans la direction considérée.

Si au lieu d'une traction on opère une compression, on a un point correspondant qu'on appelle la « limite d'élasticité à la compression ». En rapprochant les diagrammes des essais à la traction et à la compression, on constate qu'au début, pendant le temps des déformations élastiques, les deux courbes se superposent. La courbe dans les deux cas est une droite, puisque les déformations sont proportionnelles.

Au début des déformations permanentes, les courbes se superposent également. Ceci tend à démontrer que tant que les déformations permanentes sont petites, leur grandeur est indépendante du sens de l'effort.

Enfin une remarque qui intéresse l'étirage et qui peut être vérifiée expérimentalement sur toute machine d'essai à traction est que la limite d'élasticité acquise par un métal déformé est précisément égale à l'effort qui a produit cette déformation. C'est la loi fondamentale de l'érouissage, et la superposition des diagrammes des essais à la compression et à la traction permet de dire que si l'homogénéité du métal n'est pas altérée par ces efforts, l'égalité des limites élastiques se maintient.

Cette propriété particulière ne semble d'ailleurs n'être qu'un cas particulier de la loi générale de l'isotropie des déformations permanentes homogènes. Pour l'exemple du cuivre, cité par M. Galy-Ache, cette isotropie est aisément mise en évidence. Quand on soumet un cube de ce métal recuit à la compression en le faisant

reposer successivement sur chacune de ses faces latérales, on constate que les trois limites élastiques, mesurées dans les trois directions rectangulaires, sont égales et que cette égalité semble persister tant que le cube déformé par l'écrasement conserve à peu près la forme parallélépipédique. Tant qu'une éprouvette cylindrique soumise à des épreuves de traction restera cylindrique, on pourra vérifier que la limite d'élasticité acquise par le métal est la même qu'à la compression. Pendant la période des déformations permanentes, des déformations élastiques continuent à se produire suivant la même loi que pendant la période des déformations élastiques proprement dites et la représentation complète sera obtenue en prolongeant la droite d'élasticité au delà de son point d'arrêt.

Cela conduit M. Galy-Ache à définir ce qu'il appelle le « métal parfait », c'est-à-dire celui dans lequel les déformations élastiques seraient représentées par une droite et les déformations plastiques par une courbe coupant la droite suivant un angle différent de 0. A chaque instant la limite élastique d'un tel métal, considérée dans une direction quelconque, serait définie par l'ordonnée de la courbe de plasticité dont l'abscisse représenterait sa déformation dans la même direction.

Dans l'industrie, l'écroissage, c'est la modification parfois considérable que présente l'ensemble des propriétés mécaniques d'un métal soumis à des efforts répétés ou non.

On admet que, pour qu'il y ait écroissage, il faut que la limite d'élasticité ait été dépassée ; d'où une relation entre les déformations permanentes d'un métal et son écroissage. On peut dire également que l'écroissage est la propriété constatée sur les métaux, de l'élévation de la limite d'élasticité par les traitements mécaniques. Ainsi se définit l'écroissage par une de ses propriétés essentielles.

L'expérience vérifie les deux points suivants :

- 1^o Quand la température augmente, l'écroissage diminue ;
- 2^o Quand la température du recuit augmente, l'écroissage

diminue et tend vers une limite qui est celle du recuit complet, obtenu à une température déterminée.

Dans l'étude de l'écroutissage, l'examen micrographique permet de se rendre compte de la nature intime du phénomène.

Le cuivre à l'état de recuit complet apparaît au microscope, après polissage et attaque à l'acide de l'échantillon, comme un agrégat de cristaux de formes très nettes, enrobé dans un ciment amorphe. Ce même métal écroui offre l'aspect de cristaux brisés et enchevêtrés. Si on le recuit, ce même métal écroui, à des températures de plus en plus élevées, on constate que se rétablit petit à petit la structure cristalline primitive. L'écroutissage consiste donc dans un phénomène interne qui amène la rupture des cristaux, ces cristaux se reconstituant par le recuit. Si le métal est chimiquement pur on ne trouve pas, au point de vue de la composition, de différence entre les cristaux et le ciment qui les enveloppe. Cependant l'attaque à l'acide a pour effet de dessiner les cristaux en creux, par rapport au reste de la surface. Le cuivre des cristaux est donc plus attaquant que le cuivre du ciment dans lequel il se trouve.

Une éprouvette de métal, polie, soumise à un effort de traction et examinée pendant l'opération même, au microscope, laisse percevoir le moment où la limite d'élasticité est dépassée.

Les grains cristallins, semblables à ceux que nous ont révélés l'attaque et l'examen micrographique, nous apparaissent. Des stries se dessinent sur les faces de quelques-uns des cristaux; elles augmentent avec l'effort de la traction; elles sont, pour un même cristal, droites, parallèles, régulièrement espacées, mais leur direction change d'un cristal à l'autre. Si l'on pousse plus loin l'effort de traction, sur chaque cristal un autre système de lignes parallèles vient couper le premier; ce qui semble démontrer que le siège des déformations élastiques est le ciment interposé entre les cristaux, puisque ceux-ci ne se désagrègent pas pour une charge inférieure à la limite d'élasticité.

Les déformations plastiques, elles, au contraire, paraissent pro-

duites par le glissement des éléments de cristaux le long de leurs plans de clivage.

Ces glissements déterminent une dénivellation de la surface du cristal par rapport à celle du ciment et le contour des cristaux se dessine ainsi nettement sur la surface polie du métal.

Ces expériences, dues à M. Rosenhain, font saisir le mécanisme de l'écroissage. Pour qu'un cristal se désagrège, il faut que le couple de glissement de deux éléments contigus auquel donne naissance l'effort exercé sur le métal atteigne une certaine valeur.

Les cristaux dont le plan de clivage sera orienté dans une certaine direction par rapport à l'effort se désagrégeront les premiers.

Pour obtenir la désagrégation d'autres cristaux dont le plan de clivage fait un angle plus grand avec la même direction, il faut évidemment augmenter la force appliquée.

La limite d'élasticité, c'est-à-dire l'effort nécessaire pour déplacer les cristaux fragmentés, doit être égale à l'effort qui a produit auparavant leur glissement.

On explique ainsi : l'égalité des limites d'élasticité de traction et de compression, la valeur du couple de glissement ne change pas en effet quand on renverse le sens de l'effort.

On en conclut également que la densité du métal doit rester invariable, puisque les déformations permanentes sont uniquement dues au glissement des éléments contigus ; le volume total reste le même, l'expérience vérifie ce fait.

Il semble donc que le ciment possède assez de souplesse pour se mouler sans se rompre sur les cristaux pendant les déformations permanentes.

Enfin la relation qui existe entre l'écroissage et la limite d'élasticité acquise permet de fixer par un chiffre le degré d'écroissage, puisque la limite d'élasticité peut être mesurée par des machines.

M. Galy-Ache est arrivé à une définition plus précise de l'écroissage que nous allons encore reproduire.

Lorsqu'un métal se trouve soumis à l'action de forces déformatrices, ces forces effectuent sur lui un certain travail.

Si le travail des forces est intégralement transformé en chaleur,

comme cela a lieu par exemple lorsque les déformations sont purement élastiques, les propriétés du corps ne sont pas modifiées.

Si au contraire une partie seulement du travail des forces déformatrices est transformée en chaleur, l'excès de travail non retrouvé sous forme de chaleur a été employé à modifier les propriétés des corps déformés.

On dit alors que le corps est écroui.

Ainsi, si l'on considère un cylindre de cuivre écrasé sous le choc d'un mouton d'acier et qu'on mesure la quantité de chaleur produite, le rapport du travail dépensé, à la chaleur recueillie, c'est-à-dire l'équivalent mécanique apparent, est un nombre notablement supérieur à l'équivalent réel.

L'érouissage du cuivre peut être mesuré par la quantité de travail non recueillie sous forme de chaleur. Dans le cas du plomb, l'érouissage est nul. Il est intéressant de rapprocher les deux définitions de l'érouissage.

Pour cela nous reprendrons l'exemple de M. Galy-Ache : trois cylindres, l'un en acier trempé, par conséquent parfaitement élastique; le second en plomb, c'est-à-dire complètement plastique, et le troisième en cuivre recuit, supportant chacun le même travail; par exemple le choc d'un mouton d'acier tombant d'une hauteur déterminée.

Sur le cylindre d'acier le mouton, après le choc, remontera d'une hauteur égale à celle de sa chute.

La force vive initiale est intégralement restituée. Le cylindre s'est échauffé par la compression due au choc; il se refroidit par la détente, de telle sorte que sa température après l'expérience redevient la même qu'avant. Pour le plomb, aucune réaction élastique ne se traduisant, la force vive initiale est complètement transformée en chaleur, le cylindre est écrasé. Le métal prend une température notablement supérieure à celle qu'il avait avant et, sous le choc, le mouton ne remonte pas. Pour le cuivre, métal intermédiaire, moins élastique que l'acier, moins plastique que le plomb, il donne un résultat participant des deux expériences précédentes. Le cylindre est écrasé partiellement, sa température s'élève; le

mouton subit une certaine remontée, et l'on peut dire que ce travail élastique est évidemment égal, si l'on fait abstraction de la correction de température, à la moitié du produit de la limite élastique acquise par la déformation élastique correspondante.

La constance du coefficient d'élasticité, c'est-à-dire du coefficient angulaire de la droite d'élasticité du diagramme des efforts de traction ou de compression étant admise, l'écroissage, c'est-à-dire le travail élastique supporté par le métal, est proportionnel au carré de la limite d'élasticité acquise. C'est donc à bon droit qu'on a admis que la limite d'élasticité acquise peut servir à mesurer l'écroissage du métal.

L'exemple du cuivre conduit à des résultats simples que l'on ne retrouve pas avec le fer. La loi de l'égalité de la limite d'élasticité et de l'effort qui a produit l'écroissage ne se vérifie sur ce métal que si l'application de l'effort est immédiat. Après un certain temps, la limite d'élasticité, ou, comme l'on voudra, l'écroissage, augmente progressivement jusqu'à une certaine limite; et, comme les recherches de Rosenhain ont été faites sur le fer et les aciers, il faut, pour expliquer l'élévation automatique de la limite d'élasticité acquise par le métal, admettre que la désagrégation, une fois qu'elle est commencée, se continue d'elle-même, augmentant à chaque instant l'écroissage du métal. Cette élévation progressive de la limite d'élasticité acquise agit donc, comme une sorte de trempe spontanée, à la température ambiante.

En effet, l'élévation parfois considérable de l'écroissage constaté sur le fer et sur les aciers n'est corrélatif d'aucune variation de la forme extérieure, ni d'aucun glissement interne, comme d'ailleurs cela se retrouve aussi dans les phénomènes de trempe ordinaire.

Le microscope permet de poursuivre plus loin l'analogie.

La trempe en effet détruit la structure cristalline du métal; elle augmente, dans une proportion souvent considérable, la limite d'élasticité, jusqu'au point parfois de détruire presque complètement la plasticité.

Duguet définit l'écroissage qui rend les métaux secs ou raides

comme étant un phénomène consistant dans l'élévation de la limite d'élasticité par le travail à froid.

Généralement, on lie la notion d'écroissage à celle de déformation. Grard a donné cependant une définition précise. Sa formule est

$$E = \frac{S-s}{S} \times 100,$$

S et s étant les sections des barres avant et après le travail.

Lorsqu'on veut connaître réellement les propriétés fondamentales d'un alliage, il est de toute nécessité de le ramener à un état identique à celui dans lequel il se trouvait avant toute opération, c'est-à-dire à l'état de recuit complet, afin de déterminer toutes les spécifications. On procédera ensuite aux expériences et l'on notera enfin les modifications que l'écroissage apporte à ces résultats.

Le recuit restitue au métal ses propriétés et la structure que l'écroissage lui avait fait perdre.

Mais il faut bien connaître les conditions de ce recuit complet, si l'on veut retrouver les qualités initiales.

Hanriot propose comme définition de l'écroissage la formule suivante :

Tout métal est écroui qui, par un recuit convenable, subit une modification dans ses propriétés physiques en dehors de toute transformation chimique. Cette définition très générale permet d'utiliser les variations non seulement de la limite élastique, mais d'une propriété quelconque du métal pour conclure à écroissage et elle permet de déterminer cet état d'écroissage sur un échantillon de métal quelconque sans qu'il soit nécessaire de connaître les efforts qu'il a subis antérieurement.

En un mot, si le recuit modifie les propriétés, c'est que le métal a été écroui.

De toutes les propriétés mécaniques, M. Hanriot a justement choisi celle qui offre le plus de sensibilité.

Il s'est arrêté à l'examen de la dureté; nous rappellerons en deux

mots la méthode Brinell. Elle consiste à pratiquer des empreintes sous pression connue au moyen d'une bille d'acier sur le métal à examiner. On mesure le diamètre de l'empreinte et le nombre de Brinell est le quotient de la pression par la surface sphérique de l'empreinte (1).

Cette méthode, très pratique, donne des renseignements précis; cependant M. Hanriot fait remarquer que les chiffres de Brinell pour les métaux recuits sont beaucoup trop forts, parce qu'ils correspondent à un métal écroui par la bille.

Le passage à la filière écrouit fortement les métaux. Deux opérations distinctes se produisent simultanément : la compression, qui est plus forte que celle du laminoir puisque le métal est serré de tous côtés, et la traction du métal après sa sortie de la filière.

M. Hanriot, pour étudier la part qui revient à chacune de ces deux opérations dans l'érouissage total, a soumis des barres de métal recuit à la traction sans l'interposition d'une filière.

Il est arrivé, par l'examen de la dureté après l'étréage, des charges de rupture, ainsi que des allongements, à des renseignements intéressants desquels il a tiré les conclusions suivantes :

1^o Des métaux faiblement écrouis, entre lesquels la dureté révèle des différences notables, ont sensiblement la même charge de rupture et le même allongement; ceux-ci varient au contraire brusquement à partir d'un certain érouissage.

2^o L'étréage, qui écrouit fortement le métal recuit, augmente d'autant moins l'érouissage que le métal en avait déjà un plus prononcé, au début de l'expérience. A partir d'une certaine valeur l'étréage n'augmente plus la dureté et même il peut la diminuer, il adoucit le métal fortement écroui, il produit une sorte de recuit.

3^o L'aspect des barres rompues permet d'indiquer si leur dureté a augmenté ou diminué par la traction. Les barres recuites deviennent gaufrées à la surface par l'étréage; les barres fortement écrouies restent polies. Donc, la traction paraît produire un érouis-

(1) Voir, page 31, Essais de dureté.

sage déterminé qui tendait à se substituer à celui qui existait antérieurement, l'augmentant s'il était inférieur, le diminuant s'il était supérieur. C'est que, en effet, un métal soumis à la traction reçoit deux modifications inverses : 1^o un allongement qui écarte les molécules et diminue l'érouissage; 2^o une déformation qui amène la compression par le glissement des couches de métal, les unes sur les autres.

On explique donc que la traction puisse amener une augmentation ou une diminution de la dureté suivant que l'une de ces deux actions l'emporte sur l'autre.

C'est parce que tous les métaux arrivent par la traction à un chiffre d'érouissage voisin, que les métaux faiblement érouis ont à peu près la même charge de rupture et le même allongement.

L'érouissage à la traction se produit-il pendant la période des allongements élastiques ou seulement au moment de la déformation ?

M. Hanriot a fait une expérience sur les bronzes d'aluminium, sur le laiton, sur l'aluminium, sur l'argent, et il en conclut que l'érouissage à la traction, caractérisé par une augmentation de dureté, ne commence que lorsque le métal subit une déformation permanente. Si l'on examine des métaux très érouis, mais n'ayant qu'une déformation permanente insignifiante, à quel moment se produit pour eux l'effet de traction amenant une diminution de dureté ? Une barre de laiton de 66 pour 100 de cuivre, érouie au maximum, puis tirée à charges croissantes, sur laquelle M. Hanriot a pris le chiffre de dureté après chaque opération, ainsi que son allongement, lui a permis de dire que l'effet de traction se produit avant la déformation permanente, et sa conclusion est celle-ci : Il y a indépendance entre l'érouissage et la déformation. D'une façon générale, au point de vue pratique, il y a intérêt à bien connaître l'état du métal à travailler. Dans les opérations de tréfilage, d'estampage, etc., le façonnage du métal se fait progressivement, c'est-à-dire qu'arrivé à un degré d'érouissage on se voit obligé de recuire le métal, ce qui le recouvre d'une couche d'oxyde et

oblige à une opération de décapage. On voit combien augmente pour cette raison les frais de fabrication. Il est donc important de connaître : 1^o jusqu'à quel point on peut déformer un métal à froid; 2^o quel est le traitement thermique à lui appliquer; 3^o quel est le moment où il doit être appliqué pour arriver à un produit de qualité satisfaisante avec un prix de revient minimum. Au point de vue scientifique, ces recherches ont un intérêt également important, parce qu'un métal ou un alliage ne sont pas caractérisés par leur composition chimique seulement, mais aussi par leurs traitements mécanique et thermique. Considérant le cas particulier des aciers, le procédé de déformation a une grande influence et, pour définir le traitement mécanique du métal, il ne suffit pas de connaître les dimensions avant et après l'étirage, mais plus encore les dimensions intermédiaires.

L'effet d'une série de faibles passages à la filière se fait sentir seulement à la surface du métal. Il glisse pour ainsi dire, et des effets de rupture superficiels peuvent se produire. Des fils fortement étirés; au contraire, donnent des résultats plus réguliers; mais, chose curieuse à noter, c'est que le temps influence l'effet de l'écroissage, surtout dans les quelques heures qui suivent la déformation.

Donnons quelques résultats obtenus par Gørens.

Pour les aciers doux et demi-durs, la limite élastique s'élève jusqu'à environ 90^{kg} par millimètre carré, ce qui exige, suivant la teneur en carbone, une réduction de 85 à 95 pour 100. La valeur maximum de la limite élastique pour l'acier dur est atteinte après quelques passages dans la filière (45^{kg} par millimètre carré).

L'acier à 0,5 pour 100 de carbone paraît être le plus favorable pour obtenir une limite élastique élevée.

Quant à la résistance, elle augmente proportionnellement à la déformation, tandis que l'allongement et la striction diminuent rapidement. L'acier Thomas à 0,09 de carbone voit sa résistance à la traction monter de 38 à 65^{kg} par millimètre carré après le quatrième passage à la filière. La passe suivante a occasionné une rupture intérieure. L'acier Thomas, mis en comparaison avec le

fer, montre une plus grande ductilité, ce qui s'explique par l'inclusion de scories dans ce dernier. L'allongement, lui, s'abaisse de 29 à 4 pour 100 et la contraction de 59,5 à 22,9 pour 100. L'acier Thomas conserve donc pour un état d'écroutissage très avancé un allongement et une striction plus grands que le fer.

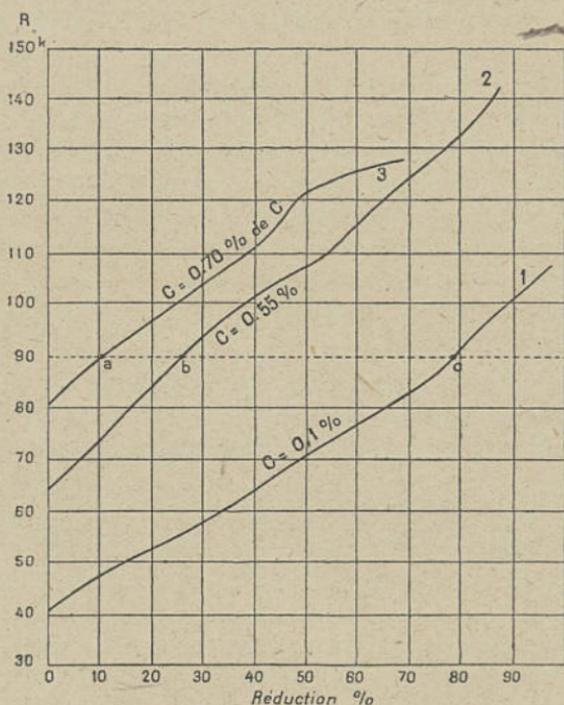


Fig. 22.

Il est intéressant de pouvoir fixer les conditions qui permettront d'obtenir un fil de résistance et de diamètre déterminés. Par exemple : la réduction d'un fil de 1mm^2 de section devant avoir une résistance de 90kg par millimètre carré sera obtenue en traçant, par l'ordonnée 90 de la figure 22, une horizontale; elle rencontre les

trois courbes en des points *a*, *b*, *c*. Les abscisses indiquent de combien les différents matériaux doivent être réduits pour qu'on puisse obtenir la résistance de 90^{kg}.

Les réductions nécessaires lues sur la figure sont de 10 pour 100 pour l'acier de 0,70 pour 100 de carbone, puis de 25 pour 100 pour l'acier de 0,55 pour 100 de carbone et enfin de 77 pour 100 pour l'acier doux ayant moins de 0,1 pour 100 de carbone, les sections initiales étant 1,11, 1,37 et 4^{mm²},55.

La fabrication est d'autant plus difficile que la teneur en carbone est plus élevée, cela tient à ce que les sections initiales étaient petites.

S'il s'agit au contraire de fabriquer des fils d'un diamètre plus grand, on emploiera des matériaux plus riches en carbone.

Si l'on veut une section par exemple de 20^{mm²}, la section des matériaux à employer sera successivement pour l'acier à 0,7 pour 100 de carbone de 22^{mm²},22, pour l'acier à 0,5 pour 100 de carbone, 25^{mm²},44; pour l'acier doux, 91^{mm²}.

Les deux premiers supporteront sans difficulté la réduction exigée, tandis que pour l'acier doux il est à craindre que le métal ne se rompe avant d'avoir atteint la résistance voulue.

Influence de l'étirage sur les propriétés mécaniques. — Cette influence se manifeste sur la limite élastique. Le tableau suivant le démontre très nettement pour les alliages de cuivre.

| Composition. | Métal recuit. | | | | | Métal brut d'étirage. | | | | |
|---|---------------|----|------|----|----|-----------------------|----|------|----|----|
| | R. | E. | A %. | Σ. | ρ. | R. | E. | A %. | Σ. | ρ. |
| Cuivre..... | 22,3 | 5 | 55 | 57 | 20 | 33 | 25 | 25 | 57 | 15 |
| Laiton { Cuivre = 90,6 Zinc = 8,4 } .. | 24 | 5 | 49 | 61 | 14 | 30 | 27 | 16 | 51 | 8 |
| Laiton { Cuivre = 85,3 Zinc = 12,5 Plomb = 1,2 } .. | 26 | 7 | 48 | 66 | 15 | 34 | 30 | 15 | 48 | 7 |
| Laiton { Cuivre = 64,5 Zinc = 35,1 Plomb = 0,4 } .. | 27 | 6 | 62 | 53 | 15 | 36 | 27 | 42 | 62 | 12 |
| Laiton { Cuivre = 58,9 Zinc = 39,8 Plomb = 1,3 } .. | 43 | 14 | 35 | 37 | » | 47 | 35 | 27 | 30 | » |
| Bronze { Cuivre = 98,3 Étain = 1,7 } .. | 26 | 6 | 51 | 70 | 22 | 33 | 31 | 29 | 64 | 12 |
| Bronze { Cuivre = 88,3 Étain = 2,2 Zinc = 9,5 } .. | 40 | 15 | 73 | 65 | 17 | 52 | 43 | 30 | 44 | 7 |

L'écroissage affecte beaucoup plus les allongements que la striction; ainsi pour l'acier :

| | Barres initiales de section circulaire ayant un diamètre de 22 ^{mm} | | | | | | | | | |
|---|---|----|---------------------------------|----|----|--------------------------------------|----|---------------------------------|----|----|
| | sous l'état brut de traitement. | | | | | à l'état recuit après traitement. | | | | |
| | R. | E. | A ^o / _o . | Σ. | ρ. | R. | E. | A ^o / _o . | Σ. | ρ. |
| Barre laminée..... | 42 | 30 | 33 | 69 | 12 | 43 | 30 | 32 | 69 | 7 |
| Barre décapée pendant 12 heures.. | 42 | 28 | 31 | 65 | 25 | 43 | 30 | 33 | 69 | 10 |
| Barre décapée pendant 36 heures.. | 42 | 28 | 30 | 61 | 22 | 42 | 29 | 31 | 69 | 7 |
| Barres décapées pendant 12 heures puis étirées : | | | | | | | | | | |
| { Passe de 5/10 de millimètre ... | 46 | 35 | 24 | 65 | 3 | 42 | 30 | 32 | 70 | 3 |
| { » 10/10 » | 50 | 42 | 19 | 53 | » | 42 | 31 | 32 | 70 | 5 |
| { » 20/10 » | 58 | 55 | 13 | 56 | 2 | 42 | 27 | 31 | 70 | 4 |
| Barres décapées pendant 36 heures et étirées : | | | | | | | | | | |
| { Passe de 5/10 de millimètre .. | 43 | 31 | 27 | 65 | » | 41 | 27 | 33 | 70 | 8 |
| { » 10/10 » | 50 | 43 | 15 | 59 | 11 | 41 | 30 | 30 | 70 | 5 |
| { » 20/10 » | 55 | 53 | 12 | 57 | 3 | 40 | 24 | 33 | 68 | 3 |

Après une passe de 1^{mm}, le métal présente une striction Σ, encore très élevée, tandis que les allongements sont de beaucoup diminués. La limite élastique E augmente bien plus rapidement que la charge de rupture; ceci a déjà été signalé d'une façon générale.

On remarque encore d'après ce tableau, qui relève les résultats obtenus dans des expériences faites par M. Guillet, que l'essai de traction fournit les mêmes chiffres pour tous les échantillons ayant subi un recuit complet, quel que soit le travail d'étirage préalable-ment imposé au métal.

La fragilité augmente très rapidement avec le degré d'écroissage.

Le décapage, bien qu'il fasse absorber en petite quantité l'hydrogène au métal, influence fort peu les propriétés mécaniques; le tableau précédent donne également des précisions à ce sujet. En résumé, il faut retenir que l'étirage pratiqué industriellement au banc augmente notablement la limite élastique et la fragilité et qu'il diminue les allongements.

Dureté à la bille du cuivre et des laitons écrouis. — M. Portevin prend, comme échantillons du cuivre électrolytique, du laiton 90/10, employé pour les balles, du laiton 67/33 utilisé pour les cartouches laminées à froid, afin d'avoir des écrouissages variés.

Dans ces divers cas, si l'on adopte pour la définition du degré d'écrouissage celle qui consiste à donner pour coefficient la formule $\frac{S-s}{s} \times 100$, on obtient des degrés d'écrouissage variant de 5 à 300 pour 100, lorsqu'on fait des essais à la bille.

M. Portevin emploie une bille de 10^{mm} de diamètre qu'il applique pendant 30 secondes sous une pression de 500^{kg}, puis une bille de 13^m,18 de diamètre qu'il applique pendant 30 secondes sous 30^{kg} de pression.

Ceci pour que l'influence de l'empreinte ne puisse fausser l'expérience, comme cela arriverait sur des échantillons trop peu épais.

Les mesures des empreintes sont faites par un microscope à déplacement micrométrique. Les diagrammes établis donnant R en fonction du coefficient d'écrouissage ne concordent pas toujours avec ces essais.

M. Guillet explique que ce résultat ne dépend pas des procédés utilisés pour obtenir l'écrouissage. Donc du fait que deux empreintes à la bille de produits écrouis sont égales, il ne faut en tirer la conclusion que ces produits sont au même degré d'écrouissage.

A partir d'un certain degré de déformation, l'empreinte à la bille devient à peu près invariable; et M. Portevin rapproche cette limite de la limite supérieure d'élasticité, ou, comme on l'appelle quelquefois, pression d'écoulement telle que l'entendait M. Tal-

mann. A partir d'un certain écouissage, la limite d'élasticité, évaluée par la pression à l'apparition des slip-bands, demeure constante.

Dans cette étude sur les déformations permanentes, Bouasse conclut que : « Une déformation géométrique donnée produit un changement d'état (écrouissage) variable avec les forces qui ont servi à produire la déformation.

» L'écrouissage n'est donc pas en général fonction de la somme algébrique des déformations. »

Le coefficient d'écrouissage, d'après M. Portevin, ne convient pas pour définir strictement l'état d'écrouissage, lequel pour une même valeur de la réduction de section peut être différent suivant le mode de la déformation qui l'a provoquée.

Comment évaluer une réduction de section ?

Trois formules sont utilisées :

$$1^{\circ} \frac{S - s}{s} \text{ qui définit l'écrouissage;}$$

$$2^{\circ} \frac{S - s}{S} \text{ qui détermine la striction;}$$

$$3^{\circ} \frac{S}{s} \text{ qui fixe le corroyage.}$$

Il faudrait donc bien s'entendre, quand on parle de réduction de section, sur la nature du travail qui a déterminé cette déformation.

Après avoir subi un travail mécanique, les métaux deviennent plus durs. Cette dureté disparaît après le recuit; le phénomène est particulièrement cité pour le cuivre tréfilé. Cependant, il a été démontré que la dureté ou la résistance à l'usure n'augmentent pas pour le cuivre passé à la filière non plus que pour certains autres métaux et alliages : fer, nickel, argent, or. On a fait à ce sujet différentes hypothèses, deux sont à retenir :

Une nouvelle forme cristalline plus dure apparaît après tréfilage. Cette forme est révélée par la métallographie, tandis que l'autre hypothèse n'est pas vérifiée par cette méthode de recherche.

Elle consiste à admettre que le métal se transforme en une masse amorphe.

Après travail mécanique d'un métal, on constate dans ses propriétés des variations; ainsi, après tréfilage, la résistance électrique croît presque toujours et cette variation observée à 0° peut atteindre de 2 à 27 pour 100. La densité, elle, ne varie pas sensiblement.

La force électromotrice de dissolution ne change pas non plus. Ce sont surtout les propriétés élastiques qui subissent des modifications. On explique cette particularité en admettant que la traction d'un métal détruit les cristallites qui le constituent et les transforme en lamelles parallèles au sens de l'effort qu'a subi le métal. De la sorte, un fil est constitué par la juxtaposition de fils élémentaires se comportant chacun comme une fibre isolée. Il en résulte que la résistance au pliage et la dureté augmentent.

La résistance électrique augmente par le travail mécanique, comme nous l'avons dit, à cause de l'orientation uniforme des lamelles très petites qui se sont substituées aux grandes cristallites dont la direction était variée. Quant aux autres propriétés, elles restent constantes, parce qu'elles ne peuvent être affectées par cette nouvelle orientation.

Ceci peut se résumer simplement de la façon suivante :

« La traction d'un fil ne modifie que ses propriétés vectorielles »; on peut ainsi prévoir la forme du diagramme des allongements en fonction de l'effort de traction appliqué à un fil. Au début de l'essai, il y a allongement élastique réversible; l'explication se trouve dans le fait que l'effort n'est pas encore suffisant pour transformer les cristallites en lamelles; puis on franchit la limite inférieure d'élasticité m , l'allongement croît à partir de ce moment très rapidement même si l'effort de traction croît très peu, la courbe est presque horizontale, mn . Pour les aciers doux, nous reviendrons sur ce point.

Alors commence le glissement des cristallites les unes sur les autres, glissement accompagné de frottement. Enfin, dans la der-

nière partie du diagramme np , les lamelles apparaissent; un maximum de pression est observé. La section du fil devenant en ce moment de plus en plus petite, on constate une décroissance de la pression, une augmentation de l'allongement, et finalement a lieu la rupture. Les phénomènes qui se produisent pendant la compression des métaux trouvent une explication tout à fait semblable. La forme lamellaire existerait donc au-dessous de la limite d'élas-

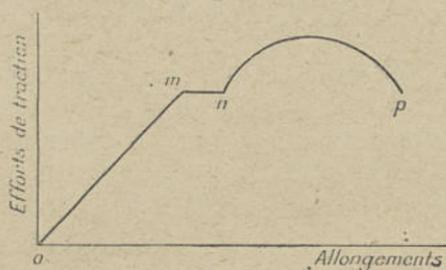


Fig. 23.

ticité de compression et au-dessus de la limite d'élasticité de traction; les cristallites caractériseraient la structure interne du métal entre ces deux pressions.

Revenons au cas spécial de la dureté du cuivre étiré à froid. Suivant une opinion assez courante, le fil de cuivre étiré à froid serait recouvert d'une pellicule d'une nature plus dure et plus résistante que celle du centre de la masse. Des essais de dureté à la bille (méthode Brinell) ont été faits sur le fil sortant de la filière et répétés sur ce même fil après lui avoir enlevé une certaine épaisseur soit mécaniquement au tour, soit chimiquement par une attaque à l'acide nitrique.

Des essais à la traction ont été pratiqués également dans les mêmes conditions. Les valeurs obtenues ont démontré que l'opinion courante dont nous avons parlé plus haut provient d'une erreur d'observation; toutes les parties du fil de cuivre sont également affectées par l'étirage qui donne un produit très homogène.

D'ailleurs l'examen microscopique de coupes longitudinales et transversales d'un fil de cuivre étiré confirme cette hypothèse de l'homogénéité du métal que les essais font si nettement constater.

Relation entre les points de transformation d'un métal et les températures de recuit de ce métal écroui. — M. Guillet s'est demandé si un métal écroui devait être recuit au-dessus de son point de transformation le plus élevé, lorsqu'il en a plusieurs, pour que ce recuit soit complet.

Il a fait des expériences sur des fils de nickel et des fils d'acier de diverses teneurs en carbone, écrouis et ayant 2^{mm} de diamètre. Il les a fait recuire à des températures croissantes, de 100° à 900°. Ces recuits étaient pratiqués dans des bains de sel, le métal y étant immergé chaque fois pendant 3 minutes.

Nous reproduisons le tableau des résultats qu'il a obtenus d'une part avec le nickel, d'autre part avec divers aciers.

Fil de nickel.

| Température du recuit. | Charge de rupture. | Limite élastique. | Allongements pour 100. |
|---------------------------|-----------------------|----------------------|---------------------------|
| Métal brut..... | kg 72,3 | kg 42,3 | 3,5 |
| 100°..... | 69,5 | 41,8 | 6 |
| 200..... | 70,9 | 41,7 | 6 |
| 300..... | 72,2 | 42,1 | 5,5 |
| 400..... | 69,4 | 43,3 | 6,5 |
| 500..... | 64,3 | 28,4 | 7 |
| 600..... | 61,7 | 23,4 | 8 |
| 700..... | 58,9 | 3,5 | 20 |
| 750..... | 42,5 | 3,2 | 33 |
| 800..... | 41,9 | 3,2 | 33 |
| 900..... | 41,7 | 3,5 | 35 |

Fils d'acier de nuances diverses.

| Température du recuit. | Acier dur. | | | Acier demi-dur. | | | Acier doux. | | |
|------------------------|---------------------|---------------------|------------------------|---------------------|---------------------|------------------------|---------------------|---------------------|------------------------|
| | Charges de rupture. | Limites élastiques. | Allongements pour 100. | Charges de rupture. | Limites élastiques. | Allongements pour 100. | Charges de rupture. | Limites élastiques. | Allongements pour 100. |
| Brut..... | kg 220,6 | 180,3 | 2 | kg 90,6 | 65,3 | 3 | kg 96,3 | 64,7 | 6 |
| 100°..... | 204,3 | 154,8 | 3 | » | » | » | » | » | » |
| 250..... | 222,6 | 170,3 | 2 | » | » | » | » | » | » |
| 300..... | 220,6 | 167,5 | 4,5 | » | » | » | 87,8 | 63,8 | 6 |
| 350..... | 214 | 109,4 | 7 | 88,7 | 66,2 | 8 | » | » | » |
| 400..... | 197,5 | 117,2 | 6 | 87,6 | 64,3 | 8,5 | 85,4 | 61,5 | 6 |
| 450..... | 177 | 123,9 | 7 | 81,6 | 63,8 | 10 | 82,6 | 60,3 | 7 |
| 500..... | 169,6 | 123,9 | 3,5 | 82,8 | 63,5 | 10,5 | 80,6 | 57,8 | 7 |
| 550..... | 151,4 | 116,8 | 4,6 | 81,5 | 62,9 | 11 | 79,8 | 57,9 | 7 |
| 600..... | 140,3 | 98,5 | 4 | 76,2 | 59,8 | 11 | 72,2 | 50,5 | 8,5 |
| 650..... | 136,9 | 97,3 | 4 | 52,9 | 35,3 | 21 | 70,7 | 38,7 | 9,4 |
| 700..... | 115,1 | 75,3 | 5 | 48,5 | 25,2 | 26 | 42,8 | 23,8 | 25,5 |
| 750..... | 96,8 | 45,1 | 5,5 | 47,3 | 25,3 | 28 | 42,8 | 24,2 | 25,5 |
| 800..... | 87,9 | 43,4 | 8 | 50,2 | 24,5 | 25 | 44,2 | 23,5 | 23,5 |
| 850..... | 87,5 | 44,6 | 8 | 48,9 | 25,2 | 26 | 44,2 | 22,8 | 23 |
| 900..... | 87,7 | 44 | 8 | 49,3 | 25,6 | 27 | 44,7 | 23 | 21 |

RECUIT ET ÉCROUissage.

Pour le nickel, le recuit complet, d'après le premier tableau, n'est atteint qu'entre 700° et 750°, tandis que le point de transformation magnétique du nickel est à 350°. Le recuit complet est caractérisé par les allongements maxima et la limite élastique minimum.

Pour les fils d'acier, il a lieu entre 750° et 800° pour l'acier dur, 700° et 750° pour l'acier demi-dur et pour l'acier doux.

S'il y a une relation entre la température de recuit complet et le point de transformation, ce n'est qu'avec le point A_1 , et il n'est pas nécessaire d'atteindre le point de transformation le plus élevé.

Pour le nickel comme pour les aciers, une série de températures commence aux environs de 400° pour laquelle il y a fléchissement des charges et des limites élastiques.

Relation entre l'état d'écroutissage et la température de recuit complet. — M. Guillet a soumis à des expériences des fils de nickel différemment écroutis qu'il a fait recuire à des températures croissantes.

Voici les résultats obtenus :

| Température de recuit. | Fil de nickel n° 1. | | | Fil de nickel n° 2. | | | Fil de nickel n° 3. | | |
|------------------------|---------------------|------|------|---------------------|------|------|---------------------|------|------|
| | R. | E. | A %. | R. | E. | A %. | R. | E. | A %. |
| Brut... | 70 | 40,5 | 11 | 62,8 | 40,4 | 13 | 54,9 | 28,3 | 24 |
| 350°... | 70,2 | 41,4 | 13,5 | 67,8 | 38,5 | 13 | 59,8 | 27,5 | 19 |
| 400°... | 70,2 | 42,6 | 13,5 | 67,9 | 40,7 | 13,5 | 59,1 | 27,8 | 19 |
| 450°... | 68,5 | 43,4 | 14 | 65,9 | 39,3 | 15 | 58,9 | 25,4 | 17 |
| 500°... | 67,2 | 29,7 | 14 | 64,8 | 28,6 | 16 | 58,2 | 22,3 | 23 |
| 550°... | 65 | 30,1 | 16 | 63 | 32,5 | 16 | 57,3 | 16,4 | 22 |
| 600°... | 63,8 | 28 | 17 | 62,6 | 30,3 | 16 | 55,8 | 18,7 | 26 |
| 650°... | 59,9 | 27,6 | 20 | 58,6 | 25,4 | 22,5 | 53,5 | 3,9 | 30 |
| 700°... | 58,9 | 3,8 | 28 | 58,4 | 3,9 | 25 | 53,3 | 5,4 | 28 |
| 750°... | 59,6 | 3,5 | 28 | 57,9 | 3,2 | 23 | 59,9 | 3,3 | 31 |
| 800°... | 50,3 | 3,7 | 33 | 48,9 | 3,7 | 25 | 51,1 | 3,9 | 38 |

M. Guillet fait les mêmes constatations, c'est-à-dire abaissement très net de la limite élastique avec augmentation importante des allongements vers 700°-750°. Il a poussé l'expérience sur d'autres produits métallurgiques, en particulier sur les fils de laiton. Mais il est difficile de lire sur les diagrammes des essais de traction la limite élastique, de sorte qu'il ne lui a pas été possible de chiffrer des résultats sur ce point.

En ce qui concerne les résistances et les allongements, il a obtenu les mêmes résultats que M. Gard sur des bandes de laiton.

Essais sur des fils de laiton du titre 67 % Cu et 33 % Zn.

| Température du recuit. | Laiton très peu écroui. | | Laiton moyennement écroui. | | Laiton très écroui. | |
|---------------------------|-------------------------------|------|----------------------------------|------|------------------------|------|
| | R. | A %. | R. | A %. | R. | A %. |
| Brut..... | 50,0 | 12 | 57,2 | 5 | 70,5 | 2,5 |
| 100°..... | 50,5 | 11,5 | 56,8 | 5,5 | 71,2 | 3 |
| 200°..... | 49,7 | 12,5 | 57,3 | 6,5 | 70,8 | 3 |
| 250°..... | 48,5 | 12 | 56,8 | 6 | 68,4 | 4,5 |
| 300°..... | 47,7 | 18 | 47,9 | 10 | 58,6 | 8,5 |
| 350°..... | 46 | 18 | 47,2 | 19 | 46 | 30 |
| 400°..... | 47,3 | 28 | 45,6 | 28 | 44,7 | 32,5 |
| 450°..... | 38,5 | 38 | 47,3 | 28 | 41,8 | 32 |
| 500°..... | 40,2 | 38,5 | 38,5 | 38 | 45,5 | 30,5 |
| 550°..... | 40 | 36 | 42,1 | 38 | 43,3 | 33,5 |
| 600°..... | 35 | 45 | 39,4 | 43,5 | 44,1 | 34 |
| 650°..... | 36,7 | 45,5 | » | » | 40,8 | 42 |
| 700°..... | 34,8 | 55 | 34,8 | 48 | 41 | 43,5 |
| 750°..... | 33,5 | 48,5 | 36,5 | 50 | 39,5 | 44,5 |
| 800°..... | 33,9 | 50,5 | 32,9 | 48 | 37,3 | 44 |

Pour l'acier demi-dur, il a obtenu les résultats suivants :

| Température du recuit. | Acier peu écroui. | | | Acier moyennément écroui. | | | Acier très écroui. | | |
|------------------------------|-------------------|------|------|------------------------------|------|------|--------------------|------|------|
| | R. | E. | A %. | R. | E. | A %. | R. | E. | A %. |
| Brut..... | 70,7 | 40,5 | 8,3 | 81 | 60,5 | 3,5 | 90,6 | 65,3 | 3 |
| 350°..... | 69,5 | 39,3 | 4,5 | 82,4 | 60,8 | 6,5 | 80,7 | 66,2 | 8 |
| 400..... | 68,3 | 37,8 | 12,5 | 82,6 | 61,2 | 7,5 | 87,6 | 64,3 | 8,5 |
| 450..... | 69,3 | 39,1 | 10,3 | 78,9 | 59,3 | 9 | 81,6 | 63,8 | 10 |
| 500..... | 69,3 | 38,5 | 12,5 | 78,5 | 58,4 | 10 | 82,8 | 63,5 | 10,5 |
| 550..... | 68,5 | 36,7 | 13 | 78 | 59,5 | 10 | 81,5 | 62,9 | 11 |
| 600..... | 66,7 | 37,5 | 14 | 74,2 | 57,9 | 12 | 76,2 | 59,8 | 11 |
| 650..... | 57,3 | 32,8 | 13,5 | 63 | 29,3 | 14 | 52,9 | 35,3 | 21 |
| 700..... | 48,5 | 25,7 | 26,5 | 51,9 | 26,1 | 22,5 | 48,5 | 25,2 | 26 |
| 750..... | 48,2 | 24,8 | 25,5 | 49,9 | 25,8 | 22,5 | 47,3 | 25,3 | 28 |
| 800..... | 48,5 | 24,5 | 26 | 48,8 | 25,3 | 23 | 50,2 | 24,5 | 25 |
| 850..... | 48,3 | 25,2 | 25,5 | 48,3 | 24,1 | 24,5 | 48,9 | 25,2 | 26 |
| 900..... | 49,1 | 25,7 | 26,3 | 49,2 | 25,8 | 23,5 | 49,3 | 25,6 | 27 |

Les chiffres de ces essais montrent bien que le recuit est complet quel que soit le degré d'écrouissage entre 650° et 750°.

Influence du temps de chauffage sur le résultat du recuit. — Le même savant a montré que, dans le revenu d'un acier trempé, le chauffage influait considérablement sur le résultat de l'opération. Un acier à 0,850 pour 100 de carbone, trempé à 850°, donne les mêmes résultats aux examens de micrographie, de dureté, de résistance électrique, après les trois revenus suivants :

- 1° Chauffage de 4 heures à 250°;
- 2° Chauffage de 30 minutes à 300°;
- 3° Chauffage de 10 minutes à 350°.

Transposant l'expérience et agissant sur les temps de chauffage des recuits, M. Guillet a obtenu les chiffres suivants en ce qui concerne des fils de nickel et d'acier dur :

1° Expériences à 250°.

| Durée de chauffage | | 3'. | 10'. | 20'. | 30'. |
|--------------------|------------|-------|-------|-------|-------|
| Fil de nickel | R..... | 73,6 | 71,3 | 67,4 | 69,4 |
| | E..... | 43,5 | 42,8 | 41,5 | 41,8 |
| | A %/0..... | 8 | 7 | 9 | 9,5 |
| Fil d'acier dur | R..... | 215,7 | 214,5 | 209,5 | 210,4 |
| | E..... | 180,5 | 179,8 | 176,5 | 178,3 |
| | A %/0..... | 1,5 | 2 | 3 | 3 |

2° Expériences à 400°.

| Durée du chauffage. | | 3'. | 5'. | 10'. | 20'. | 30'. | 45'. | 60'. |
|---------------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Fil de nickel | R..... | 67,5 | 68,4 | 68,3 | 63,7 | 63,7 | 65,6 | 63,8 |
| | E..... | 46,4 | 46,8 | 47,2 | 45,4 | 46,2 | 46,8 | 47,1 |
| | A %/0... | 7,5 | 8 | 7,5 | 7,6 | 7,5 | 7 | 8 |
| Fil d'acier dur | R..... | 190,4 | 186,2 | 181,4 | 178,9 | 178,2 | 173,3 | 169 |
| | E..... | 118,5 | 120,4 | 123,5 | 119,5 | 118,5 | 116,5 | 114,3 |
| | A %/0... | 7 | 6 | 6 | 7 | 6 | 7 | 7 |

3° Expériences à 550°.

| Durée du chauffage. | | 3'. | 10'. | 20'. | 30'. | 120'. | 240'. |
|---------------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Fil de nickel | R..... | 65,2 | 64,7 | 63,7 | 62,5 | 65 | 65,4 |
| | E..... | 46,4 | 44,5 | 44,8 | 45,2 | 44,5 | 46,4 |
| | A %/0..... | 10 | 13 | 12,5 | 13 | 14,5 | 14,5 |
| Fil d'acier dur | R..... | 160,6 | 137,9 | 124,8 | 125,7 | 110,7 | 100,5 |
| | E..... | 120,5 | 99,5 | 98,3 | 96,5 | 80,2 | 78,5 |
| | A %/0..... | 6 | 6 | 6 | 6 | 7,5 | 9 |

M. Guillet conclut de ces résultats que l'influence du temps est sensiblement nulle, surtout en ce qui concerne les allongements. L'abaissement très faible, pour le nickel, de la charge de rupture,

est plus accusé pour l'acier dur, surtout quand le temps de recuit se prolonge. Mais, il intervient une décarburation superficielle difficile à éviter.

La conclusion d'ensemble est la suivante : c'est que l'influence du temps est limitée en ce qui concerne le recuit, contrairement à ce qui se passe dans le revenu.

Quelques propriétés de l'acier recuit. — 1° Lorsqu'on augmente la température du recuit de l'acier et du fer, la ténacité ne diminue pas immédiatement et régulièrement. Elle passe par un maximum entre 200° et 300°. Si le recuit a été précédé d'un étirage à froid, on constate un résultat semblable.

Nous citerons l'exemple même indiqué par la *Revue de Métallurgie*. Des prélèvements de 20^m de longueur faits sur un fil d'acier à 0,8 pour 100 de carbone réduit par des opérations de tréfilage à 66 pour 100, c'est-à-dire ayant un diamètre de 1^{mm},8, ont été essayés à la torsion et à la traction. Les caractéristiques furent les suivantes :

| Température. du recuit. | R (en kg par mm ²). | Nombre de torsions avant rupture. |
|----------------------------|---------------------------------------|---|
| 47°..... | 190,4 | 15 |
| 72..... | 190,6 | 16 |
| 100..... | 189,3 | 15 |
| 125..... | 191,5 | 15 |
| 150..... | 193,3 | 16 |
| 175..... | 194,5 | 13 |
| 200..... | 198,9 | 14 |
| 225..... | 197 | 18 |
| 250..... | 194,7 | 15 |
| 275..... | 191 | 16 |
| 314..... | 190,6 | 15 |
| 340..... | 188,2 | 15 |
| 364..... | 185,4 | 13 |
| 391..... | 182,1 | 13 |
| 442..... | 166,1 | 12 |
| 469..... | 150,9 | 11 |
| 493..... | 137,5 | 10 |
| 547..... | 113,8 | 14 |
| 651..... | 81,5 | 19 |
| 755..... | 61,7 | 20 |

Ainsi le maximum de ténacité s'observe à 200°, coïncidant avec le minimum de la résistance à la torsion.

2° Considérons maintenant l'effet du recuit au point de vue de l'action des acides sur le produit traité.

Avec le même échantillon, la solubilité dans l'acide sulfurique à 1 pour 100 pendant 24 et 48 heures donne des résultats invariables jusqu'à la température de recuit de 500°. Si cette dernière augmente, la solubilité décroît rapidement.

3° L'aspect au microscope après polissage et corrosion ne commence à changer que pour les échantillons ayant été recuits à une température supérieure à 400°.

4° Jusqu'à 200°, la résistance électrique est sans changement; ensuite elle diminue légèrement sans dépasser 2 pour 100, qui se constate sur l'échantillon recuit à 400°.

5° L'intensité d'aimantation d'un fil d'acier placé dans un solénoïde d'aimantation (267 gauss) donne un maximum pour la température de 200°; les changements que le recuit apporte à cette propriété ne subsistent pas et, à la température ordinaire, la modification de l'intensité d'aimantation obtenue par le recuit disparaît presque totalement.

Une remarque est à faire : la température de 200° indique une transformation dans la structure des constituants du métal, puisque le recuit opéré à cette température amène une modification de certaines propriétés. En effet, la micrographie indique qu'il y a transformation de la cémentite.

Influence du traitement thermique sur la résistance mécanique des bronzes. — Lorsque le traitement mécanique qu'a subi un bronze est exactement connu, on se propose parfois de rechercher le traitement thermique approprié, qui contribuera à la disparition de l'érouissage.

Trois points sont à fixer : l'état d'érouissage du métal, la température du recuit et sa durée.

Lorsqu'on porte le métal au-dessus d'une température déterminée, on constate que l'érouissage disparaît complètement; au-

dessous de ce point, même si la durée du recuit est prolongée, l'écroissage subsiste partiellement.

D'où la conclusion suivante : Avant tout, déterminer la température du recuit et réduire le temps de ce recuit au minimum pour éviter l'oxydation.

Exemple : Un alliage de 94 pour 100 de cuivre et 6 pour 100 d'étain a été fondu dans un creuset de graphite; après désoxydation au phosphore de cuivre, il a été coulé en plaque, puis recuit et laminé à 7^{mm}.

Ayant donné un disque qui, escargoté, a été transformé en un fil successivement recuit, décapé, étiré à 6^{mm},5 de diamètre et finalement recuit à nouveau, il a servi à composer une première série d'échantillons. Une autre série a été obtenue de la même manière, mais avec un tréfilage poussé jusqu'à 4^{mm},8, suivi également d'un recuit pour finir.

Le degré d'écroissage est défini, dans ces expériences, par la formule

$$\frac{S - S'}{S} \times 100,$$

dans laquelle S et S' représentent les surfaces des sections avant et après les nouveaux tréfilages qu'on a fait subir à ces deux séries d'échantillons.

Le tableau suivant reproduit leurs caractéristiques :

| Traitement. | Diamètre. | Degré d'écroissage. $\frac{S - S'}{S} \times 100.$ |
|------------------------|-----------|---|
| <i>Première série.</i> | | |
| Fil recuit..... | 6,50 | 0 |
| Fil étiré 1 fois..... | 5,20 | 36 |
| » 2 »..... | 3,90 | 64 |
| » 3 »..... | 3 | 78,7 |
| <i>Deuxième série.</i> | | |
| Fil recuit..... | 4,80 | 0 |
| Fil étiré 1 fois..... | 3,60 | 43,7 |
| » 2 »..... | 2,70 | 68,4 |
| » 5 »..... | 1,85 | 84,1 |
| » 7 »..... | 1,35 | 92,1 |

L'état d'écroissage est donc assez nettement déterminé. Les résultats ont été les suivants :

1^o *Influence de la température.* — Si l'on fait subir à ces échantillons des recuits à températures croissantes, on constate que la limite élastique et la charge de rupture diminuent. La chute est particulièrement subite entre 200° et 350°.

Plus les échantillons sont écrois, plus est basse la température à partir de laquelle la charge de rupture et la limite élastique éprouvent une brusque diminution. Au-dessous de 315°, les propriétés mécaniques de ces échantillons recuits sont indépendantes de l'état d'écroissage. Donc après un recuit à 315° disparaissent tous les effets du tréfilage et le degré d'écroissage devient nul comme si le métal n'avait pas été travaillé.

Les allongements offrent des particularités. Quatre zones sont à observer.

Les recuits pratiqués au-dessous de 315° n'influencent pas sensiblement les allongements dans les essais à la traction des échantillons considérés.

Entre 315° et 400°, les allongements augmentent d'environ 30 pour 100 ; à 750° se présente le maximum avec une augmentation de 45 pour 100.

Ensuite les allongements vont en diminuant.

2^o *Influence du temps de recuit.* — En dehors de la première zone, la durée est sans importance, les qualités mécaniques ne sont pas modifiées. Dans la première zone on remarque que le temps ne peut se substituer qu'incomplètement à la température, c'est-à-dire qu'après un très long recuit à basse température, le degré d'écroissage ne devient pas nul.

La vitesse de refroidissement ne modifie pas les effets de recuit. Ainsi les échantillons précédents, trempés après recuit, ou refroidis lentement à l'air, conservent leurs propriétés mécaniques (1).

(1) GÆRENS et DUMONT.

Développement des grains dus au recuit. — La micrographie permet d'examiner la texture des métaux; elle fait constater l'influence des traitements thermiques et mécaniques sur cette texture; c'est ainsi que des métaux écrouis, puis recuits, offrent un aspect cristallin dont l'étude a été faite par plusieurs savants, surtout par M. Le Chatelier.

Lorsqu'on recuit un métal écroui, les grains cristallins se développent et parviennent à des dimensions qui varient avec la température du recuit. Cependant M. Le Chatelier, à la suite de nombreuses expériences, conclut que la grosseur des grains, à durée de chauffage égale, ne croît pas régulièrement avec la température de recuit. Dans les métaux purs et les solutions solides qui en dérivent, les grains les plus gros ne sont pas obtenus toujours par la température la plus élevée comme les plus petits par la température la plus basse.

Les grains sont en général volumineux près de la température de fusion. Pour le fer, les résultats sont variables; les grains sont de $0^{\text{mm}},15$ environ de 600° à 850° .

Si, localement, on écrouit un métal recuit et si on le recuit à nouveau, au bord des régions écrouies, se développent des grains qui atteignent de grandes dimensions et qui débordent même sur les régions non écrouies; leur croissance se produit d'une façon identique à celle des grains de solidification à partir d'une paroi froide. Les grains dans le fer sont de $0^{\text{mm}},3$ à $0^{\text{mm}},7$ pour des températures de 600° à 800° et ils se propagent à raison de 1^{mm} à 2^{mm} en une heure.

Le recuit de l'étain brut d'étirage se fait avec régularité en fonction de la température et du temps de recuit; les grains croissent assez rapidement et au bout d'une heure les dimensions ne varient plus avec le temps.

L'écrouissage de l'étain présente des particularités curieuses. Écroui par étirage, par exemple, les grains se divisent et s'étendent; la structure est très variable suivant le travail subi.

Si l'écrouissage se produit d'une façon localisée, comme dans le cas du pliage, il se forme des grains au recuit, qui croissent perpen-

diculairement à la ligne du pliage et qui envahissent le métal voisin qui n'a pas été primitivement écroui. Les divers modes d'étirage n'influencent pas le recuit, les grains croissent rapidement en fonction de la température; à 100°, ils sont plus étendus que les grains ordinaires recuits au voisinage du point de fusion. L'effet du temps est très accusé aux environs de la température de fusion et jusque vers 150°; après un quart d'heure de chauffage, la grosseur des grains obtenus aux différentes températures varie peu.

Le plomb pur fondu offre à peu près le même aspect que l'étain; l'écroissage dû à l'étirage détermine des grains pourtant moins réguliers et plus petits, et la structure au microscope apparaît comme celle d'une substance amorphe. La croissance des grains par recuit est moins régulière que pour l'étain; le pliage donne des résultats analogues à ceux obtenus avec ce dernier métal.

Le zinc pur est cristallin, relativement fragile à la température ordinaire; il donne un exemple de recuit spontané à la température ordinaire et le phénomène a une durée assez longue, on l'observe au microscope et même à l'œil nu; après un ou deux jours, on aperçoit, en effet, des modifications de la surface polie, quand on l'éclaire obliquement. Après un mois de séjour dans un bain de 90°, on constate que la surface s'est fortement vallonnée et que les dénivellations atteignent 1^{mm}.

L'aluminium s'étire très facilement à la température ordinaire, la texture est extrêmement fine, on ne voit au microscope aucun grain. Après recuit à 230° environ, l'apparition des grains peut s'observer.

Grard a étudié avec un très grand soin le recuit du cuivre écroui. L'écroissage durcit rapidement le métal, lui enlève toute apparence cristalline; les recuits d'une demi-heure à 2 heures paraissent modifier la structure vers 200°, les stries et les alignements produits par le laminage ou le tréfilage disparaissent et font place à une agglomération de globules peu visibles. Au-dessus de 200°, les grains de recuit se développent et augmentent régulièrement jusqu'à la température de fusion.

L'influence des impuretés dans la structure, après recuit, du fer

est très grande; cependant, d'une manière générale, une certaine régularité dans la croissance des grains se manifeste quand la température du recuit augmente. Le maximum de grosseur serait obtenu par la température de 700°.

Charpy et Grard ont successivement mesuré avec une grande précision la grosseur des grains dans les laitons recuits après un complet écouissage. Ils sont arrivés aux conclusions suivantes : La température du début du recuit complet est d'autant plus basse que la teneur en zinc est plus faible; cette température baisse légèrement quand on augmente l'intensité d'écrouissage. On peut dire, d'une manière générale, que le recuit à diverses températures d'un métal entièrement écroui dans son ensemble produit des grains de grosseur finale très différente. On obtient, semble-t-il, de gros grains à la température de début de recuit et à la température de fusion du métal; la grosseur des éléments passant par un minimum entre ces deux températures. Dans le cas de l'écrouissage local du métal recuit, il y a une sorte d'arrêt du phénomène de la formation des grains, par suite du développement de germes créés par la déformation locale.

Au point de vue industriel, il faut éviter la formation d'une structure à grains volumineux, car cette constitution a pour caractère la fragilité, qui, par exemple, dans le cas de l'acier, est très grande. Cette fragilité est moindre pour le cuivre, mais une telle structure occasionne des facilités de corrosion et de fissuration.



Principe de l'étirage. — L'étirage est une opération qui a pour but de compléter le travail exécuté par le laminage en donnant au métal un profil que l'on ne peut obtenir au laminoir. Il consiste à introduire une barre, préparée à cet effet, dans une ouverture de forme déterminée, pratiquée dans une pièce de métal, appelée *filière*, pour la faire passer ensuite dans toute sa longueur, au moyen d'un effort de traction, à travers cette ouverture; le profil de la barre se transforme et devient semblable à celui du trou de la filière.

Cette opération a en outre pour résultat de diminuer la section de la barre; il en résulte, par suite, un allongement de celle-ci.

Quelquefois, on se propose seulement de modifier la forme de cette section sans qu'il y ait réduction de sa surface.

D'une façon plus générale, il y a d'autres moyens de pratiquer l'étirage, par exemple au marteau, à la presse. Le laminage peut être considéré comme une sorte d'étirage. Nous ne nous occuperons ici que de l'étirage par traction qui, en définitive, constitue seul l'étirage proprement dit. Nous ajouterons cependant quelques mots sur la fabrication des tubes sans soudures qui fait usage, dans la plupart des cas, de l'étirage par compression.

La force nécessaire pour produire, avec une vitesse déterminée, la modification de la section de l'objet à étirer, barre ou fil, augmente évidemment : 1^o avec la réduction de cette section; 2^o avec la dureté du métal à travailler. Enfin elle dépend aussi de la forme

de l'ouverture. En effet, si cette ouverture, bien qu'étroite, est faite comme un entonnoir ; si, de plus, sa surface intérieure est polie et bien graissée, l'étirage sera facilité.

Pour obtenir une réduction importante de section, il est souvent nécessaire de faire l'opération en plusieurs fois, par des diminutions successives.

Si R représente la charge de rupture du métal à étirer, S et s les sections primitive et finale de la barre (ou du fil), comme l'effort de traction T s'exerce sur la portion de la barre dont la section est diminuée, il faut, pour éviter la rupture,

$$s > \frac{T}{R}$$

La seule variable est T, pour un métal déterminé et pour une diminution de section fixée à l'avance. Mais T ne peut pas être réduit indéfiniment, d'abord parce qu'il doit être supérieur à l'effort résistant qui résulte du passage dans la filière et aussi parce qu'il faut que l'opération se fasse avec une certaine vitesse à cause du rendement industriel de la fabrication. On est ainsi conduit, pour amener la section de S à s, à faire passer successivement la barre dans une série de filières dont les ouvertures présentent des surfaces décroissantes :

$$S > s' > s'' > s''' > \dots > s.$$

D'autre part, le métal, subissant de cette façon un travail progressif, se comportera mieux et le produit fini sera de meilleure qualité.

La vitesse d'étirage est très variable suivant le diamètre du fil et la nature du métal ; elle reste comprise généralement entre 0^m, 50 et 1^m, 50 à la seconde.

Il faut aussi remarquer que le produit étiré sera toujours de forme cylindrique (la courbe directrice étant le contour de l'ouverture de la filière).

Filières. — Nous avons dit que la filière est la pièce de métal

qui porte l'ouverture dans laquelle doit passer la barre. Étant donné le grand nombre de formes à obtenir et aussi à cause des variétés des dimensions des sections, les filières employées pour l'étirage sont formées de plusieurs pièces qui viennent exactement s'emboîter dans une monture servant, à peu près, pour tous les cas.

Pour tremper les anneaux-filières en acier dur ou extra-dur pour étirage de barres et de tubes, on les enferme dans une boîte en tôle, garnie préalablement de poussier de charbon de bois, de

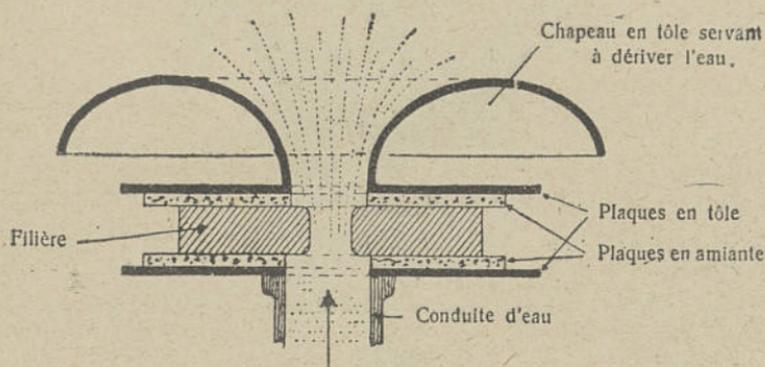


Fig. 24.

façon que les pièces à tremper en soient entièrement entourées, et l'ensemble, ainsi formé, est porté à une température de 760°-780° (rouge cerise); aussitôt cette température uniformément atteinte, on enlève les filières rapidement et l'on ne trempe que le contour du trou en employant l'artifice suivant : sur chaque face de la filière est appliquée une plaque d'amiante, percée d'un trou un peu plus grand que le trou de la filière; le tout est pressé entre deux tôles dont l'une laisse passer un jet d'eau puissant, tandis que l'autre est arrangée en déversoir (comme l'indique la figure).

La figure 25 représente un dispositif de montage. Les quatre joues *a* limitent l'ouverture; elles sont en acier. Le support est en

fonte, il est maintenu en place par des vis. Pour modifier le profil, il suffira, en se servant de la pièce *b*, de changer les joues *a*.

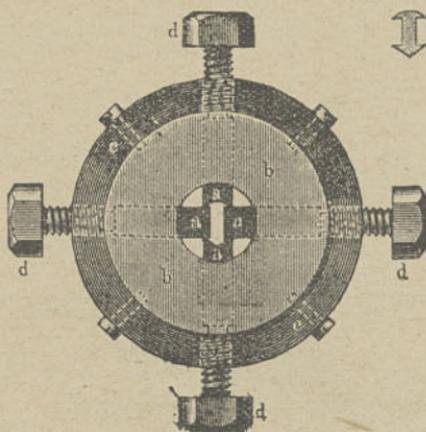


Fig. 25.

Dans certains cas, en vue de diminuer le frottement du métal

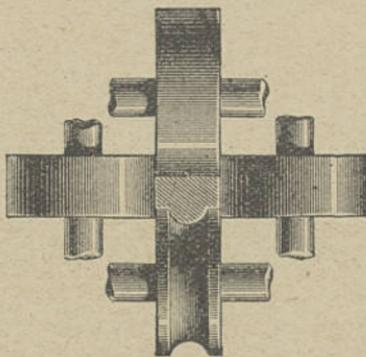


Fig. 26.

dans la filière, pendant le passage de la barre, on dispose des galets qui remplacent les joues dont nous venons de parler (*fig. 26*).

Remarquons qu'il faut qu'ils soient très bien montés; en effet, s'ils ne sont pas parfaitement centrés, ils ne tournent pas et s'ils se déplacent suivant leur axe même très légèrement, le produit étiré présente des défauts sur ses bords. Leur montage est représenté par la figure 27, l'écrou permet le réglage.

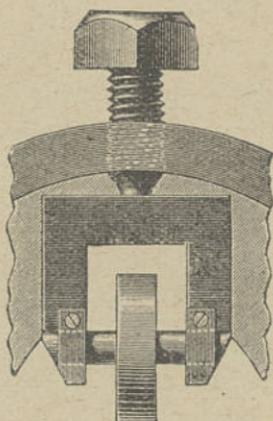


Fig. 27.

Lorsqu'on veut obtenir, tout le long de la barre, des dessins se reproduisant périodiquement, on pratique des cannelures appropriées sur la surface de roulement du galet. Elles forment, par la compression que subit le métal pendant son passage dans l'appareil, des creux et des reliefs qui décorent une ou plusieurs faces, sur toute la longueur de la barre.

Ces galets sont toujours faits d'un métal dur, résistant à l'usure et qui est généralement de l'acier trempé, quelquefois de la fonte trempée. Revenons aux filières ordinaires. Elles sont formées d'un morceau d'acier dans lequel on a percé un ou plusieurs trous. Dans ce dernier cas, ils ont des diamètres différents, ce qui permet de faire sur le même banc une série d'étirages sans avoir besoin de changer de filière. Il n'y a qu'à la déplacer d'une quantité

suffisante pour que le trou correspondant à la passe qu'on veut faire prenne exactement la position convenable.

Le réglage de la position de la filière par rapport à la barre présente une importance très grande; si elle n'est pas exactement centrée, la filière déterminera des tensions internes, non symétriques, dans la barre qui l'obligeront à des déformations : la barre, après l'opération, ne sera pas droite.

Étirage proprement dit. — L'opération s'effectue sur des appareils appelés *bancs d'étirage*; ce sont des sortes de tables sur lesquelles la filière est solidement fixée; une pince, reliée à un appareil mécanique permettant d'exercer une traction, saisit l'extrémité de la barre à sa sortie de la filière. Lorsque la pince a effectué toute sa course, on la ramène sur elle-même après lui avoir fait lâcher la barre et l'on recommence l'opération sur une autre si sa longueur est plus petite que le plus grand déplacement possible de la pince ou sur la même dans le cas contraire. Disons tout de suite qu'on évite autant qu'on le peut d'étirer une barre en plusieurs fois, car la pince laisse une trace de sa morsure.

Jusqu'au *xiv^e* siècle, le mouvement de la tenaille se faisait à la main. A cet effet, l'ouvrier était assis sur une balançoire suspendue devant la filière; avec les pieds, il reculait, entraînant avec lui la barre au moyen de la pince qu'il tenait dans les mains ou encore attachée à sa ceinture; il détachait ensuite la pince et, retournant auprès de la filière, il recommençait l'opération. Plus tard, un arbre à manivelle actionné directement par une roue hydraulique, remplaça l'homme.

Actuellement, on distingue deux sortes d'appareils, le banc à étirer ordinaire et le banc à bobines, qui offrent entre eux la différence suivante : dans le premier appareil, on part d'une barre droite ou à peu près, le produit final étant également une barre, dans l'autre, le produit initial est une couronne obtenue par le métal enroulé en cercle et le produit final est également disposé en couronne. Si l'on veut transformer la couronne en barres, il

faudra lui faire subir une opération complémentaire, appelée *dressage*, que nous décrirons plus loin.

Toute opération pratiquée sur bobines est appelée *tréfilage* parce qu'elle n'est faite que sur les fils qu'on peut considérer comme des barres dont le diamètre est inférieur à 1,4^{mm}.

Pour les barres, il y a trois types d'appareils employés dans l'étirage :

- 1^o Les bancs à crémaillère ;
- 2^o Les bancs à chaîne ;
- 3^o Les bancs hydrauliques.

1^o *Bancs à crémaillère*. — Leur usage est peu répandu, car ils ne permettent pas d'opérer rapidement. Il y en a deux sortes. Les

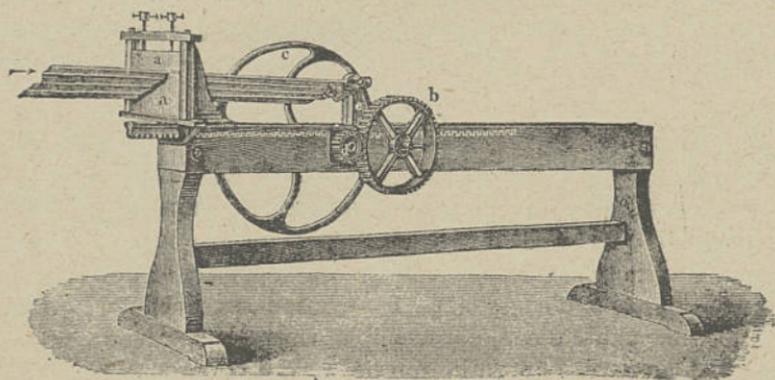


Fig. 28.

uns sont actionnés mécaniquement et les autres, au contraire, à la main. La plupart sont construits de manière à fonctionner indifféremment soit d'une façon, soit de l'autre.

Le banc proprement dit se compose d'une longue table en fonte, reposant sur quatre pieds ou bien sur six lorsque la longueur du produit à travailler l'exige.

A une extrémité se trouve un dispositif robuste, sur lequel on

fixe la filière. Les tenailles sont attachées à une tige mise en mouvement au moyen d'une manivelle par l'intermédiaire d'un engrenage. Si l'on veut faire usage d'une transmission par courroie, il n'y a qu'à remplacer la manivelle par une poulie (*fig. 28*).

Le grand inconvénient de cet appareil réside dans la lenteur avec laquelle s'effectue le retour en arrière de la crémaillère; il y a là une perte de temps appréciable qui se renouvelle à chaque opération. Il faut, en effet, arrêter la transmission, puis l'inverser, enfin l'arrêter à nouveau lorsque la pince est revenue à sa position initiale.

Un perfectionnement consiste à disposer le pignon de façon qu'on puisse rendre, par un léger déplacement de celui-ci, toute liberté à la crémaillère qu'on ramène vers la filière, rapidement, avec la main. Le retour en arrière étant ainsi effectué, on rétablit le pignon dans sa position primitive et l'opération peut recommencer.

2° *Bancs à chaîne*. — Ce sont les plus employés. On peut leur demander jusqu'à 100 tonnes d'effort total. Ils sont toujours actionnés mécaniquement. Ils se composent, comme les appareils précédents, d'un bâti, en fonte, en bois ou en fers profilés, portant à une extrémité un logement destiné à supporter la filière, et à l'autre, un train d'engrenages, en relation avec une force quelconque, une chute d'eau, par exemple. Une chaîne sans fin circule tout le long de ce banc. Elle tourne sur deux roues dentées dont les axes sont dans une direction perpendiculaire à la longueur du banc; ces roues sont placées chacune à une extrémité de la machine. Celle qui est près de la filière soutient simplement la chaîne en jouant le rôle de guide et de support; l'autre est reliée directement aux engrenages, elle détermine donc le mouvement de la chaîne.

Après avoir saisi dans une pince l'extrémité de la barre qui sort de la filière, on fixe cette pince à la chaîne; par suite du déplacement continu de celle-ci, la barre tout entière, si le banc est suffisamment long, passera dans la filière. Il est évidemment nécessaire

que la roue qui entraîne soit dentée; celle, au contraire, placée près de la filière peut très bien être un simple galet.

Quand la longueur du banc est grande, on dispose quelquefois un galet intermédiaire pour soutenir la chaîne.

Dans les appareils qui n'exigent qu'une faible puissance, inférieure à 5000^{kg}, par exemple, les engrenages reçoivent leur mouvement d'une transmission par poulies et courroie.

Lorsqu'on désire opérer tantôt à une vitesse, tantôt à une autre, les engrenages sont doubles et, au moyen d'un manchon à griffes, on fait fonctionner ceux qui permettent de réaliser la vitesse qu'on se propose. Ceci est nécessaire dans deux cas : 1° si l'on doit travailler un métal plus malléable que précédemment; 2° si la réduction de la section de la barre est moins importante. La diminution de l'effort résistant donne la possibilité d'augmenter la vitesse d'étirage, par suite, il faut nécessairement changer le rapport des engrenages.

Étudions maintenant la pince et ses accessoires. De chaque côté du banc et sur toute la longueur, une sorte de voie de roulement est préparée, soit par rabotage de la partie supérieure des deux flasques du banc, soit par l'adjonction de deux sortes de rail. Ceci permet à un chariot, de quatre ou six galets, de rouler d'un bout à l'autre de l'appareil. Ce chariot porte la pince et le système d'accrochage qui doit réunir celle-ci à la chaîne.

La pince se compose de deux mâchoires articulées qui serrent la barre d'autant plus fortement que la résistance est plus grande. Nous retrouverons cette disposition dans le matériel de tréfilerie. Il y a une particularité à signaler : les mâchoires n'ont qu'une légère surface de contact avec la barre; il peut se produire un glissement déterminant un arrêt, par suite un retard. Cet incident est d'autant plus fréquent que, pour une même pince, le diamètre de la barre est plus grand, car l'angle d'ouverture, en croissant, fait diminuer la surface de contact. On a imaginé, pour obvier à cet inconvénient, des pinces dont les mâchoires serrent parallèlement les barres quel que soit leur diamètre.

Le chariot porte, du côté opposé à la pince, c'est-à-dire tourné

vers les engrenages, un crochet monté sur un axe horizontal autour duquel il peut pivoter. Ce crochet, en s'abaissant, entre dans un maillon de la chaîne, ce qui permet l'entraînement de tout le système. Lorsque la barre sort de la filière après l'étirage, la cessation brusque de la résistance produit un choc violent qui fait basculer un contrepoids solidaire du crochet et automatiquement ce dernier se dégage de la chaîne; il n'y a qu'à faire revenir le chariot vers la filière. La pince, d'elle-même, lâche la barre, car nous avons dit qu'elle ne pouvait agir que pendant l'effort de traction; dès qu'il cesse, les mâchoires s'ouvrent.

Pour le retour du chariot vers la filière, on a imaginé plusieurs dispositions, notamment une inclinaison assez accentuée de la surface supérieure du banc qui, au lieu d'être horizontale, va en s'élevant du côté des engrenages. De cette façon, après le choc qui marque la fin de l'opération en dégageant le chariot de la chaîne et la barre de la pince, ce chariot, par l'effet de la pesanteur, revient de lui-même vers la filière. Quand le banc est horizontal, l'ouvrier qui se tient près de la filière, tire sur une corde attachée au chariot et le ramène ainsi sans qu'il ait à se déplacer. Quelquefois cette corde passe sur une poulie et porte un contrepoids qui, soulevé pendant l'opération, détermine par sa chute, automatiquement le retour en arrière.

La disposition pince, chariot et crochet, telle que nous venons de la décrire, convient lorsque l'effort n'est pas très grand. Il faut la modifier pour les bancs d'une puissance supérieure à 10 tonnes afin de la rendre plus robuste. On lui substitue un chariot de quatre roues seulement au lieu de six. Le crochet est identique au précédent, mais il n'y a plus de pince, elle est remplacée par une sorte de coin qui serre l'extrémité de la barre. On peut se représenter le dispositif comme un tronc de pyramide quadrangulaire creux dont la petite base est tournée vers la filière et la grande du côté des engrenages. L'extrémité de la barre est fixée dans l'axe de cette pyramide solidaire du chariot, au moyen de deux ou quatre coins. Lorsque la passe est terminée, le choc qui en résulte fait sauter les coins et la barre se trouve ainsi déagée.

Le serrage, comme dans le cas de la pince, est d'autant plus énergique que l'effort de traction est plus grand.

3° *Bancs hydrauliques.* — Le principe reste le même, mais le déplacement de la pince est obtenu par le mouvement d'un piston hydraulique dans un cylindre disposé suivant le sens de la longueur à l'extrémité du banc. Des leviers commandent et règlent la marche en agissant sur le distributeur d'eau sous pression provenant d'un accumulateur.

Ces appareils sont avantageux pour l'étirage des barres de forte section, mais leur installation est très coûteuse et ils ne peuvent être utilisés que pour les grandes puissances, 100 tonnes et plus. Au-dessous de ce chiffre, le banc à chaîne est recommandé malgré le gros inconvénient que présentent ces démarrages brusques qui sont très nuisibles pour les appareils et aussi pour le produit à travailler. La possibilité d'admettre progressivement une forte pression dans le cylindre d'un banc hydraulique procure l'avantage d'une grande douceur dans le démarrage.

Les pressions utilisées sont très variables : elles atteignent 250^{kg} et ne descendent presque jamais au-dessous de 100.

Le retour en arrière est obtenu par l'action d'un autre piston se déplaçant dans un cylindre parallèle au premier, mais qui agit en sens inverse; l'admission dans l'un de ces cylindres ne pouvant se produire que lorsque l'autre est à l'échappement. Celui qui est utilisé pour le retour est d'un diamètre notablement inférieur, cela va de soi, puisqu'il n'y a pas travail effectué à proprement parler.

La seconde disposition consiste à envoyer l'eau sur l'autre face du piston, mais elle est rarement employée, bien qu'elle permette de simplifier la machine, à cause de la dépense trop grande de liquide qu'exige ce grand cylindre.

Le banc hydraulique se prête mal à l'étirage des produits de longueur importante, à cause de la course limitée du piston, mais, dans la pratique, cela ne présente pas un grand inconvénient, car

nous savons qu'il n'est utilisé que pour les barres de grand diamètre qui sont forcément courtes.

Nous avons dit qu'avant d'introduire la barre dans la filière, il fallait l'appointer.

Trois procédés principaux sont employés pour appointer la barre :

1^o *Appareils agissant par percussion.* — Lorsque ce travail est fait au marteau, l'opération est parfois assez longue et pénible; il est préférable de se servir de machines construites spécialement,

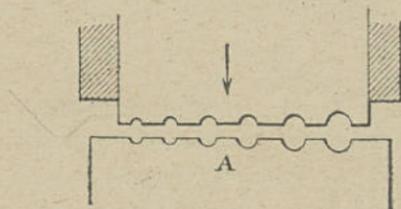


Fig. 29.

sorte de petits marteaux-pilons à vapeur ou à air comprimé, mais ces appareils nécessitent des générateurs. La maison Pinchart et Deny de Paris a établi des pilons actionnés par une transmission

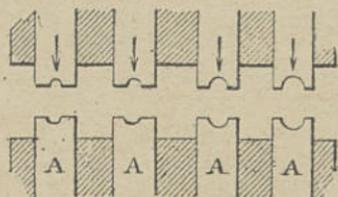


Fig. 30.

mécanique quelconque et qui ont les avantages de ceux utilisant l'air comprimé.

Ils se composent de deux cylindres verticaux placés bout à bout et dans lesquels se meuvent deux pistons, l'un actionné par

balancier, poulies et courroie, l'autre libre et portant, à l'extrémité de sa tige dirigée vers le bas, le marteau qui doit frapper la barre. Par suite des compressions et des raréfactions produites dans ces cylindres, on obtient, grâce à un réglage de l'échappement, commandé par un levier à main, un martelage tout à fait semblable à celui réalisé par les marteaux-pilons à vapeur; et ceci avec la même docilité.

A propos de la tréfilerie, nous décrirons un appareil à percussion basé sur la force centrifuge. Il peut être employé pour les barres de petit diamètre. Au lieu d'un seul marteau dont la partie frappante est plate, ce qui oblige à faire tourner la barre sur elle-même, on emploie quelquefois des machines comprenant une série de marteaux présentant des cannelures de diamètres de plus en plus réduits (*fig. 29*). Les parties A sont fixes, un réglage à vis les place dans la position convenable, indépendamment les unes des autres. Les marteaux, parfois réunis ensemble (*fig. 30*), sont mus par une transmission composée d'un arbre coudé actionné par une courroie.

2° *Appareils procédant par laminage.* — Ils sont souvent employés, car ils offrent l'avantage d'être silencieux et d'un fonctionnement simple. Ils exécutent assez rapidement l'opération et écrouissent plus régulièrement le métal. Cette dernière considération a de l'importance, car c'est à la pointe que la pince saisit la barre, et si cette partie présente quelques points de faible résistance, étant donné que la section réduite occasionne une augmentation de l'effort unitaire, il peut y avoir rupture; il en résulte un retard important, car il faut enlever la barre, refaire la pointe, en un mot recommencer l'opération.

L'inconvénient principal de ces appareils, c'est qu'ils ne conviennent qu'aux diamètres pour lesquels ils ont été construits.

Ils se composent tout simplement de deux cylindres de laminoir placés l'un au-dessus de l'autre et tournant assez lentement. Des cannelures, de forme circulaire, sont tracées sur leur surface; elles sont de diamètres différents. Enfin une commande permet d'arrêter

instantanément le mouvement de rotation. On engage la barre successivement dans toutes les cannelures, en commençant par la plus grande, jusqu'à ce qu'on ait obtenu l'amincissement de forme conique sur une longueur de 20 à 30^{cm}.

3° *Appareils procédant par découpage.* — Ce sont les plus pratiques. Ils consistent en un cône creux, tournant autour de son axe et garni de lames à l'intérieur. On introduit l'extrémité de la barre dans cette sorte de taille-crayon, les lames enlèvent des copeaux de métal et préparent ainsi la pointe.

Leur emploi est à peu près exclusivement réservé aux barres de section ronde.

Étirage par martelage. — Une méthode est appliquée aux États-Unis pour obtenir la réduction de diamètre ou l'effilage rapide des fils, des barres ou des tubes au moyen de machines appelés « swaging machines ». Les barres, par exemple, passent à travers une sorte de filière, y subissent un martelage dont la fréquence des coups peut atteindre 5000 par minute, la barre tournant d'ailleurs sur elle-même. Les avantages que l'on trouve à cette méthode sont les suivants :

- 1° Élimination de tous déchets de fabrication ;
- 2° Amélioration par forgeage de la qualité du métal ;
- 3° Perfection plus grande donnée au fini superficiel, si ténues que puissent être les pièces ;
- 4° Dureté à la surface obtenue sans trempe, ce qui est intéressant quand on a à travailler des métaux qui, ne prenant pas la trempe, ne peuvent être durcis superficiellement ;
- 5° Production extra-rapide ;
- 6° Possibilité de traiter un métal doré, nickelé, etc. sans que la couche qui le recouvre soit entamée, ni réduite.

Enfin on peut obtenir des variations dans la section pendant une même passe, ce que la filière ne peut donner puisqu'elle fait subir au produit, dans toute sa longueur, la même réduction.

Vitesses d'étirage. — Les vitesses d'étirage varient évidemment avec le diamètre de la barre si l'on suppose, ce qui est le cas le plus général : 1^o que la réduction de ce diamètre est la même quelle que soit la grosseur de la barre et 2^o que la force du banc reste constante. Elles varient également avec la nature du métal. Voici à titre d'exemple celles qui sont appliquées à un laiton ordinaire de décolletage de composition suivante :

| | |
|-------------|-------------|
| Cuivre..... | 58 pour 100 |
| Zinc..... | 40 » |
| Plomb..... | 2 » |

Pour les barres dont le diamètre est compris entre 10 et 15^{mm}, la vitesse de passage dans la filière est de 9 à 10^m à la minute.

Pour les barres dont le diamètre varie entre 80 et 100^{mm}, on réduit la vitesse à 2^m seulement.

Pour l'acier, la vitesse est plus faible que pour le laiton. Ainsi, pour l'acier dit de décolletage qui correspond à une charge de rupture variant de 45 à 55^{kg}, on donne généralement une vitesse d'étirage de 6^m à la minute pour les barres de 10 à 15^{mm} de diamètre et 1^m, 50 seulement pour celles de 80 à 100^{mm}.

Pratique de l'étirage. — Maintenant que nous avons décrit les appareils, nous allons étudier la pratique des opérations d'étirage en prenant comme exemple le laiton.

Voici une barre qui sort du laminoir. On sait qu'elle a été laminée soit à froid, soit à chaud.

A froid, si le métal renferme plus de 58 pour 100 de cuivre; à chaud, si la teneur est comprise entre 55 et 62 pour 100 (1).

Nous n'insisterons pas sur les avantages du laminage à chaud

(1) Dans certains cas (par exemple pour les balles du fusil Lebel) on emploie des laitons contenant plus de 90 pour 100 de cuivre et qui sont laminés à chaud, mais il faut alors utiliser des métaux très purs.

(rapidité, économie de main-d'œuvre, intervention d'un seul réchauffage au lieu de nombreux recuits, etc.).

Recuit. — Il faut, avant tout, détruire les effets de l'écrouissage causé par le laminage; pour cela, on recuit la barre. Ceci entraîne un décapage afin d'enlever la couche d'oxyde, sulfure, etc., qui a pris naissance dans le recuit, surtout lorsqu'il est pratiqué dans les fours à chauffage direct.

Le recuit doit être fait à la température de 600° environ, car, au-dessous, le laiton garde son état d'écrouissage; faisons remarquer qu'au-dessus de 800°, il est brûlé.

Les fours utilisés sont de deux sortes :

1° Les fours à flamme directe, dans lesquels les produits de la combustion entrent en contact avec le métal. Ils sont très répandus malgré les inconvénients qui résultent de l'action des gaz du foyer. Ils se composent généralement d'un long conduit qui reçoit les flammes par des carnaux disposés à droite et à gauche. Le foyer se trouve en dessous et le métal est introduit au moyen de wagonnets qui entrent avec leur charge d'un côté et sortent par l'autre après l'opération. Les déplacements se font par l'intermédiaire de treuils.

2° Les fours à cornue. Les barres sont placées dans des récipients ou cornues, en métal ou en terre, qui les abritent contre l'action des gaz du foyer.

Ces fours sont beaucoup moins employés que les précédents, car leur construction est d'un prix élevé, surtout si les cornues sont en terre. Lorsqu'elles sont en métal, en fonte de préférence, elles aissent filtrer les gaz de la combustion à travers leurs parois.

On ne fait usage de ces fours que pour les fabrications délicates.

Le chauffage au bois est à peu près complètement abandonné aujourd'hui; on emploie celui par gazogène, ou plus simplement la combustion directe du charbon.

Décapage. — Le décapage se fait à l'acide sulfurique étendu (5° Baumé). Il est suivi d'un lavage.

Les cuves sont généralement en bois garni de plomb; chacune d'elles est suivie d'une autre servant pour le lavage et dans laquelle coule simplement de l'eau. Lorsque le bain est épuisé, c'est-à-dire lorsque tout l'acide a été utilisé, on recueille le liquide qui contient des sulfates de cuivre et de zinc, on l'évapore et les cristaux peuvent être revendus aux usines à cuivre. Il faut cependant, afin de les purifier, opérer plusieurs dissolutions et cristallisations successives. On peut aussi se contenter d'une simple évaporation et vendre les boues qui en résultent.

L'étirage, qui se fait en une ou plusieurs passes, a non seulement pour but de donner la section convenable, mais aussi de supprimer les défauts superficiels causés par le laminage et d'obtenir pour la barre une surface brillante et de bel aspect. L'étirage du laiton est conduit de telle sorte qu'à chaque passe le diamètre est ordinairement réduit à 2^{mm}.

Étirage à chaud. — L'étirage à chaud procède par compression. Le métal, amené par une chauffe à une plasticité convenable, sera refoulé au moyen d'un piston au travers d'une matrice ou filière. Il est utilisé surtout pour la fabrication des tuyaux et il diffère de l'étirage à froid en ce que le passage à travers l'ouverture de la filière se fait en agissant sur le métal avant ce passage et non après; la traction se trouve remplacée par une compression.

Le procédé Dick, dont nous allons parler, a pris son principe dans celui employé depuis longtemps, pour les tuyaux de plomb, mais on opérait à froid. Ici, au contraire, la température du métal ou de l'alliage est comprise entre 400° et 500° suivant le cas.

Un cylindre creux est destiné à recevoir le métal chauffé au préalable. Il est formé de plusieurs cylindres concentriques dont les espaces annulaires sont remplis d'une substance isolante et présentant une grande résistance, ceci afin que le cylindre extérieur ne soit pas porté à une trop haute température, car on sait que l'acier perd une grande partie de ses qualités lorsque la tempé-

ratures s'élève. La capacité intérieure varie, suivant les types d'appareils, de façon à pouvoir contenir 50 à 200^{kg} du métal. Ce cylindre est monté sur pivots et il peut prendre une position horizontale ou verticale. On ferme le fond à l'aide d'une plaque, le cylindre étant placé verticalement; on remplit ensuite la capacité intérieure avec le métal en fusion. On laisse refroidir jusqu'à ce qu'on ait obtenu l'état plastique convenable. On place alors un couvercle dont le diamètre est juste celui du cylindre, les bords en sont biseautés, si bien que grâce à la dilatation, ce couvercle l'obture parfaitement. C'est sur ce disque que le piston agira. Ce dernier a un diamètre plus petit que le cylindre afin d'éviter le contact et par suite l'échauffement. On bascule le tout et on dispose, à la place du fond qu'on enlève, la matrice qui a été chauffée à l'avance pour éviter les déformations progressives dues à la dilatation. On fait alors agir la pompe, et le piston mû hydrauliquement chasse rapidement le métal à travers la matrice.

Celle-ci est en acier extra-dur, elle présente quelquefois plusieurs ouvertures, ce qui permet de fabriquer plusieurs barres en une seule opération; à la suite de l'appareil se trouve disposé un chemin de roulement sur lequel les produits reposent en sortant de la matrice.

Le gros inconvénient de ce procédé est la rapide détérioration des filières; mais le métal travaillé est amélioré par suite de la compression; voici quelques résultats qui semblent le prouver:

Amélioration par compression.

| Désignation. | Barres laminées. | | Barres système Dick. | |
|---------------------------|------------------|------|----------------------|------|
| | R. | A %. | R. | A %. |
| Laiton (métal Muntz)..... | 54,6 | 18,5 | 50,5 | 25 |
| Bronze d'aluminium.... | 55 | 16 | 65,3 | 25 |
| Métal Delta..... | 73,3 | 28,8 | 76,6 | 29,8 |

Malgré ces chiffres, on peut craindre que les alliages ayant subi ce traitement ne soient pas toujours très homogènes.

Les barres qui sortent de l'appareil ont une surface parfaitement lisse, ce qui dispense de tout travail de finissage. Le prix de fabrication des profilés semble pouvoir être réduit par ce procédé, car il remplace le laminage et les installations coûteuses qu'il comporte. Il permet d'obtenir des fils pesant 15^g par mètre courant aussi bien que des barres atteignant 60^{kg}.

Applications de l'étirage. Fabrication des tubes sans soudure. —

Les tubes en fer ou en acier sont divisés en quatre catégories suivant le mode de fabrication employé (1) :

1^o Les tubes non soudés, dont les bords sont simplement rapprochés. Ils sont destinés à servir de supports, poteaux, etc.

2^o Les tubes soudés par rapprochement. Ils conviennent aux canalisations d'eau, de gaz et de vapeur, aux travaux de serrurerie, à la confection des stores, etc. La soudure n'est pas nécessaire lorsque les tubes sont exposés à des efforts de flexion, mais elle le devient lorsqu'ils doivent résister à la torsion.

3^o Les tubes soudés par recouvrement. Ils sont utilisés pour les conduites de vapeur et d'eau dont le diamètre intérieur est supérieur à 50^{mm}. On les employait autrefois pour les chaudières. On leur préfère aujourd'hui les tubes sans soudure.

4^o Les tubes sans soudure. Ils tendent de plus en plus à remplacer les précédents, les travaux de serrurerie demandant souvent une grande légèreté et une assez forte résistance; par exemple, les constructeurs de cycles et d'automobiles n'utilisent que cette sorte de tubes. De même pour les canalisations de grande résistance; pour les chaudières marines, ils conviennent très bien.

Ces tubes sont faits en acier doux, le fer puddlé employé dans les autres catégories ne supporte pas bien l'étirage, et c'est là une des raisons qui a retardé un peu la généralisation de l'emploi des tubes

(1) Mémoire de M. JOUBERT, *Bulletin de la Société des Ingénieurs civils*, juillet 1909.

sans soudure, car beaucoup de compagnies de navigation, en Angleterre surtout, ne se sont décidées que difficilement à renoncer au fer puddlé pour la confection des tubes de chaudières. M. Joubert croit qu'en remplaçant l'acier extra-doux présentant 35 à 40^{kg} de résistance à la traction par un acier de plus forte résistance, 45^{kg} par exemple, et qui s'étire très bien, on éviterait les inconvénients dus à certaines attaques du métal qui entraînent une mise hors service beaucoup plus fréquente qu'avec le fer puddlé. Cependant la mise en place est plus facile qu'avec ce dernier qui, ne possédant que des allongements en travers très faibles, se prête mal au dudgeonnage.

La fabrication des tubes sans soudure se fait en partant d'un produit creux de courte longueur et d'assez grande épaisseur; ce produit est tiré, soit d'un lingot plein, soit, au contraire, d'un lingot creux.

Disons quelques mots des différentes méthodes appliquées pour obtenir ce corps creux.

1^o Point de départ : un lingot plein. On transforme le lingot en une tôle qu'on découpe suivant des disques qui sont emboutis. On pousse cet emboutissage le plus loin possible évidemment. Le procédé est coûteux, à cause des différentes transformations, mais il donne des produits de bonne qualité. Une autre méthode consiste à percer le lingot au pilon, en deux fois en le retournant. Les tubes pour bicyclettes et automobiles sont obtenus ainsi, la transformation de ces ébauches étant réalisée ensuite par un étirage à froid. Les produits sont d'excellente qualité, mais il se présente souvent des inconvénients au moment de l'étirage à cause des inégalités d'épaisseur du corps creux initial; d'ailleurs la méthode n'est pas économique.

Au lieu de percer la billette, on préfère souvent laminier le produit, le couper ensuite à des distances telles que les tronçons aient chacun le poids du tube qu'on veut obtenir. On procède enfin au perçage soit à froid au tour, soit à chaud à la presse hydraulique.

Le perçage au tour, qui se pratique également sur les lingots,

se fait par des machines opérant par les deux bouts à la fois; le trou obtenu est de petit diamètre afin d'éviter les déchets. Par des laminages à chaud successifs, on augmente le diamètre intérieur en même temps qu'on diminue le diamètre extérieur. Il faut cependant terminer par un étirage à froid.

Le perçage à chaud s'obtient par l'enfoncement dans le métal d'un mandrin cylindrique. La différence entre les procédés Robertson, Deville et Ehrhardt qui appliquent cette méthode, réside principalement dans la façon dont le métal est déplacé. Dans le procédé Ehrhardt, par exemple, la longueur reste la même, le diamètre seul augmente par suite de l'action du mandrin; cela est possible car la billette initiale a une section carrée, tandis que le cylindre dans lequel elle est comprimée est circulaire. Dans le procédé Robertson, le métal se déplace suivant la longueur, la section restant constante. Enfin le procédé Deville est en quelque sorte la réunion des deux précédents, c'est-à-dire que la matrice, par son enfoncement dans la billette qui est ronde, détermine un déplacement du métal augmentant et la longueur et le diamètre extérieur.

Le perçage Mannesmann, dont on a beaucoup parlé, consiste à soumettre à l'action d'un jeu de cylindres, une billette chauffée au blanc; les mouvements de rotation et d'avancement sont combinés de telle sorte que la billette se creuse et s'étire en tube. On facilite l'opération en disposant un mandrin central, mais il ne joue aucun rôle au point de vue du perçage, il sert avant tout à soutenir le métal et à régulariser le trou formé. Dans la réalité ce ne sont pas des cylindriques véritables qui agissent, mais des corps de forme hyperbolique ou même conique.

Le perçage Stieffel est basé à peu près sur le même principe. Les cylindres sont remplacés par des disques, mais le mandrin qui peut tourner sur son axe est, dans ce cas, véritablement un outil perceur sur lequel la matière vient elle-même s'étirer.

2^o Point de départ : un lingot creux. On est arrivé en Allemagne à fabriquer des tubes en partant d'un lingot creux. On coule le

métal dans une lingotière munie d'un noyau, puis on procède à un laminage ayant pour but d'aplatir le produit en augmentant sa longueur, sans déterminer cependant une adhérence des parois intérieures (dans ce but, on interpose une matière inerte pulvérisante). Enfin, après réchauffage, on soumet le plat ainsi obtenu à l'action d'un laminoir élargisseur, c'est-à-dire portant un mandrin dans l'axe des cannelures; le tube s'ouvre et sort fini de la machine. L'inconvénient principal de cette méthode réside surtout dans des ailerons qui se forment tout le long du tube extérieurement et suivant une génératrice. On ne peut les enlever, car le tube se séparerait en deux profils en demi-cercle. On a imaginé de couler dans des lingotières animées d'un mouvement de rotation rapide. On est arrivé à de bons résultats, mais la méthode par lingot plein est encore la plus employée.

Ayant obtenu, d'une façon quelconque, un corps creux, il suffit de l'étirer pour le transformer en tube.

Cet étirage se pratique comme pour les barres et profilés divers, au banc à chaîne, ou au banc hydraulique.

Le banc à chaîne est semblable à ceux dont nous avons parlé précédemment. Le trou de filière a pour diamètre celui du tube qu'on veut obtenir. Un mandrin solidement retenu du côté de l'arrière-banc donne le diamètre intérieur. La succession des opérations est la suivante. Tout d'abord, préparation de l'extrémité du tube pour qu'elle puisse pénétrer dans l'ouverture de la filière et être saisie par les tenailles, ensuite recuit pour détruire tout écrouissage; décapage, par conséquent, afin d'enlever les oxydes qui se sont formés; cuivrage (au moyen d'une immersion dans un bain de sulfate de cuivre) pour faciliter l'étirage; lavage, séchage, graissage et enfin étirage. Si une seule passe n'est pas suffisante pour obtenir la réduction d'épaisseur demandée, ou le poli de la surface, il faut recuire et recommencer toutes les opérations précédentes.

L'étirage à froid augmente la fragilité. Pour conserver à l'acier ses qualités, il faudra terminer la fabrication par un recuit.

La vitesse varie de 4 à 8^m à la minute. La réduction de section

en une passe dépend de la qualité du métal. Pour de l'acier à 40^{kg} au maximum, le rapport entre les sections initiale et finale peut être $\frac{13}{10}$. L'étirage, dans ce cas, se fait sur mandrin court.

M. Stieffel préconise, pour donner à chaque passe un plus grand allongement du produit et une réduction plus importante de section, l'emploi du mandrin long. Mais, après l'opération, ce dernier adhère très fortement au tube; il faut, pour l'en retirer, porter le tout sur une machine spéciale.

Le banc hydraulique présente les mêmes avantages que pour l'étirage des barres; il convient pour la fabrication des gros tubes. Il n'offre pas, dans sa construction, de différences sensibles.

Les opérations d'étirage coûtent cher et n'améliorent pas le métal. M. Joubert conseille d'employer des bancs assez forts pour obtenir, en une seule fois, une forte réduction de la section, d'autant plus que le métal est fatigué davantage par une réduction du diamètre que par une diminution de l'épaisseur du tube.

On ne peut éviter l'étirage à froid lorsqu'on veut obtenir des tubes minces ou parfaitement polis; mais il convient, dans ces cas, de pousser le travail à chaud le plus loin possible, car il n'altère pas le métal et souvent, au contraire, l'améliore sensiblement. Pour cela, on emploie, soit le travail à la presse hydraulique, soit le laminage à chaud sur mandrin.

Les tubes de cuivre et de laiton sont fabriqués suivant les mêmes procédés. Ceux de cuivre, par exemple, sont tirés de disques découpés dans des tôles. Plusieurs emboutissages successifs transforment ces disques en corps creux qu'on étire ensuite à froid. Après chacune des opérations d'emboutissage, on fait subir au métal une trempe à 500°. On se contente quelquefois d'un simple recuit suivi d'un refroidissement lent.

Ces traitements ont pour but de détruire l'érouissage qui rend le cuivre cassant. Ce que nous venons de dire pour le cuivre peut être répété pour le bronze contenant 2 pour 100 d'étain.

Produits filés à la presse. — Les métaux ductiles, comme le

plomb, peuvent passer à froid par pression à travers un trou de filière.

Ce procédé est en usage depuis fort longtemps, mais, pour les alliages de cuivre, l'application n'en a été faite que beaucoup plus tard, et à chaud.

La méthode générale consiste, pour le cas du laiton 60 et 40, à chauffer le produit à 800°, puis à le placer dans un cylindre dont une extrémité porte la filière. Un piston actionné par une presse hydraulique opère sur la face postérieure du lingot et oblige le métal à sortir par le trou de filière.

Cette opération détermine des défauts dans le métal.

On a remarqué qu'en filant à la presse une barre à travers une filière se trouvant dans l'axe du cylindre qui contient le lingot, les dernières parties de la barre ainsi obtenue contiennent un défaut caractéristique.

Des sections transversales montrent un cercle plus ou moins complet, d'un diamètre variable avec la position de la section pratiquée dans la barre, et consistant en oxyde et matières étrangères qui se trouvent enrobées dans du laiton partiellement dézincifié.

En général, la région intérieure au cercle a même structure que le métal qui entoure le cercle.

Si l'on vient à casser la barre qui présente ce défaut, on constate que la zone intérieure au cercle se brise généralement à un niveau différent de celui de la région extérieure. On désigne ce défaut souvent sous le nom de *paille*; on l'attribue à une retassure du laiton; mais, puisqu'on l'obtient régulièrement et qu'il a toujours la même forme, cela prouve qu'il ne s'agit pas d'une paille.

Des sections axiales attaquées à l'acide azotique à 50 pour 100 font voir que la matière étrangère et le métal dézincifié qui l'entoure, limitant le défaut, sont disposés dans la partie du lingot non encore filée, sous forme d'un entonnoir.

La grande base de cet entonnoir est le pourtour extérieur du

lingot et sa pointe fait suite au défaut tubulaire existant dans la partie déjà étirée. A l'intérieur de cet entonnoir, le métal est sain.

Quand ce défaut se produit-il? Le lingot réchauffé est placé dans le cylindre, relativement froid, de la presse; il s'applique contre les parois dès le début de la pression du piston. Sa surface est refroidie et perd de la plasticité par rapport aux régions intérieures du lingot. Par suite, ces dernières coulent plus aisément au travers de la filière et la peau offre davantage de frottement dans ce passage. Elle est repliée, puis entraînée à l'avant dans la filière par le courant de matières plus plastiques, et l'on conçoit que l'homogénéité soit imparfaite.

Ce défaut doit se rencontrer plus particulièrement marqué dans la partie arrière de la barre filée.

Mais si le diamètre de la barre est petit, la matière étrangère peut être distribuée sur une longueur telle qu'elle ne forme plus une couche continue, alors des cassures transversales se produisent. Pour éviter la formation de ce défaut, on pourrait chercher à éviter le refroidissement de la surface du lingot au début de l'opération.

Cette méthode n'est pas à recommander puisqu'elle exigerait un corps de presse plus chaud ou un lingot plus froid et que de toute façon le frottement de la surface subsisterait.

Un autre procédé consiste à emmagasiner la peau du lingot à l'arrière et à lui ménager une sortie. On peut y arriver en modifiant la face antérieure du piston; on lui donne une forme de dôme ou bien on y pratique une cavité annulaire permettant d'emmagasiner, pendant un certain temps, la peau du lingot. Mais on conçoit qu'on rencontre une difficulté au point de vue du filage lui-même, à cause de la forme spéciale du piston. On pourrait enfin employer un piston de diamètre plus petit que le cylindre. La peau s'échapperait autour du piston vers l'arrière et la barre obtenue à l'avant ne contiendrait pas le défaut. D'ailleurs l'expérience confirme la chose, ce qui démontre la réalité de l'hypothèse émise.

Industriellement le procédé n'est pas applicable, il correspond

à une perte de métal, perte d'autant plus grande qu'on voudra obtenir des barres plus saines. Il pourrait venir à l'idée de chercher à passer le métal à travers une filière excentrée, mais on obtiendrait ainsi un défaut de forme différente et en tout cas qui perdrait sa symétrie. La solution la meilleure consiste à éviter le mouvement relatif du corps de presse renfermant le lingot par rapport à ce dernier. Puisque la peau ne peut pas s'écouler le long de la surface du corps de presse et qu'elle se replie à l'intérieur par le mouvement vers l'avant du piston, il suffit d'exercer une pression sur la filière elle-même pour la faire pénétrer dans le laiton. L'écoulement se produira sans que la peau ait à se déplacer.

Le mouvement relatif ayant lieu seulement entre la filière et le corps de presse, on pourrait aussi filer les deux extrémités du lingot à la fois. Cette méthode a fait l'objet d'un brevet, mais elle avait pour but d'obtenir une barre ayant des caractéristiques plus uniformes, en filant en dernier lieu la partie moyenne du lingot qui échappe au refroidissement produit par la filière et le piston. M. Armstrong propose une solution plus simple qui consiste à fixer la filière à l'extrémité d'un piston creux ou encore à l'extrémité d'une pièce tubulaire et à faire avancer le corps de presse contenant le lingot.

On pourrait objecter que cette méthode ferait pénétrer la couche extérieure dans le lingot à hauteur du bord de la filière et que finalement elle passerait quand même dans la filière. Évidemment ce retournement se produirait, mais la matière externe s'accumulant dans une région d'où l'écoulement vers la filière est peu facile, ne passerait dans cette filière qu'en fin d'opération. Par suite on localiserait le défaut considéré.

Des expériences réalisées sur la cire ne sont pas comparables à celles faites sur un métal chaud; il y a des effets dus au frottement qui interviennent.

Pour ces recherches, M. Armstrong chauffe le corps de presse à 500°. Il le place sur un plateau fixé à une machine hydraulique et dans l'intérieur se trouve le lingot qui a été porté à 800°.

La filière, la plaque de centrage et le piston sont mis en place.

On donne la pression (33 à 66^{kg} par centimètre carré) (fig. 31). Après avoir examiné la structure du produit étiré, M. Armstrong a constaté que dans la région qui est juste en face de la filière le

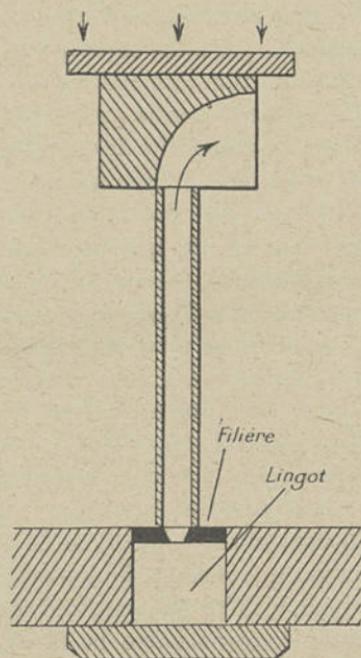


Fig. 31

métal ne passe qu'en fin d'opération, de sorte que les barres ainsi obtenues par filage complet sont saines de bout en bout.

Parfois cependant, mais exceptionnellement, dans la dernière partie de la barre un peu de matière étrangère se retrouvait à la surface.

Cette méthode est très généralement appliquée pour produire des tubes en métaux ductiles, en plomb, en aluminium, bien que les plans des machines aient été établis non pas pour éviter les

défauts signalés, mais pour obtenir un rendement de fabrication élevé. On ne connaît pas d'application industrielle de cette méthode du filage à chaud des alliages de cuivre; elle devrait donner cependant des résultats intéressants, car la puissance nécessaire est moindre que dans la méthode actuellement employée.

On pourrait se contenter par suite de corps de presse plus légers sans craindre leur déformation, les machines coûteraient moins cher à établir, et il résulterait enfin une économie considérable du métal puisqu'il deviendrait inutile de chuter les barres obtenues comme actuellement on est obligé de le faire.

Les tubes de plomb ne sont donc pas obtenus par l'étirage proprement dit, mais par une compression qui oblige le métal à passer dans une filière; de même pour l'étain. La résistance à la traction de ces métaux est trop faible pour permettre leur étirage directement. Voici comment se pratique l'opération: Une presse hydraulique verticale agit sur un piston qui pénètre dans un cylindre contenant du plomb qu'on a coulé par la partie supérieure. Lorsque le métal est solidifié, on envoie la pression, le piston chasse le plomb devant lui et, si l'on a pris soin de disposer une filière à l'extrémité de ce cylindre, il sortira de l'appareil une barre ou un fil. Lorsqu'on veut obtenir un tuyau, le piston porte sur le prolongement de son axe une sorte d'aiguille ayant même diamètre que l'intérieur du tuyau, le métal ne peut s'échapper qu'en sortant par l'espace annulaire compris entre la filière et l'aiguille. Le retour en arrière, l'opération terminée, se fait par le propre poids du piston qui est vertical, nous l'avons dit. Pour les tubes, la vitesse de passage est moindre que pour les fils, par suite, il faut empêcher le métal de se refroidir; pour cela, le « conteneur », c'est-à-dire le cylindre qui renferme le plomb, est entouré d'un récipient, dans lequel on entretient la combustion de charbon de bois. Si l'on veut étamer en même temps, on coule de l'étain dans l'intérieur du tube qui sort ou encore dans un petit bassin qui entoure la filière, si c'est la surface extérieure qu'on veut recouvrir. Lorsqu'on désire une épaisseur plus grande, on verse du plomb en fusion dans le conteneur en ménageant, par un mandrin, un espace dans

lequel, après solidification, on versera de l'étain; on chasse ensuite les deux métaux ensemble à travers la filière.

Ce procédé repris par M. Frank, appliqué au cuivre, au zinc, à l'aluminium et à la plupart des alliages de ces métaux, a permis aux usines de la Société française de métallurgie du Kremlin-Bicêtre, près de Paris, de fabriquer presque à froid par compression et passage dans une filière des tubes et des profilés. Les presses étaient horizontales et deux cylindres latéraux servaient au retour en arrière. D'après les études intéressantes faites par M. Breuil sur les produits de ces usines, il résulte que cette espèce de tréfilage donnant d'un coup un produit final, sans recuits intermédiaires, détermine une dureté superficielle et une organisation interne telles qu'ils semblent être des corps nouveaux.

Ce procédé présente donc l'avantage de fournir des produits de meilleure qualité que ceux obtenus par les autres méthodes décrites et il permet en outre de réaliser une économie importante sur les frais de fabrication.

Un brevet a été pris en 1912 par la Société des tubes de Valenciennes pour leur fabrication par étirage.

L'appareil comprend un laminoir comportant des cylindres placés à la suite les uns des autres, les axes de ces cylindres étant alternativement horizontaux et verticaux et disposés de telle sorte que les centres de figure des cannelures décroissantes d'une paire quelconque de cylindres à la suivante se trouvent en ligne droite.

Les réductions de diamètre d'une paire de cylindres à la suivante sont établies de façon que le tube engagé dans l'ensemble des cannelures du laminoir traverse chacune d'elles à la même vitesse circonférentielle que possède elle-même cette cannelure. La réduction totale de diamètre ainsi obtenue est fonction du nombre de paires de cylindres que comporte l'appareil.

Un mandrin fixe, de section et de forme variables pour chaque cannelure, passe par leur centre en les traversant toutes et sert seulement de guide aux tubes lorsqu'ils avancent d'une cannelure à l'autre.

Ce mandrin est à section variable, comme il vient d'être dit, et d'une cannelure à la suivante les dimensions des sections sont telles qu'il ne peut exister de laminage par le contact des parois intérieures du tube avec le mandrin.

Avec ce dispositif on peut, pour obtenir des tubes de petit diamètre en partant de gros tubes, ou bien augmenter le nombre de paires de cylindres du même laminoir continu, ou bien disposer côte à côte deux ou plusieurs groupes de laminoirs continus comportant des cylindres à cannelures, celles-ci étant de section de plus en plus réduite.

Dans ce dernier cas les tubes sont repris d'un groupe de laminoirs et passés au suivant.

La dernière paire de cylindres, qui détermine la section finale du tube désiré, comporte une cannelure qui devra se rapprocher le plus possible de la forme recherchée, circulaire par exemple, lorsqu'il s'agira d'obtenir des tubes de section ronde.

Défauts dans les barres de laiton filées à la presse au moyen de filières multiples. — Dans la pratique ordinaire, pour le filage à la presse des barres de laiton ayant un diamètre inférieur à 25^{mm}, on emploie des matrices à plusieurs trous pour que la presse puisse fonctionner à une certaine vitesse.

Des barres de laiton ayant une composition de 60/40 avec 18^{mm} de diamètre et filées à travers une matrice à 3 filières équidistantes du centre donnèrent régulièrement à l'usinage des fissures. Les sections examinées présentaient des défauts en forme d'U dont les branches aboutissaient à la circonférence extérieure. L'examen microscopique établit que des oxydes et des matières étrangères entourées du constituant β (c'est-à-dire plus pauvre en zinc que la masse principale) composaient ces irrégularités tout à fait semblables à celles qu'on rencontre dans les barres de grands diamètres obtenues avec une filière placée au centre et qui sont constituées par la peau de la billette coulée initialement. M. Genders dans le numéro de mars 1923 d'« Institute of metals » signale que la formation de ces défauts provient de la répartition

dans les trois filières de la peau du lingot venant se déchirer sur les bords de la zone du métal « mort ». Et, quand le défaut est distribué irrégulièrement, cela est dû à une variation de la température du métal ou encore à une excentricité du piston qui le refoule. Si la matrice était placée à l'extrémité d'un piston creux, méthode préconisée par Genders, le défaut signalé ne se produirait plus.

Fabrication des tubes de laiton sans soudures. — Depuis une trentaine d'années la fabrication des tubes de laiton et de cuivre sans soudures constitue une des spécialités de la Société américaine Bridgeport, Brass and C^o.

Voici la méthode appliquée : le laiton est employé sous forme de billettes provenant de fours électriques.

Lorsqu'elles ont reçu un usinage superficiel, on les introduit à nouveau dans un four qui porte le produit à la température voulue pour qu'on puisse percer un trou dans son axe.

Le centrage avant perçage est obtenu par un guidage très précis de la pièce entre trois rouleaux légèrement coniques dont deux sont commandés mécaniquement, le troisième tournant librement sur son axe.

Le poinçon de perçage a une forme d'ogive; le porte-outil à l'extrémité duquel ce poinçon est monté a une longueur un peu supérieure à celle du tube que doit travailler la machine. Celle-ci est mue électriquement par des dispositifs compliqués, qui assurent tous les mouvements nécessaires à l'obtention du tube.

L'opérateur, ayant à sa portée toutes les commandes, est placé de façon à pouvoir surveiller à la sortie de la machine les tubes fabriqués.

Il faut procéder ensuite à l'étirage.

Pour cela, les tubes sont présentés dans une machine nouvelle qu'on appelle *épointeuse*. Elle travaille comme un marteau et donne à l'extrémité de chaque tube qui doit s'engager dans le laminoir un diamètre inférieur au diamètre courant.

A la sortie du laminoir les tubes passent dans des fours continus

où ils reprennent alors les propriétés physiques et mécaniques désirées.

On les plonge ensuite dans un bain pour les débarrasser de la graisse et des poussières; ils sont enfin rectifiés et dressés par passage dans deux séries de rouleaux, ceux de la première série ayant leurs axes verticaux, ceux de la seconde série étant horizontaux. On découpe une faible longueur de chacun de ces tubes à la scie afin de pouvoir examiner au laboratoire la bonne qualité du produit obtenu, car cette méthode demande un contrôle très serré, et il n'a pas fallu moins de 10 années pour la mettre au point.

Étirage à chaud sur mandrin. — La *Revue de métallurgie* a publié en mars 1922 une étude très approfondie faite par M. Schneider de l'étirage à chaud sur mandrin; nous allons la résumer :

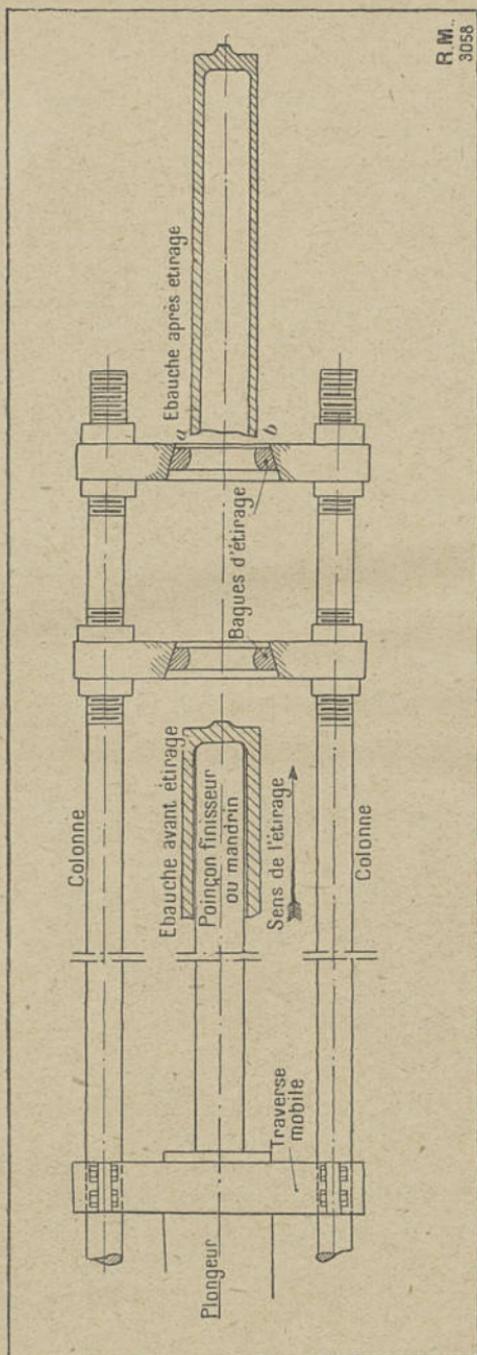
Jusqu'ici l'opération d'étirage à chaud sur mandrin s'était effectuée d'une manière empirique. Quoique la méthode soit relativement simple les conditions exactes de son application sont mal définies.

Il s'agit d'allonger une ébauche creuse obtenue par moulage ou par perçage, en lui conservant, à l'aide du mandrin, les dimensions et le contour intérieurs désirés.

On emploie pour cela des presses hydrauliques à étirer, des presses mécaniques, des étireuses électriques, des bancs à étirer. L'appareil le plus en usage est certainement la presse hydraulique.

Le mandrin, appelé aussi *poinçon*, est fixé à la traverse de la presse (*fig. 32*). L'ébauche à étirer est introduite sur ce poinçon qui, dans son mouvement en avant, pousse l'ébauche, l'oblige à passer dans une ou plusieurs filières ou bagues placées successivement et dont les diamètres intérieurs sont tels qu'ils réduisent le diamètre extérieur de l'ébauche. Poinçon, ébauche et bagues sont tous disposés sur le même axe.

L'épaisseur de la pièce diminue, sa longueur augmente et, dans



R.M.
3058

Fig. 32.

une seule opération, les dimensions cherchées sont obtenues. Il faut remarquer que le diamètre intérieur de l'ébauche n'est pas modifié, non plus que l'épaisseur du fond de l'ébauche sur lequel s'applique le poinçon.

On conçoit que le métal, par la contraction due au commencement du refroidissement et par la compression qu'il subit en passant par les diverses bagues, épouse parfaitement la forme du poinçon. Pour dégager la pièce du mandrin en fin de course, on fait revenir en arrière le piston de la presse, après avoir placé l'extracteur, sorte de coiffe recouvrant le mandrin et faisant cale entre l'ébauche et la plaque portant la dernière bague. L'ébauche se trouve ainsi arrêtée pendant le recul du poinçon, lequel reprend sa position initiale.

Il est donné à l'ébauche un diamètre intérieur légèrement supérieur à celui du poinçon afin de permettre facilement l'introduction de l'un dans l'autre.

Pour la fabrication des obus, la forme intérieure de l'ébauche est conique vers le fond, le poinçon a naturellement une forme semblable.

Le profil extérieur de l'ébauche varie suivant qu'elle a été percée ou étirée. Dans le premier cas, ce profil est conique, il faut qu'il en soit ainsi puisqu'il n'y a pas de fond; dans l'autre cas, il est cylindrique.

Les mandrins sont tous coniques plus ou moins suivant le produit à obtenir. Si l'épaisseur de la pièce doit être très régulière, la conicité est faible; pour les obus le poinçon est constitué par plusieurs cônes successifs.

Les bagues sont de deux types :

1^o A l'entrée le profil est arrondi suivant un rayon assez grand, l'arc se raccorde tangentiellement à une partie cylindrique, relativement courte, qui donnera le diamètre après la passe; à la sortie un petit congé supprime l'angle vif (*fig. 33*).

2^o A l'entrée le profil se présente de la même manière, mais l'arc se raccorde à une partie conique (*fig. 34*), puis à une partie cylindrique; le contact de l'embouti sera donc *Ab*.

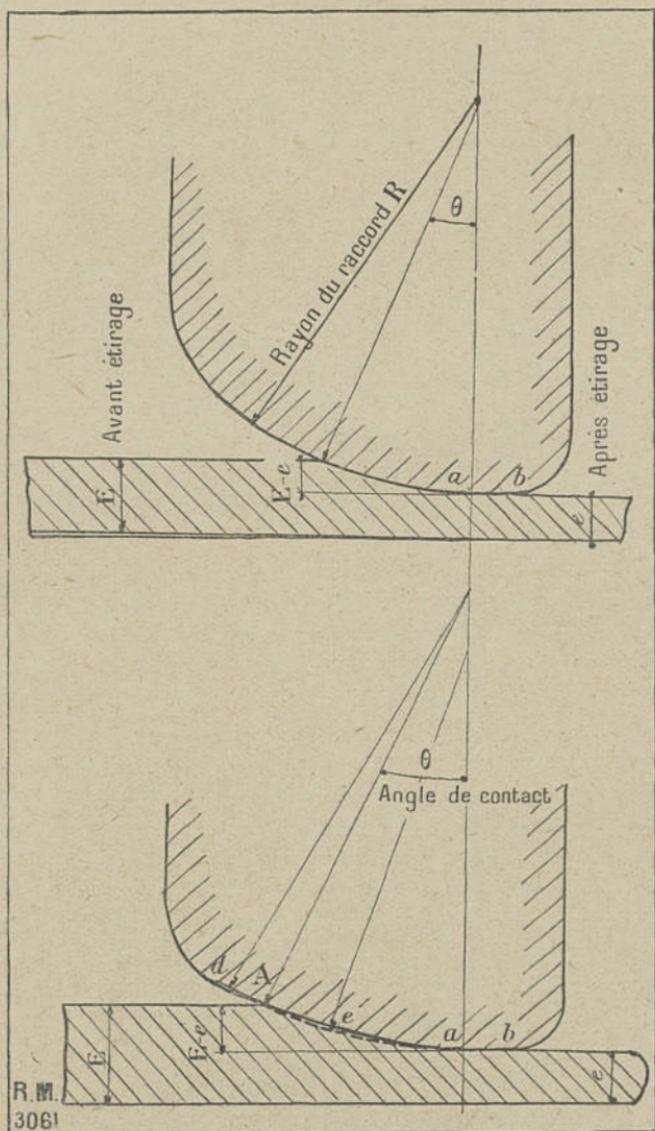


Fig. 33 et 34.

Ce rayon R de l'arc d'entrée est pris généralement assez grand (100mm).

Nous ne reproduirons pas les calculs détaillés de M. Schneider, nous nous contenterons de noter les conclusions auxquelles il arrive.

Plus le rayon R est petit et plus la puissance nécessaire à l'étrépage, pour une même réduction de la passe, est faible; autrement dit, un grand arc de contact amène des réactions normales, qui ont pour résultat de coincer le métal. Mais si ce rayon est trop petit, il se produit un effet de cisailage qui pourra déterminer l'arrachement du métal. Le chiffre approprié à ce rayon est de 7 fois et demie la diminution d'épaisseur de la paroi de l'ébauche.

Dans la pratique cette condition n'est pas toujours strictement appliquée : elle conduirait à un stock de bagues trop important.

Le coefficient de frottement est fonction de l'état des surfaces de la bague et de l'ébauche, ainsi que de la température de l'étrépage.

A froid, avec des bagues polies travaillant un métal sans rugosité, on admet pour le coefficient de frottement

$$f = 0,15.$$

Dans le laminage ce coefficient est de 0,35 à 0,40. La température du laminage étant généralement supérieure à celle de l'étrépage, M. Schneider fixe le coefficient à 0,35 pour tous les étrépages à chaud.

Il faut remarquer que ce coefficient varie avec le degré d'usure de la bague. Si par exemple on commence le travail avec une bague très usagée présentant de fortes érosions et si on la remplace par une bague neuve, une légère dépression s'observe dans le pot de presse; en d'autres termes, la puissance absorbée est moins grande quand f diminue.

Suivant les types d'emboutis, on opère à des températures différentes entre 800 et 1050° pour l'acier demi-dur. Plus la température est élevée, moindre est la puissance nécessaire. Il y a lieu de

considérer que parfois des réchauffages sont indispensables; l'épaisseur de la paroi intervient : si elle est faible, le métal se refroidit rapidement pendant les manœuvres et, pendant l'opération, il faut alors pratiquer plusieurs chaudes.

Une autre remarque à noter : c'est que l'allongement maximum que l'on peut donner à une ébauche déterminée est d'autant plus grand que cette ébauche est plus mince, mais dans la pratique il est préférable de se tenir un peu au-dessous de la limite extrême.

Les bagues sont avantageusement faites en métal dur comme la fonte moulée en coquille. On les rectifie à la meule et on les polit dans la partie travaillante. Les ébauches doivent être bien décapées intérieurement et extérieurement avant l'étirage. Les bagues doivent être préalablement lubrifiées à la graisse. Les poinçons demandent à être de fabrication très soignée. On choisit un métal de bonne qualité, de l'acier à 70^{kg}.

Après chaque étirage il faut arroser le poinçon pour éviter sa déformation. Un mélange de suif et de plombagine sert à le graisser avant toute opération afin que l'ébauche n'adhère pas et qu'on puisse la décoller aisément.

M. Schneider recommande dans le cas où le culot de l'ébauche est épais, d'employer une bague d'un diamètre supérieur ou égal au diamètre extérieur du culot, car il arrive que, s'il y a excentrement, le culot se tord à l'étirage.

On peut employer plusieurs bagues successives agissant dans une même opération, on obtient de la sorte des allongements totaux très grands. Cette méthode a son application quand on veut fabriquer des emboutis ayant de très faibles parois; le travail est réparti entre les différentes bagues de manière qu'il aille en décroissant jusqu'à la dernière, laquelle n'a plus qu'un faible effort à supporter pour le finissage.

Fabrication des tubes d'acier au moyen de lingots creux. — Pour fabriquer des tubes d'acier on emploie dans certaines aciéries un procédé particulier qui consiste à disposer dans la lingotière un tube d'acier doux bien décapé au jet de sable et autour duquel

on coule le métal. Le tube a été préalablement rempli d'une matière inerte, généralement du sable, destinée à empêcher l'introduction d'air dans le tube; de cette façon, on prévient l'oxydation de la paroi intérieure.

Les tubes obtenus sont ensuite laminés et amenés au diamètre désiré. Ils sont enfin coupés de longueur et le sable qui se trouve à l'intérieur est évacué.

D'après M. Armstrong, ce procédé donnerait des résultats meilleurs que ceux obtenus par les autres méthodes de fabrication.

En particulier, les résistances au choc seraient améliorées :

- 1° Par l'exemption de tensions internes et externes;
- 2° Par la faible dimension des cristaux constituant la structure du métal;
- 3° Par la réduction des ségrégations à cause de la faible épaisseur des parois;
- 4° Parce que le métal est moins disposé à donner des criques;
- 5° Par l'augmentation de l'élasticité due à la présence de la paroi interne en acier doux.

Relation entre le traitement thermique et l'étirage à froid des barres et des fils d'acier. — Nous résumerons les expériences de M. Adam.

Ce savant a eu spécialement en vue le traitement désigné sous le nom de « patenting process », traitement thermique appliqué avant le travail à froid. Il a en particulier cherché à déterminer :

- a. Si la haute température employée se justifie et, dans ce cas, pourquoi;
- b. Si la présence de la sorbite doit être recherchée plutôt que celle de la perlite;
- c. Si enfin il ne serait pas préférable d'employer pour les fils des températures de recuit de 600° à 650° au lieu de températures élevées, étant donné que ces basses températures suffisent, d'après plusieurs auteurs, à détruire les tensions du travail à froid.

Et d'abord la sorbite à grain fin peut-elle convenir pour la structure des aciers qu'on doit étirer à froid? Ayant réalisé cette structure au moyen d'une trempe douce, à l'huile, suivie d'un revenu avant étirage, les résultats obtenus ont été mauvais. On ne peut pas étirer dans des conditions satisfaisantes des barres dont l'acier aurait subi un tel traitement.

1° TRAITEMENT THERMIQUE AVANT L'ÉTIRAGE. — M. Adam a employé pour ses expériences deux séries d'acier :

La série A, dont la composition était :

| | Pour 100. |
|---------|-----------|
| C..... | 0,44 |
| Si..... | 0,06 |
| Mn..... | 0,82 |
| S..... | 0,036 |
| Ph..... | 0,031 |

(acier hypo-eutectoïde).

La série B, dont la composition était :

| | Pour 100. |
|---------|-----------|
| C..... | 0,85 |
| Si..... | 0,12 |
| Mn..... | 0,30 |
| S..... | 0,022 |
| Ph..... | 0,020 |

(acier eutectoïde).

Les traitements thermiques furent appliqués suivant les nécessités ou à l'atelier ou au laboratoire, mais des comparaisons entre les deux méthodes ont établi que les résultats étaient identiques.

Pour la série A, ces traitements comportaient une trempe à l'air, une trempe au plomb à 500°, une trempe à l'huile suivie d'un revenu à 600°. Les températures de trempe étaient de 850°, 950° et 1050°.

Disons en passant qu'en étudiant la courbe des refroidissements,

après trempe au plomb, on constate que la vitesse de refroidissement est indépendante du milieu; par exemple, si après une trempe au plomb à plus de 350° on plonge l'acier considéré dans l'eau ou si on le laisse à l'air, la vitesse de refroidissement est la même dans les deux cas.

Ensuite les barres étaient étirées aux dimensions désirées. Il fut alors pratiqué, sur des échantillons prélevés sur ces barres, des essais de torsion et de traction.

Les résultats ont été les suivants :

La variation de température de trempe de 850° à 1000° n'apporte pas de changement important; mais, après travail à froid, on a un produit meilleur quand ce travail a été exécuté à la suite d'une trempe à haute température (avec refroidissement à l'air ou dans l'huile) ou d'une trempe à basse température (avec refroidissement au bain de plomb). Mais entre ces limites des températures de trempe, les résultats diffèrent assez peu.

On a comparé également, toutes choses égales d'ailleurs, l'effet de trempe à 1000° dans du plomb maintenu à 550° et dans l'air. La première méthode donne une légère augmentation des caractéristiques de la résistance par rapport à la deuxième méthode.

Il semble enfin que les meilleurs résultats pour le travail à froid soient obtenus avec un métal ayant une grosse cristallisation.

Les échantillons trempés à l'huile et revenus s'étirent mal; les échantillons trempés à l'air calme s'étirent d'autant mieux que la température de trempe est plus élevée.

Voyons maintenant ce qui se passe pour les aciers de la série B, aciers eutectoides. Généralement on soumet de tels aciers à un traitement thermique avant la première passe et entre les différentes passes d'étirage.

Avant les essais, le fil a été porté à 1050° et refroidi à l'air. Des essais préliminaires sur les températures de la trempe, du revenu et du bain de plomb ont montré que la température minimum du plomb devait être de 450°. Le refroidissement à l'eau, après

séjour dans le bain de plomb, n'a pas d'effet sensible. Le fil trempé dans du plomb à 600° n'a pas une charge de rupture différente de celle du fil trempé dans le plomb à 500°. La trempe à l'huile suivie d'un revenu donne de mauvais résultats. Les fils trempés à l'air ont une charge de rupture un peu plus basse que ceux qui l'ont été au plomb.

D'autre part, il a été constaté que des aciers contenant 0,70 à 0,80 pour 100 de carbone, 0,10 à 0,12 pour 100 de silicium, du manganèse dans la proportion de 0,25 à 0,79 pour 100 avec moins de 0,04 de soufre et 0,03 de phosphore, ont permis de tirer les mêmes conclusions que celles auxquelles on était arrivé avec les aciers de la série B.

Ces conclusions sont les suivantes :

1° Comme pour les aciers de la série A, les températures admissibles sont très variables; l'objet du traitement paraît être d'augmenter les dimensions des grains de telle sorte qu'un acier ayant été surchauffé doit être le meilleur pour l'étirage à froid;

2° Avec un acier eutectoïde il n'y a pas intérêt à chauffer au-dessus de 950°;

3° Les meilleurs résultats sont obtenus après une trempe au plomb. Cette conclusion est plus caractéristique pour les aciers eutectoïdes que pour les aciers demi-durs;

4° Le grain fin spécial à la trempe à l'huile suivie d'un revenu ne permet pas l'étirage à froid;

5° Pratiqué au-dessous du point critique, le chauffage ne détruit pas l'érouissage d'un travail antérieur; ce fait est bien connu.

Essais sur des barres de gros diamètres. — Ils ont porté sur des barres de 30^{mm} de diamètre et tirées d'un acier Martin contenant :

Pour 100.

| | |
|---------|-------|
| C..... | 0,49 |
| Si..... | 0,13 |
| Mn..... | 0,65 |
| S..... | 0,037 |

M. Adam se proposait d'étudier comment dans un tel acier s'écoulaient la perlite et la sorbite pendant l'étirage à froid.

Un échantillon recuit à 900°, étiré ensuite, s'est rompu quand le diamètre a été réduit à 20^{mm}.

Un autre échantillon, trempé au plomb à la même température, a été amené à 19^{mm} de diamètre sans rupture.

Ce dernier échantillon a été divisé en deux parties : l'une a pu être étirée sans rupture jusqu'à un diamètre de 14^{mm}, 4; l'autre a été trempée à nouveau au plomb à 850°; elle a pu être alors amenée jusqu'à 12^{mm}, 1.

La conclusion est celle-ci : à l'état recuit, le métal se rompt après une réduction de la surface de 55 pour 100 et à l'état sorbitique après une réduction de la section de 76 pour 100 (échantillon n° 1) et de 79 pour 100 (échantillon n° 2).

2° TRAITEMENT THERMIQUE APRÈS TRAVAIL A FROID. — Ce traitement est d'une pratique courante dans l'industrie, en particulier pour l'étamage et la galvanisation des produits étirés, opérations qui se réalisent généralement à chaud. Il s'emploie également quand on veut modifier les qualités du produit étiré en vue d'un usage déterminé.

De nombreux essais entrepris sur des fils d'acier de qualités différentes, galvanisés dans les conditions des fabrications industrielles, ont donné des résultats que nous allons résumer. Par exemple, un acier ayant la composition suivante :

| | Pour 100. |
|---------|-----------|
| C..... | 0,73 |
| Si..... | 0,15 |
| Mn..... | 0,67 |
| S..... | 0,041 |
| Ph..... | 0,036 |

a été tréfilé; les fils ont été ensuite galvanisés à la manière ordinaire à 480°.

Certains échantillons furent maintenus pendant une minute au bain de plomb, à des températures variant de 50° depuis 300°

jusqu'à 600°. D'autres, à ces mêmes températures, ont été laissés dans le bain pendant des temps différents.

Les conclusions sont que :

1° Après galvanisation les allongements augmentent, le nombre des torsions et des flexions alternées diminue ;

2° La charge de rupture diminue d'autant plus qu'elle était primitivement plus élevée ; le temps de séjour dans le bain a une grande importance ; la charge de rupture diminue lorsque le temps augmente, mais le chiffre des torsions ne semble pas être modifié ;

3° La température du bain doit être aussi basse que possible et le fil y sera maintenu le temps minimum, juste ce qu'il faut pour qu'il se recouvre d'une couche de zinc suffisante.

Influence du temps de séjour à température élevée après un travail à froid. — L'hypothèse du ciment amorphe fait conclure à une influence importante du temps de séjour à température élevée sur la qualité du produit traité.

M. Adam prend deux aciers : l'un, A, contenant C = 0,45 pour 100 dont il tire des fils de 3^{mm} constituant la série n° 1, et des fils de 4^{mm},5 constituant la série n° 2 ; l'autre, B, à 0,700 de carbone, duquel il forme deux séries semblables.

Les résultats auxquels il arrive sont que :

1° Le temps a une grande importance pour des séjours de moins de 15 minutes : cette importance diminue pour des temps plus longs ;

2° Il y a une zone des températures au-dessous de laquelle le chauffage pendant une heure apporte peu de changements aux propriétés ; cette zone s'étend entre 500° et 550° pour les aciers demi-durs, et entre 500° et 600° pour les aciers durs.

Des expériences ont été faites à plus basses températures, elles ont montré qu'un chauffage à 400° pouvait amener une augmentation de la charge de rupture.

Ainsi un fil recuit à 350° est devenu si fragile qu'il se rompt au premier pliage.

La vitesse de pliage, qui semble avoir une influence sur les résultats que donnent des fils non traités, n'en a plus sur les fils recuits à 350°. Finalement M. Adam conclut que :

1° Le traitement thermique et le vieillissement après travail à froid ont une grosse influence sur la limite élastique. Le vieillissement a plus d'action sur le fil traité que sur le fil non traité;

2° Après vieillissement de 6 mois la limite élastique d'un fil n'est que de 40 pour 100 environ de la charge de rupture, alors qu'elle s'élève à 80 pour 100 après un chauffage à 350° et un vieillissement de 6 mois également;

3° L'essai de pliage permet d'affirmer que le vieillissement augmente la fragilité du métal.

Relation du traitement thermique et du travail à froid avec la microstructure. — L'examen microscopique d'un fil présente une certaine difficulté à cause de la diminution que subissent les grains; cette diminution est la conséquence de la réduction de section et de l'état sorbitique de la structure.

A faible grossissement, il y a peu de différence entre les fils trempés à l'air ou au plomb; à noter cependant pour les aciers demi-durs une légère modification dans la proportion de ferrite libre.

Considérons au microscope un fil étiré à la filière et un fil tractionné. Les deux opérations sont évidemment très différentes; aussi, dans le premier cas, les grains sont-ils allongés en fibres non rompues; dans le deuxième cas, des ruptures se remarquent dans ces grains déformés, avant même que l'éprouvette ait subi un allongement important.

Dans le cas d'un acier demi-dur recuit contenant de la perlite et de la ferrite, comme celle-ci a une charge de rupture inférieure à celle-là, il se produit un écoulement non uniforme qui peut déterminer des ruptures. Si cet acier est à l'état de sorbite contenant peu de ferrite, l'écoulement est évidemment plus uniforme.

La différence d'écoulement entre perlite et ferrite est manifeste dans le cas d'un acier eutectoïde. La structure de la sorbite est granulaire ou cellulaire, quelquefois lamellaire; d'autre part, il semble qu'il y ait dans la sorbite des particules de carbure visibles seulement aux grossissements très élevés 2500 à 5000 diamètres.

La perlite tend à s'étirer dans le sens des lamelles. Si les lamelles sont mal orientées par rapport à la direction du mouvement, des irrégularités dans l'écoulement se produisent.

Dans la sorbite, la finesse de la texture rend l'écoulement plus homogène. D'autre part, les particules de carbure peuvent ralentir l'écoulement des zones de ferrite qui les entourent.

On conçoit que, dans ces conditions, l'écoulement soit plus uniforme.

CONCLUSIONS.

1° L'aptitude du travail à froid ne dépend pas seulement de la nature du métal, mais de son état.

2° Dans un métal bien étiré, les grains ne sont pas rompus, mais allongés en fibres. L'écoulement se produit dans le grain lui-même. Il y a en outre un mouvement relatif des grains qui dépend du mouvement interne dans chaque grain. S'il y a irrégularité et non homogénéité, il y a rupture.

3° Lorsque le grain est allongé, il ne peut plus y avoir étirage sans rupture.

4° Si l'on réduit la section d'une façon trop importante en une seule passe, il y a rupture des grains (comme dans un essai de traction sur éprouvette).

5° Si les grains sont très fins, ils ont une faible capacité à l'allongement. Une structure fine ne donne donc pas de bons résultats à l'étirage.

6° La structure optima est une structure à gros grains.

7° La perlite s'écoulant moins uniformément que la sorbite, celle-ci est préférable très nettement; la perlite d'un acier eutectoïde ne peut pas s'étirer.

8° Il semble que la température de 1000° employée dans le traitement du fil d'acier soit la température la meilleure.

Au point de vue du traitement après étirage :

1° Tout recuit au-dessous de 500° à 600° a, dans l'ensemble, un effet nuisible sur les propriétés. L'essai de torsion et de flexion montre que l'acier est à l'état fragile après ce traitement.

2° Le temps joue un rôle très important dans ce traitement. La galvanisation et l'étamage doivent donc être effectués aussi rapidement que possible.

Enfin la basse limite élastique d'un acier écroui semble indiquer l'existence dans le métal d'un ciment amorphe, instable, passant, par vieillissement ou mieux encore par élévation de température, d'un état visqueux à un état vitreux plus dur. Ce phénomène est caractérisé par l'augmentation de la fragilité et de la limite élastique.

A une température plus élevée le métal prendrait à nouveau l'état cristallin (*Revue de Métallurgie*, 1921).

CHAPITRE IV.

TRÉFILAGE.

Généralités. — Le tréfilage est un cas particulier de l'étirage. Il consiste à étirer des fils, et il se pratique sur les fils d'acier, de cuivre, de laiton, d'or, d'argent, etc.

Par laminage, on obtient le fil d'acier appelé « fil machine » en faisant passer des barres dans un « train fils », mais on ne peut guère descendre au-dessous d'un certain diamètre (environ $4^{\text{mm}},9$).

En effet, plus la section devient petite, plus il y a danger pour le métal, à cause des efforts en sens contraire, compressions et tractions qui agissent simultanément sur lui; d'autre part, il devient difficile d'obtenir une section parfaitement uniforme, car une légère inégalité résultant d'un déplacement minime d'un cylindre par rapport à l'autre, une aspérité à l'endroit où les deux moitiés de la cannelure doivent se réunir, peuvent déterminer des irrégularités importantes. Il y aurait cependant un grand intérêt à réduire davantage les diamètres des fils par laminage, car l'opération est beaucoup plus rapide.

En effet, nous avons démontré que l'effort de traction T utilisé dans l'étirage est limité par la résistance du fil; par suite, la vitesse de passage dans la filière est également limitée. Mais le travail est mieux exécuté à la filière, car il est évident que la section du fil ainsi obtenu est plus régulière; aussi, avant de livrer au commerce les gros fils laminés, on leur fait subir un ou deux tréfilages.

Les diamètres des fils varient de 100^{mm} à $0^{\text{mm}},025$. Pour les métaux précieux, on pousse quelquefois encore plus loin la ténuité.

Pour distinguer ces différents diamètres, on emploie des jauges très diverses, ce qui crée une très grande complication.

Voici les jauges les plus courantes et leur correspondance en dixièmes de millimètre.

| de Paris. | Jauge | | | Diamètres (en dixièmes de millimètre). |
|-----------|------------|-------------|-----------|--|
| | allemande. | américaine. | anglaise. | |
| 30 | 100 | 000 | 000 | 100 |
| 29 | 94 | 00 | 00 | 94 |
| 28 | 88 | 0 | 00 | 88 |
| 27 | 82 | 0 | 10 | 82 |
| 26 | 76 | 1 | 1 | 76 |
| 25 | 70 | 1 | 2 | 70 |
| 24 | 64 | 2 | 3 | 64 |
| 23 | 59 | 3 | 4 | 59 |
| 22 | 54 | 4 | 5 | 54 |
| 21 | 49 | 4 | 6 | 49 |
| 20 | 44 | 5 | 7 | 44 |
| 19 | 39 | 6 | 8-9 | 39 |
| 18 | 34 | 7-8 | 10 | 34 |
| 17 | 30 | 9 | 11 | 30 |
| 16 | 27 | 10 | 12 | 27 |
| 15 | 24 | 10 | 13 | 24 |
| 14 | 22 | 12 | 14 | 22 |
| 13 | 20 | 12 | 14 | 20 |
| 12 | 18 | 13 | 15 | 18 |
| 11 | 16 | 14 | 16 | 16 |
| 10 | 15 | 15 | 17 | 15 |
| 9 | 14 | 15 | 17 | 14 |
| 8 | 13 | 16 | 18 | 13 |
| 7 | 12 | 16 | 18 | 12 |
| 6 | 11 | 17 | 19 | 11 |
| 5 | 10 | 18 | 19 | 10 |
| 4 | 9 | 19 | 20 | 9 |
| 3 | 8 | 20 | 21 | 8 |
| 2 | 7 | 21 | 22 | 7 |
| 1 | 6 | 22-23 | 23-24 | 6 |
| P | 5 | 24 | 25 | 5 |
| PP | 4 | » | » | 4 |
| » | 3 | » | » | 3 |
| » | 2 | » | » | 2 |
| » | 1 | » | » | 1 |

La jauge allemande, la plus commode, puisqu'elle est décimale, se complète dans les numéros intermédiaires (à partir du n° 6) par

des fractions. Ainsi le n^o 2-3 correspond à 0^{mm},23 de diamètre et le n^o 1-8 à 0^{mm},18.

Pour déterminer le numéro d'un fil, on mesure son diamètre avec un pied à coulisse et l'on se reporte à un tableau analogue au précédent. Ou bien on se sert de calibres qui consistent en des pièces de métal plates, circulaires ou rectangulaires et sur les bords desquelles sont disposées des entailles numérotées, la plus petite de ces entailles dans laquelle le fil peut entrer donne le numéro correspondant.

Jauge Châtillon-Commentry pour les cordes de piano.

| Numéros de la jauge. | Valeur (en centièmes de mm). | Section correspondante (en mm ²). |
|----------------------------|------------------------------------|---|
| 12..... | 77 | 0,4655 |
| 12 $\frac{1}{2}$ | 79 | 0,4902 |
| 13..... | 82 | 0,5281 |
| 13 $\frac{1}{2}$ | 84 | 0,5542 |
| 14..... | 87 | 0,5945 |
| 14 $\frac{1}{2}$ | 89 | 0,6221 |
| 15..... | 91 | 0,6504 |
| 15 $\frac{1}{2}$ | 94 | 0,6940 |
| 16..... | 96 | 0,7238 |
| 16 $\frac{1}{2}$ | 98 | 0,7542 |
| 17..... | 100 | 0,7854 |
| 17 $\frac{1}{2}$ | 102 | 0,8171 |
| 18..... | 104 | 0,8495 |
| 18 $\frac{1}{2}$ | 106 | 0,8825 |
| 19..... | 108 | 0,9161 |
| 19 $\frac{1}{2}$ | 112 | 0,9852 |
| 20..... | 116 | 1,0568 |
| 20 $\frac{1}{2}$ | 120 | 1,1310 |
| 21..... | 124 | 1,2076 |
| 22..... | 132 | 1,3684 |
| 23..... | 140 | 1,5393 |
| 24..... | 149 | 1,7436 |
| 25..... | 157 | 1,9359 |
| 26..... | 166 | 2,1642 |
| 27..... | 175 | 2,4052 |

Pour les fils très fins, la jauge de Paris se complète ainsi :

| Numéros. | Diamètres (en centièmes de mm). |
|-----------|---------------------------------------|
| P..... | 50 |
| P.1..... | 46 |
| P.2..... | 42 |
| P.3..... | 38 |
| P.4..... | 34 |
| P.5..... | 30 |
| P.6..... | 28 |
| P.7..... | 27 |
| P.8..... | 25 |
| P.9..... | 23 |
| P.10..... | 22 |
| P.11..... | 20 |
| P.12..... | 18 |
| P.13..... | 17 |
| P.14..... | 16 |
| P.15..... | 15 |

Enfin voici la jauge carcasse.

| Numéros. | Diamètres (en centièmes de mm). | Numéros. | Diamètres (en centièmes de mm). |
|----------|---------------------------------------|----------|---------------------------------------|
| P..... | 50 | 32..... | 17 |
| 12..... | 47 | 34..... | 14 |
| 14..... | 44 | 36..... | 12 |
| 16..... | 40 | 38..... | 11 |
| 18..... | 37 | 40..... | 10 |
| 20..... | 34 | 42..... | 9 |
| 22..... | 32 | 44..... | 8 |
| 24..... | 29 | 46..... | 7 |
| 26..... | 26 | 48..... | 6 |
| 28..... | 22 | 50..... | 5 |
| 30..... | 20 | | |

Les fils métalliques ne sont pas des produits exclusivement modernes; on en constate l'existence dans l'antiquité. Les Écritures anciennes en font mention; le 39^e chapitre de l'Exode signale que la robe sacerdotale d'Aaron était ornée de fils d'or. Homère et Pline font allusion à des étoffes tissées de fils de métaux précieux. Dans les ruines d'Herculanum, on a trouvé des têtes de métal dont les chevelures étaient imitées par de fins fils de fer. Des câbles composés de fils en bronze ayant plus de 5^m de longueur et près de 2^{cm} de diamètre se voient actuellement au musée de Naples; ils proviennent des fouilles faites à Pompéi; ils sont composés de trois brins torsadés autour de tresses faites en fils métalliques également. Le Kensington Museum à Londres présente un fil fabriqué à Ninive 800 ans avant J.-C. Jusque vers 1350 de notre ère, tous les fils employés étaient obtenus par un procédé grossier et coûteux, le martelage. On n'utilisait guère pour cette fabrication que des métaux précieux : or, argent, bronze. On commençait par former une plaque mince, en martelant le métal, puis on découpait cette plaque et la régularité du diamètre du fil se réalisait également au marteau. Dans les relations de l'histoire d'Augsborg datant de 1351 et dans des récits de celle de Nuremberg, remontant à 1360, on note pour la première fois le mot « Drahtzieher », tréfileur. Ce serait en effet, d'après la tradition, Rudolph de Nuremberg qui le premier aurait eu l'idée de faire passer du métal à travers une plaque d'acier percée d'un trou, pour obtenir un fil; seulement alors, par suite de l'économie du procédé, l'usage des fils de fer et de cuivre put se répandre. Cette industrie s'établit bientôt en France, puis en Angleterre. En 1565, Christophe Schultz, un Saxon, et quelques autres étrangers obtinrent de la reine Elisabeth la permission de monter à Hallywell une tréfilerie actionnée par un moulin à eau. Cette usine fournissait, non seulement des fils métalliques fins destinés au tissage des étoffes des toilettes de la reine, mais aussi des épingles pour ses parures. Sous le règne de Charles I^{er}, la production devint considérable et une tentative fut faite par ce monarque pour interdire l'introduction du fil étranger en Angleterre. Cette industrie, on le voit, est donc

fort ancienne; il est curieux de constater que les procédés employés n'ont pas fait jusqu'ici l'objet d'études méthodiques; on applique depuis des siècles, des règles que l'expérience a certes sanctionnées, mais que la science n'a pas approfondies. Certaines tréfileries ont même gardé un caractère archaïque, tant par la disposition de leurs ateliers que par les moyens mis en œuvre. Goethe, dans ses Mémoires, témoigne d'une réelle admiration pour cette industrie; elle présente effectivement un champ très vaste de recherches; des laboratoires d'essais devraient être créés dans les grandes usines, on y découvrirait certainement d'importantes modifications à appliquer à la technique actuelle de la tréfilerie.

Fabrication du fil machine. — Nous ne donnerons que quelques indications succinctes sur cette fabrication qui sort de notre sujet.

On obtient le fil machine en partant de la billette ($50 \times 50^{\text{mm}}$) ayant les angles abattus. Des wagonnets l'amènent à un pont roulant qui la dépose sur un plan incliné appelé *tablier*, elle glisse alors sur des rouleaux jusqu'au four à réchauffer dont la sole est inclinée.

Une tige fourchue saisit la barre, la pousse hors du four, la tourne de 90° pour faire tomber le dépôt qui peut la recouvrir et l'engage dans la première paire de cylindres du train.

Le train comporte généralement 15 ou 17 paires de cylindres réunis en trois groupes.

Le premier groupe, dit « train dégrossisseur », comprend 7 paires de cylindres.

Le deuxième groupe, dit « train intermédiaire », comprend 4 paires de cylindres.

Le troisième groupe, dit « train finisseur », comprend 6 paires de cylindres.

En sortant de la dernière paire de cylindres du groupe dégrossisseur, la barre est « mouchée » par une cisaille à vapeur commandée par un apprenti.

Des « serpenteurs » mécaniques amènent la barre d'une paire de cylindres à la suivante dans le même groupe.

La barre à la sortie du train finisseur s'enroule à la bobineuse qui tourne à une vitesse très grande. Le laminoir Morgan, installé récemment à Sheffield, débite le fil à plus de 50^{km} à l'heure; 50 pour 100 du fil est déjà enroulé sur la bobineuse que l'autre extrémité de la barre est encore au four, il produit des longueurs dépassant 900^m.

Décapage. — La couche d'oxyde qui recouvre le fil machine pourrait être enlevée, plus ou moins bien d'ailleurs, par sablage ou par une passe pratiquée en sens inverse, dans une vieille filière dont le trou aurait le même diamètre que le fil ayant perdu sa couche d'oxyde.

Ces procédés donnent de très mauvais résultats. Pour enlever la pellicule il faut décaper. Cette opération est assez onéreuse, car on doit compter environ 40^{kg} d'acide sulfurique à 60° pour traiter une tonne de fil machine.

Il ne s'agit pas de dissoudre l'oxyde dans l'acide, car sa solubilité est très faible, l'action est tout autre. L'acide attaquant le fer dégage de l'hydrogène qui s'accumule entre le métal et la pellicule, celle-ci se détache alors; on constate en effet que le bain dégage au début assez peu d'hydrogène, puis au bout de quelques minutes le dégagement devient abondant; c'est le moment où la pellicule, en se séparant du fil, rend libre l'hydrogène qu'elle retenait, tandis que l'attaque se poursuit librement et avec activité sur le fer lui-même. Cette pellicule se détache plus facilement lorsque le fil a été exposé un certain temps à l'air humide. Un fil machine sortant des forges où il a été produit par laminage se décape assez difficilement, la couche d'oxyde étant très adhérente.

Il faut limiter l'usage du bain, à cause du sulfate de fer qui, devenant trop abondant, se déposerait en cristaux sur le fil; ces cristaux, collés au métal, détermineraient des accidents de tréfilage.

Vitesse de dissolution dans les acides. — Le fer écroui d'après Osmond et Werth se dissout plus vite que le fer n'ayant pas subi de traitement mécanique. Un morceau de fil d'acier très doux de

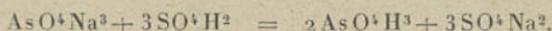
1^{mm} de diamètre pesant 630^g, soumis à l'action de l'acide chlorhydrique pendant 165 minutes, a perdu à l'attaque 321^g sur l'échantillon de fil étiré et 6^g sur l'échantillon du même fil recuit. Avec un acide plus dilué, le phénomène est encore plus accusé. L'acide azotique dilué dissout 630^g du métal étiré en 8 minutes, et la même quantité du métal recuit en 17 minutes. L'acide azotique à 36° B. dissout le fil étiré, il ne dissout pas le fil recuit. Si l'on part d'une quantité initiale de 630^g, l'acide sulfurique dilué à $\frac{1}{4}$ dissout, au bout de 105 minutes, 13^g du fil recuit et 183^g du fil étiré.

Il y a là un moyen de reconnaître le fil écroui du fil recuit et l'on pourrait, mesurant numériquement les vitesses de dissolution dans les acides, arriver à déterminer par un chiffre le degré d'écrouissage.

Décapage fixe. — Il est vendu des produits qui ont pour but de limiter l'action de l'acide, à la dissolution de la couche d'oxyde, dans les opérations de décapage des fers, des aciers ordinaires et spéciaux et des fontes.

Au point de vue économique, la question présente une réelle importance, car la dépense d'acide et la quantité du métal dissous sont diminuées et le travail ultérieur est facilité. Il faut de plus remarquer que le produit aura un aspect meilleur et qu'enfin l'atelier de décapage contiendra moins de vapeurs d'acide, ce qui, au point de vue de l'hygiène, offre un grand avantage.

Longtemps on a employé dans ce but l'arséniate de sodium. On ajoutait ce produit au bain de décapage. La réaction chimique était la suivante :



L'acide $\text{As O}^{\cdot}\text{H}^{\cdot}$ reste dissous, mais lorsqu'on introduit le fer, on a une réduction qui donne un dépôt, d'abord parce que le fer déplace l'arsenic, et aussi à cause de l'hydrogène naissant produit par le décapage :



Ce dépôt compact d'arsenic ne laisse pas passer l'acide, il forme par conséquent une couche extrêmement mince, et c'est pourquoi une très petite quantité du produit est suffisante pour un tonnage important de fil traité. Cependant, quand on voudra procéder à la galvanisation ou au cuivrage, il faudra prendre à l'avance la précaution d'enlever complètement cette couche qui empêche parfois la formation régulière du dépôt de zinc ou de cuivre. Pour ces fabrications, il est donc à recommander de ne pas employer l'arséniat de soude. Un autre inconvénient de ce produit est qu'il est d'une manipulation dangereuse, les vapeurs d'acide sulfurique sont plus nocives, car elles entraînent un peu d'arsenic à l'état d'hydrogène arsénié; de plus, le fil recouvert de ce dépôt pulvérulent ne prend pas au tréfilage son bel aspect habituel. Enfin l'hydrogène naissant forme un hydrure de fer qui rend le métal fragile, cette réaction se produit d'autant mieux que la température de décapage est plus élevée.

On a essayé l'emploi de certains produits gélatineux ajoutés également au bain de décapage; en surnageant, ils arrêtent tous les dégagements de gaz et limitent par conséquent l'attaque de l'acide; mais ces corps se conservent mal; l'action, d'autre part, ne cessant pas toujours exactement au moment voulu, le fil est inégalement décapé.

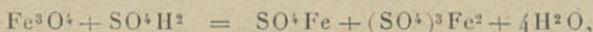
La plupart des usines ont adopté un produit d'origine allemande, dont la composition a été jusqu'ici tenue secrète et qu'on désigne sous le nom de *fixo-décapeur*.

Nous donnerons quelques renseignements sur des expériences de décapage méticuleusement faites et comportant une addition de ce produit.

Les bains d'acide sulfurique à 10 pour 100 en volume chauffés à 50° contenaient 3 pour 100 de *fixo-décapeur*, produit qui d'ailleurs n'est pas altéré même à 70°, mais il ne faut pas aller plus loin. Deux échantillons d'une même tôle d'acier doux, brute de laminage présentant exactement la même surface, ont été pendant 3 heures abandonnés, l'un dans le bain acide sans *fixo-décapeur*, l'autre dans le même bain auquel avait été ajouté ce produit.

Dans le bain ordinaire, l'échantillon a perdu 6^g,298 et celui de l'autre bain 0^g,156 seulement. On constate que le dégagement d'hydrogène est abondant dans le premier cas, presque nul dans le second.

Comment agit le fixo-décapeur ? Il recouvre le métal non l'oxyde, qui seul est attaqué. Lorsque l'oxyde est dissous, le métal apparaît, le fixo-décapeur se dépose alors et bientôt toute la pièce est protégée, l'acide n'agit plus et le dégagement d'hydrogène cesse. Les formules sont les suivantes :



Deux échantillons d'une même tôle d'acier doux, brute de laminage, par conséquent oxydée, découpés comme précédemment et soumis à l'action des deux bains, ont été décapés : le premier en 25 minutes dans le bain contenant le fixo-décapeur; le second en 15 minutes dans celui ne contenant pas ce produit. Son introduction dans les bains de décapage apporte par suite un retard important à l'opération.

La teneur de 3 pour 100 de fixo-décapeur paraît donner les meilleurs résultats. Au-dessous de 2 pour 100, ils ne sont pas du tout satisfaisants.

Avec l'acide chlorhydrique à 20 pour 100, on arrive à des conclusions analogues.

L'efficacité de ce produit ne semble pas diminuer avec le nombre d'opérations; il pourrait servir très longtemps si l'on ne devait rejeter le bain lorsque l'acide sulfurique complètement saturé a été transformé en sulfate de fer.

Nous avons dit précédemment que le fer décapé aux acides, par suite sans doute de l'absorption d'hydrogène, présentait une plus grande fragilité; l'attaque étant limitée par le fixo-décapeur, il en résulte qu'une part de cet inconvénient disparaît.

Par l'emploi industriel de ce produit dans les bains de décapage on est arrivé aux conclusions suivantes :

1° *Beauté du produit décapé et étiré.* — Le métal n'est pas creusé; ses défauts physiques apparaissent très peu; la surface est régulière. Ce fait est capital pour de nombreuses fabrications : étirage des tubes, préparation des fils, obtention des tôles minces laminées à froid, du fer-blanc, etc.

2° *Moindre usure de filières et organes divers d'étirage.* — Ceci est la conséquence de l'opération donnant une barre régulièrement décapée et de surface relativement unie. Ce fait a été unanimement constaté et d'une façon extrêmement marquée pour les fils; la durée des filières s'est trouvée multipliée par 5.

3° *Moindre énergie dépensée dans le travail.* — Sur des bancs commandés individuellement par dynamo, on a pu constater une diminution de l'énergie consommée, dans le rapport d'environ 5 à 10 pour 100.

4° *Moindre usure du matériel employé dans le décapage.* — Tout le matériel métallique, qui est en jeu dans le décapage, celui servant à plonger les barres dans le bain, à les retirer pour les plonger dans les bacs de lavage, etc., tout ce matériel s'use, par l'attaque rapide de l'acide. Il se trouve protégé par le décapeur fixe, tout comme l'acier à décaper lui-même.

5° *Moindre usure des fermes métalliques des charpentes soumises aux vapeurs.* — La suppression presque totale des vapeurs acides n'oblige plus à la ventilation indispensable des ateliers, lorsqu'on utilise les bains ordinaires. Enfin il s'ensuit que les charpentes métalliques des ateliers ne sont plus attaquées.

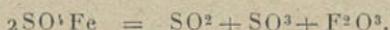
6° L'opération terminée, le fil peut rester dans les bains sans inconvénient, ce qui rend le travail de nuit possible sans avoir à créer d'équipes supplémentaires; il suffit de garnir les cuves le soir avant la fermeture des ateliers. Les inconvénients de ce produit sont qu'il coûte assez cher, qu'il est d'importation étrangère et qu'il détermine un certain retard dans les opérations de décapage, ce

qui peut entraîner à utiliser pour une production déterminée un nombre plus important de cuves.

Enfin, il se peut que l'emploi du décapeur fixe simplifie considérablement la construction toujours délicate et souvent très coûteuse des bacs de décapage.

Récupération du sulfate de fer. — Le sulfate ferreux ($\text{SO}^1\text{Fe} + 7\text{H}^2\text{O}$), déterminé par l'attaque du fer par l'acide sulfurique, n'est pas un produit sans valeur. Il est employé, on le sait, comme désinfectant, pour la fabrication de l'encre ordinaire, du rouge d'Angleterre, de l'acide fumant de Nordhausen et surtout en teinture pour la préparation du bleu de Prusse et des cuves d'indigo.

La récupération de ce produit ne peut être réalisée que dans les installations importantes; elle ne présente pas un gros intérêt au point de vue du bénéfice qu'elle laisse, mais elle permet de se débarrasser sans inconvénient des eaux résiduelles. On peut se contenter de recueillir les cristaux après refroidissement de ces eaux, les faire sécher à l'air, mais l'eau qui reste interposée entre eux contient une forte proportion d'acide; il est donc préférable de pousser plus loin la dessiccation par essorage, surtout si l'on veut ensacher le sulfate pour les transports. Le sulfate cristallise en prismes clinorhombiques de couleur vert émeraude; ils contiennent, nous l'avons dit, 7 molécules d'eau de constitution. Ces cristaux se dissolvent dans un tiers de leur poids d'eau à 100° . Chauffés à 100° , ils perdent l'eau d'interposition et 6 molécules d'eau de constitution, l'autre molécule s'évapore à 300° ; le sel anhydre est blanc. Au-dessus de cette température la décomposition commence pour se terminer à 900° en donnant du sesquioxyde de fer Fe^2O^3 d'après la réaction



Cet oxyde est le colcothar ou rouge d'Angleterre. Pour que l'opération de récupération du sulfate présente un avantage, il faut qu'on puisse le revendre aux teintureries et dans ce cas les

cristaux doivent être purs; aussi cherche-t-on à enrichir la dissolution par des additions de ferrailles. On opère ensuite une concentration par chauffage à la vapeur circulant dans un serpentin; les cristaux mieux nourris sont plus gros, partant le produit est plus pur. On voit que cette récupération demande un matériel coûteux et les cours du sulfate ferreux ne sont pas toujours tels qu'elle permette de réaliser un bénéfice intéressant.

Sortant des bains de décapage, si le fil ne doit pas être tréfilé immédiatement, on peut le conserver dans des cuves remplies d'eau; il se trouve ainsi protégé contre l'oxydation; de plus, le sulfate de fer qui pouvait adhérer se trouve dissous. Quand on doit tréfiler au savon, il faut procéder au jaunissage, c'est-à-dire à oxydation à l'air humide qui sera poussée proportionnellement au nombre de passes que le fil devra subir ultérieurement. Il est à recommander de faire précéder cette oxydation d'un lavage des couronnes sortant des bains de décapage, et de préférence à l'eau chaude, afin d'enlever l'acide et le sulfate. L'oxydation doit se faire à l'abri des vapeurs d'acide, afin d'éviter l'attaque du métal. Après le jaunissage on neutralise les dernières traces d'acide par un lait de chaux maintenu à la température de 80° environ et dans lequel le fil est immergé.

Il en sort couvert d'une pellicule de chaux qui facilitera ultérieurement le tréfilage à sec. Après le chaulage, on sèche à l'étuve et autant que possible l'opération de tréfilage au savon doit commencer aussitôt afin d'éviter qu'à l'air, parfois humide de l'atelier, le fil ne perde les avantages de la préparation qu'il vient de subir.

Si le fil a été exposé à l'air un certain temps après le décapage, il est recouvert d'une couche de rouille qu'il est préférable d'enlever par battage avant de procéder à un nouveau décapage. Cette oxydation, si elle n'est que superficielle, c'est-à-dire si le fil n'est pas gravé, ne présente pas d'inconvénient, elle facilite même le tréfilage dans une certaine mesure.

Le décapage se fait dans des bacs de bois doublés de plomb. On a essayé la pierre de Volvic, l'acier et la fonte, les résultats

n'ont jamais été très satisfaisants. Lorsque la cuve est en bois, elle a une forme rectangulaire. Si elle est en fonte, on la fait en deux parties, le fond étant un demi-cylindre qui épouse ainsi la forme des bottes; la partie supérieure comporte des parois verticales. L'inconvénient de ces cuves réside le plus souvent dans la rapide détérioration des joints. Le brevet Roussel (1912) comporte une disposition de cuve pour le décapage en grès cérame, construite sans joints. Cette cuve présente des épaulements intérieurs à hauteur variable qui permettent l'appui des barres de support des couronnes à décaper. La partie supérieure exposée aux chocs peut recevoir un revêtement amovible en métal, plomb ou cuivre rouge, qui est maintenu par un dispositif spécial.

Le chauffage se fait généralement par barbotage; c'est le procédé le plus économique, mais il faut éviter que la vapeur ne frappe directement le revêtement de plomb qui serait alors rapidement attaqué; naturellement cette vapeur doit être amenée par un tuyau de plomb, au milieu des bacs. Dans la partie extérieure aux bacs, les conduites peuvent être en fer; malheureusement les vapeurs acides les détériorent rapidement, aussi préfère-t-on souvent employer des tuyaux de caoutchouc même pour la partie plongeant dans le bain, ils ont de plus l'avantage d'être mobiles. Dans les décaperies importantes, il existe des réservoirs où se préparent les bains; des tuyauteries de plomb amènent aux bacs à remplir le liquide exactement dosé.

Pour vider les bacs, on soulève un tampon de bois obturant le trou percé dans la partie inférieure des bacs ou bien on opère par siphonage au moyen d'un tuyau de plomb ou de caoutchouc. On peut aussi aspirer le liquide par des pompes centrifuges qui le déversent dans des bacs garnis de plomb où se produit la cristallisation. Ces pompes se font en grès, mais elles sont fragiles. On préfère les construire en un bronze spécial assez peu attaquable. Il est mieux encore de siphonner le liquide dans un bac intermédiaire pour le refouler ensuite, par de l'air comprimé, jusqu'aux cuves de cristallisation.

Décaperies. — Les ateliers de décapage sont généralement installés sous un hangar fermé sur un ou deux côtés seulement afin qu'il y ait une grande aération diminuant les inconvénients dus aux émanations acides.

Les cuves, creusées dans le sol, sont faites en maçonnerie, généralement constituée par des dalles de grès; leur forme est rectangulaire le plus souvent, quelquefois ovale. Elles sont disposées soit sur un arc de cercle, la longueur étant dans la direction d'un rayon et, dans ce cas, elles sont desservies par une grue dont le pivot est placé au centre de ce cercle; soit parallèlement les unes aux autres, et alors un pont roulant peut circuler au-dessus d'elles. Cette dernière disposition convient surtout aux installations importantes, car on peut mettre à la suite un grand nombre de cuves. Au contraire, si elles sont placées suivant les rayons d'un cercle dont le diamètre dépend évidemment de la portée de la grue, leur nombre est limité.

Les couronnes sont enfilées dans une barre de fer dont les extrémités sont recourbées légèrement. Le pont roulant (ou la grue) saisit par l'intermédiaire de chaînes et de crochets ces extrémités munies d'anneaux, il soulève la charge et la dépose dans le bain. La barre étant plus longue que la cuve repose par ses deux bouts sur les parois de celle-ci, tandis que le fil se trouve complètement immergé dans le liquide.

La dernière de ces cuves ne contient que de l'eau et sert au lavage du fil qui sort de là pour se rendre aux ateliers.

Le fil, décapé et rincé, est transporté près des bancs de tréfilerie que nous allons décrire.

Banc de tréfilerie. — Le banc de tréfilerie se compose d'une sorte de table très robuste sur laquelle sont disposés le dévidoir, la filière et le tambour d'entraînement. L'effort est transmis, par un arbre placé horizontalement sous le banc et parallèlement à la longueur, à deux engrenages coniques, l'un solidaire de cet arbre et l'autre fixé à celui qui soutient le tambour et qui est vertical. L'appareil est constamment en relation avec la force motrice,

vapeur ou chute d'eau, il y a simplement sous le tambour un dispositif qui permet de commencer ou d'arrêter l'opération, au gré de l'ouvrier.

Le dévidoir, grossièrement construit, est fou sur son axe. Il est généralement fait et réparé dans un atelier de menuiserie qui dépend de l'usine. Il y a lieu de le remplacer assez fréquemment, les liquides qui mouillent le fil, comme nous le dirons plus loin, amenant une rapide détérioration.

La filière est fixée dans un support en métal; on l'y assujettit très solidement en enfonçant, à coups de marteau, des cales et des coins entre elle et ce support. Il faut prendre soin de bien régler sa position, nous l'avons déjà dit pour l'étirage.

Lorsqu'on doit travailler des gros fils (6^{mm} à 14^{mm}), on emploie ce qu'on appelle les bobines de couche. Elles diffèrent de celles que nous avons décrites en ce que leur axe au lieu d'être vertical est horizontal; il en est de même pour les dévidoirs. La manipulation des lourdes couronnes, desquelles on tire le fil de gros diamètre, sera facilitée, car de cette façon il n'y aura qu'à les glisser sans avoir à les soulever, pour les introduire dans les machines ou les en retirer.

Dans le cas de bobines de couche, l'arbre moteur commande deux séries de tambours, l'une à droite de cet arbre, l'autre à gauche.

Dans le cas des bobines verticales, il n'y en a qu'une seule série qui constitue le banc de tréfilerie.

Pour les fils fins, on place généralement le dévidoir dans le baquet même qui contient le liquide de graissage, et à côté du banc.

Le fil clair, c'est-à-dire celui qui sort de la filière, est facilement oxydable; une légère humidité produit la rouille. Il y a là un inconvénient grave qu'on cherche souvent à éviter. On emploie, dans ce but, des bains très étendus de protochlorure d'étain; il se forme sur le fil un dépôt métallique très mince, mais suffisant pour le protéger.

L'axe du trou de filières n'est pas placé exactement suivant la tangente de la bobine de traction; l'ouvrier, en calant la filière,

donne une très légère inclinaison. Il faut remarquer en effet que le fil étiré est écroui; par conséquent le métal a subi une déformation permanente par suite de l'effort qui a dépassé la limite élastique. Il n'a plus la même malléabilité, il présente une certaine raideur et il est nécessaire d'éviter qu'il ne se mette en *huit*, ou qu'il n'ait tendance à se détendre, quand, en rouleaux, on le sortira du banc après le travail. Il faut donc que la déformation du fil

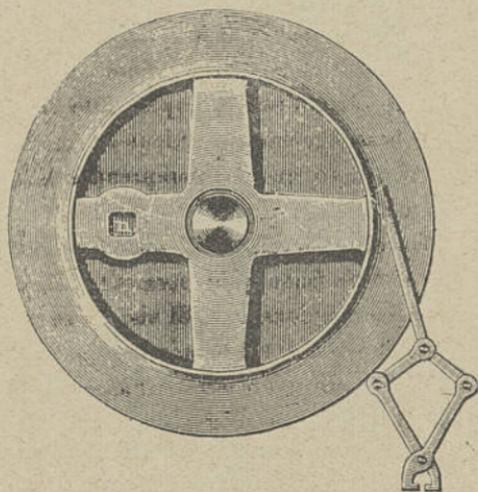


Fig. 35.

soit telle qu'il reste en rouleau de lui-même; c'est par une bonne position de la filière qu'on arrive à ce résultat. Généralement les supports de filières sont disposés de manière à éviter tout tâtonnement.

Une remarque est encore à faire; le support de filière ne doit pas être trop éloigné de la bobine, car des vibrations se produisent parfois qui amènent une rupture du fil; enfin le dévidoir doit être bien placé, sans quoi le fil entrant en biais dans la filière userait le trou de celle-ci inégalement; il s'ovaliserait assez rapidement. Si le dévidoir ne peut être placé où il faudrait, on peut remédier à

l'inconvénient signalé en disposant en avant de la filière un galet qui, guidant le fil, l'obligera à se présenter dans la direction voulue. La position de la filière devrait être très soigneusement étudiée. Jusqu'ici on s'est contenté de la placer au jugé, mais il reste certain que cette position mériterait d'être définie mathématiquement.

Le tambour est en fonte, il a souvent une forme légèrement

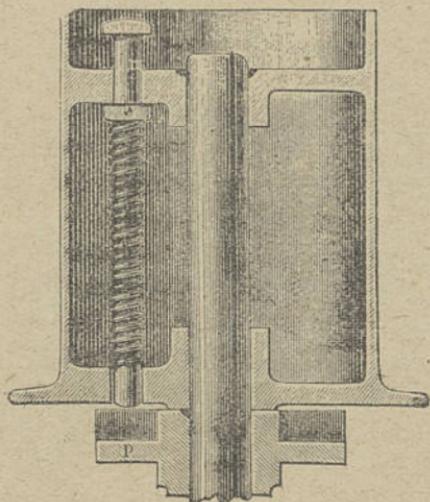


Fig. 36.

conique afin qu'il soit facile d'enlever la couronne de fil, lorsque l'opération est terminée. Il porte deux dispositifs particuliers, l'un sert à assujettir le fil, l'autre à la mise en route de l'opération.

Le premier consiste en une sorte de pince qui vient saisir le fil à la sortie du trou de filière. Cette pince agit automatiquement, c'est-à-dire qu'elle serre le fil d'autant plus fortement que la résistance qui s'oppose à la traction est plus grande. Elle est fixée à la partie inférieure du tambour par une liaison articulée, quelques maillons de chaîne par exemple. Elle se compose de bras également

articulés, comme le montre la figure 35 qui fait comprendre le fonctionnement.

Le dispositif servant à la mise en route est compris de telle façon qu'il permet le débrayage automatiquement lorsque le fil vient à se rompre ou quand l'opération est terminée.

Le tambour creux est fou sur l'arbre O (fig. 36 et 37) qui reçoit son mouvement par la partie inférieure, comme nous l'avons expliqué. Cet arbre porte claveté sur lui un plateau P qui tourne donc constamment. Pour entraîner le tambour, il suffira de le

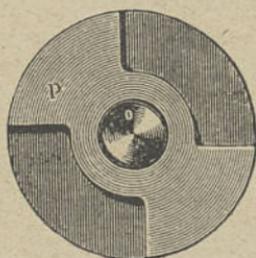


Fig. 37.

rendre solidaire du plateau. Ce dernier présente, à sa face supérieure, deux saillies. Le tambour est, en outre, muni d'une tige *n* qui peut se déplacer verticalement en couissant dans des trous pratiqués, l'un au travers d'un bras et l'autre dans le fond du tambour. Un ressort tend à ramener cette tige dans la position représentée par la figure 36, c'est-à-dire vers le haut. La pince serrant le fil et le tambour étant fou sur son axe, si l'on exerce avec la main un effort de haut en bas sur l'extrémité supérieure de la tige, l'autre bout rencontrera le plateau P dont une des saillies viendra s'appliquer contre la tige et déterminera l'entraînement. La pression qui s'exerce entre l'extrémité de cette tige et le bord de la saillie, pression qui est due à la résistance de la filière au passage du fil, est suffisante pour annuler l'effort du ressort. Le tambour est donc bien embrayé. Si le fil vient à casser, la résistance ne s'exerçant plus, la pression dont nous venons de parler cesse, le ressort peut

agir, la tige remonte, le tambour est débrayé. La même chose se passe lorsque, l'opération étant terminée, l'extrémité du fil-sort de la filière.

Une autre disposition qu'on rencontre quelquefois est la suivante :

Le tambour peut être soulevé ou abaissé par l'intermédiaire de leviers mus par une pédale; des broches sont fixées au fond du tambour qui est fou sur l'arbre vertical de commande. Par l'abaissement, ces broches pénètrent dans des trous pratiqués dans le plateau solidaire de l'arbre, cela détermine, par conséquent, l'embrayage. En appuyant sur la pédale, on soulève le tambour, les broches se dégagent et l'appareil est débrayé. Cette disposition, on le comprend, présente de grands inconvénients, d'abord le déplacement vertical du tambour et, par suite, du brin tractionné fait que ce dernier ne reste pas à la hauteur du trou de la filière. Ensuite, quand le tambour est soulevé, il y a un certain espace entre lui et le banc, et il peut arriver que le fil s'embrouille en s'enroulant autour de l'arbre de commande. Enfin, et c'est là le point le plus défectueux, l'arrêt ne se fait pas automatiquement; cela exige donc une continuelle surveillance de la part de l'ouvrier.

Vitesse de tréfilage. — La vitesse de passage du fil dans la filière varie pour un même métal avec le diamètre, plus ce dernier est petit plus la rapidité sera grande. Pour le fer, voici quelques chiffres qui ont été adoptés dans une tréfilerie du Maine-et-Loire :

| Diamètres des tambours. | Nombre de tours par minute. | Numéros des fils à la sortie de la filière (jauge de Paris). |
|-------------------------------|-----------------------------------|---|
| ^{mm} 700..... | 15 | 30 au 21 |
| 660..... | 20 | 21 au 18 |
| 500..... | 30 | 18 au 13 |
| 320..... | 45 | 13 au P |
| 280..... | 45 | 13 au PP |

Ces chiffres sont d'ailleurs trop faibles. On peut appliquer des vitesses supérieures. Voici des relevés moyens faits dans divers autres ateliers de tréfilerie; ils permettent de fixer les vitesses de travail pour le fil d'acier doux.

Pour descendre du fil du n° 21 au n° 18, la bobine de 600^{mm} de diamètre tourne à 35 tours, soit une vitesse linéaire de 1^m,10 à la seconde.

Pour descendre du fil du n° 18 au n° 15, la bobine de 600^{mm} tourne à 38 tours, soit une vitesse linéaire de 1^m,20.

Pour descendre du fil du n° 15 au n° 10, la bobine de 400^{mm} tourne à 50 tours, soit une vitesse linéaire de 1^m,05.

Pour descendre du fil du n° 10 au n° 7 et au-dessous, la bobine de 250^{mm} tourne à 60 tours, soit une vitesse linéaire de 1^m,55 à la seconde.

Lorsque le fil est en acier demi-dur, la vitesse est réduite, les bobines tournent de 25 à 28 tours et elles ont pour les gros fils 60^{mm} de diamètre.

Les fils de laiton peuvent passer à la filière à une vitesse double, mais dans la pratique cette grande vitesse n'est pas intéressante pour les gros fils, car les pièces à travailler sont moins importantes, elles ne pèsent guère que 25^{kg}; elles passent trop vite pour que l'homme qui mène le banc ait le temps de l'alimenter.

On se borne à faire tourner à 100 tours des bobines de 80^{mm} de diamètre.

Les bobines dégrossisseuses et finisseuses tournent généralement à la même vitesse; cependant, dans certains ateliers, ce qui du reste n'est pas à recommander, la bobine ébaucheuse tourne plus vite que la bobine repasseuse ou finisseuse dans la proportion de 10 pour 100.

Ainsi, pour descendre du n° 18 au n° 15, nous connaissons des bobines ébaucheuses de 540^{mm} de diamètre et des bobines finisseuses de 500^{mm} tournant toutes deux à 34 tours, ce qui correspond à une vitesse linéaire de 0^m,96 et 0^m,88 à la seconde, vitesse d'ailleurs insuffisante.

Pour faciliter le passage du fil dans la filière on a soin de le graisser, soit au savon, soit au baquet, c'est-à-dire que la couronne de fil avant d'être travaillée est plongée dans un bain spécial. Nous reviendrons sur ce point.

Le fil graissé au savon est passé à plus grande vitesse à la filière que le fil graissé au baquet. La vitesse varie d'ailleurs d'une usine à l'autre; elle dépend bien entendu de la qualité de l'acier travaillé, mais des recherches devraient être faites systématiquement afin de déterminer les conditions de tréfilage de l'acier à la vitesse maximum, et suivant le mode de graissage. Voici encore, à ce sujet, quelques indications :

Pour l'acier extra-doux : du 21 au 18, la vitesse est comprise entre 50 et 65^m à la minute; du 18 au 13, elle varie de 60 à 65^m; à partir du 13, les vitesses peuvent, avec graissage au savon, dépasser 100^m. On cite même des vitesses de 130^m par minute.

Pour les gros fils (n° 30, par exemple), la vitesse de 40^m est généralement adoptée.

Puissance nécessaire au tréfilage. — Un fil en acier extra-doux, recuit, présentant par conséquent une charge de rupture de 35 à 38^{kg}, demande, pour être *descendu* du n° 21 au n° 18 à la vitesse de 55^m à la minute, environ 6 chevaux; du 18 au 16, à la vitesse de 45^m, environ 2 chevaux; du 16 au 14, à la même vitesse, 1 cheval, et du 14 au 12 à la vitesse de 50^m, 0,5 cheval.

Pour les passes plus petites, la puissance est voisine de 0,5 cheval. Naturellement la méthode de tréfilage a une certaine importance. Le tréfilage au savon demande un peu moins de puissance que le tréfilage au baquet. Il serait intéressant de faire des essais à ce point de vue.

Pendant l'opération de tréfilage, il est indispensable de lubrifier le fil afin qu'au passage dans le trou de la filière il prenne ce qu'en terme d'atelier on appelle du « coulant ». Il passe alors plus facilement, sans se rayer, et offre un moindre effort à l'opération.

La difficulté de ce graissage consiste en ce que la substance doit

adhérer au fil afin qu'elle passe en même temps que lui, tout au moins en partie, dans le trou de filière.

Il y a en effet une très grande pression exercée par la filière sur le fil; cette pression a tendance à rejeter le lubrifiant, et par conséquent l'effet qu'on recherche ne sera pas obtenu; d'autre part, si la substance est trop épaisse, le trou de filière s'encombre, sans doute des coincements se produisent, déterminant la rupture du fil.

C'est une longue pratique qui a fixé l'emploi des substances de graissage.

Deux méthodes principales sont appliquées : 1^o par voie sèche; 2^o par voie humide.

1^o GRAISSAGE PAR VOIE SÈCHE. — *a. Savon.* — On trouve des poudres de savon extrêmement fines contenant certaines proportions de talc qui donnent d'assez bons résultats; il est indispensable que ces poudres soient très sèches.

Aussi est-il nécessaire de les porter à l'étuve, avant l'opération, à une température qui n'en amène cependant pas la décomposition, mais qui entraîne toute trace d'humidité : 50° à 60° sont des températures qui conviennent.

Ces savons particuliers, préparés spécialement, se vendent en poudre ou en blocs. Mais dans ce dernier cas il est préférable de les pulvériser finement pour les employer.

Le savon de Marseille donne des résultats satisfaisants.

Comment emploie-t-on cette poudre ?

On la place dans des petits récipients appropriés; le fil en traverse les parois, entraînant avec lui cette poudre. Il est évident qu'une perte importante du produit est inévitable. On admet qu'elle peut atteindre 80^r par 100^{es} de fil et par passe.

La perte est plus grande pour les fils fins; on a imaginé des boîtes spéciales qui réduisent sensiblement cette perte, elles affectent la forme d'un entonnoir, le fil traversant de part en part diamétralement la partie inférieure et à sa sortie un ajutage d'un diamètre très exactement calibré, fait d'un métal dur pour éviter l'usure,

retient la majeure partie du savon, laissant sur le fil simplement une petite couche qui sera suffisante pour l'opération de tréfilage. Cet ajutage peut être remplaçable. La vitesse du fil empêche d'ailleurs que le savon ne s'écoule par l'orifice d'entrée du récipient.

Le tréfilage au savon présente les avantages suivants : 1^o propreté des ateliers; 2^o rapidité et réduction du diamètre, beaucoup plus grandes dans les passes; 3^o moindre fatigue des filières; 4^o détérioration moindre du matériel puisque tout acide a disparu; 5^o meilleure qualité du produit pour la même raison. Mais cette méthode ne peut être employée dans les pointeries, car le savon dont le fil est enduit encrasse les machines, fait adhérer aux couteaux les pointes qui ne tombent plus librement et il en résulte des désordres dans le fonctionnement de ces machines. D'autre part, le fil ainsi préparé a une couleur spéciale que les quincaillers n'acceptent pas. Il est vrai qu'il est possible de donner les dernières passes au baquet; il faut dans ce cas modifier la composition du bain.

b. Graisse. — Nous n'avons pas beaucoup de détails à donner à ce sujet, une bonne graisse ordinaire convient très bien.

M. Papier, ingénieur des Arts et Métiers, recommande une composition que nous avons essayée et dont nous nous sommes trouvés satisfaits. Elle comporte 1^{kg} de chaux éteinte, en poudre, 200^{kg} d'huile de colza ordinaire très intimement mélangés; on y ajoute de l'huile goutte à goutte afin d'éviter que la substance ne se dessèche.

Ajoutons qu'on se sert du graphite pour le tréfilage du tungstène, métal qui ne peut être tréfilé que par ce lubrifiant.

2^o MÉTHODE DE GRAISSAGE PAR VOIE HUMIDE. — Cette méthode s'applique plus généralement que les deux autres.

Elle consiste à produire sur le fil, avant son passage à la filière, un dépôt d'un métal malléable qui agira à la manière de la graisse et du savon.

C'est un procédé qui reste comme la propriété de l'ouvrier tréfileur. La composition du bain est tenue par lui secrète et il faut reconnaître que cette composition a une importance dans l'opération de tréfilage.

Le dépôt de cuivre est obtenu par un bain de sulfate de cuivre en solution dans de l'eau acidulée. Mais il faut ajouter un corps gras qui est généralement du suif.

Le tout est émulsionné dans des baquets qui servent à préparer la composition et dans lesquels les pièces de fil sont placées quelque temps avant (10 minutes environ) de passer à la filière. Si elles restaient longtemps dans ces baquets, le dépôt de cuivre serait trop important. Non pas que cela gênerait l'opération, mais il en résulterait une dépense supplémentaire de sulfate, d'acide et aussi de graisse.

Voici la composition d'un de ces bains :

50^l d'eau, 500^g d'acide sulfurique à 52° Baumé.

75^g de sulfate de cuivre en cristaux. Quant au corps gras, il en faut environ 1 litre si c'est de l'huile de colza et 3 à 4^{kg} si c'est du suif.

Appointage. — Avant d'être étiré, le fil, pour qu'il s'engage

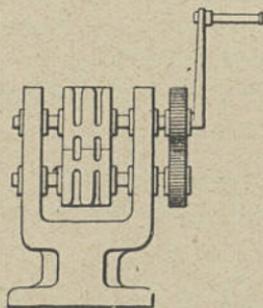


Fig. 38.

aisément dans le trou de filière, doit être martelé à l'une de ses

extrémités. C'est l'opération d'appointage. Elle se pratique au marteau, à froid, pour les fils de petit diamètre. Quand il s'agit de gros fil, n° 20 par exemple, on emploie des laminoirs minuscules, manœuvrés par l'ouvrier au moyen d'une manivelle (*fig. 38*). Ils comportent deux cylindres cannelés qui peuvent tourner d'environ 120° en sens inverse. L'extrémité du fil qu'il faut appointer est introduite dans la cannelure correspondant à son diamètre. Quelques mouvements de va-et-vient de la manivelle suffisent pour obtenir une pointe effilée. Si le fil est de trop gros diamètre, le laminoir sera mû mécaniquement et même, au-dessus du n° 25, il sera préférable de pratiquer l'appointage à chaud.

Filières. — Deux qualités sont à exiger des filières employées au travail du fer. Elles doivent être à la fois dures et forgeables; dures afin que l'orifice par lequel le métal s'écoule ne se déforme pas trop vite par usure, forgeables pour qu'on puisse en rectifier les ouvertures à coups de marteau.

Les filières allemandes ont la composition suivante : 0,600 à 0,700 pour 100 de carbone; 0,3 à 0,5 pour 100 de manganèse; 0,04 à 0,07 pour 100 de silicium; 0,02 à 0,06 pour 100 de phosphore et 0,02 à 0,06 de soufre.

Cette composition est celle qui concerne la filière du côté utile. Du côté opposé elle est faite en acier doux; c'est-à-dire comptant 0,150 à 0,250 pour 100 de carbone.

Les filières anglaises, elles, sont entièrement en acier dur. Leur composition est la suivante :

0,700 pour 100 de carbone; 0,550 à 0,850 de manganèse et 0,05 pour 100 de silicium. Elles contiennent en outre 2 pour 100 de chrome.

Les filières allemandes, sont obtenues en soudant, par forgeage, des plaques de 10^{mm} d'épaisseur, l'une en acier dur et l'autre en acier doux.

Cette méthode présente l'inconvénient de donner à l'endroit

de la soudure, qui n'est jamais parfaite, des défauts qui peuvent être nuisibles dans l'opération du tréfilage.

Les filières anglaises, au contraire, qui sont uniquement fabriquées avec de l'acier dur, ne présentent pas évidemment cet inconvénient; mais, on a beaucoup de difficulté pour percer les orifices de tréfilage.

L'acier dur employé pour les filières est obtenu soit au creuset, soit au four Martin. Coulé dans une lingotière en fonte, le métal donne un lingot de 55 à 60^{kg} que l'on forge ensuite à 800° pour lui donner la forme nécessaire, et qu'on laisse refroidir ensuite à l'air sans le tremper.

Les filières anglaises contenant du chrome sont très résistantes à l'usure, mais elles sont peu forgeables.

On signale qu'une composition allemande nouvellement brevetée contiendrait une forte proportion de tungstène. Certains auteurs disent connaître des filières comprenant du cérium, du chrome ou du ferro-chrome.

Les aciers manganosiliceux, les aciers au chrome et au silicium donnent de très bonnes filières.

Les filières anglaises au chrome sont excellentes, mais elles ont aussi l'inconvénient d'être très lourdes par rapport au nombre de trous dont elles sont percées. Or, le prix de revient d'une filière doit être calculé par le nombre de trous qu'elle comporte. Mais cet inconvénient est compensé par le fait qu'ayant un grand volume, l'échauffement au passage du fil est moindre. Ceci permet une vitesse plus grande dans l'opération, sans qu'on ait à redouter une trop rapide déformation du trou, de sorte qu'on peut résumer les qualités d'une filière en disant qu'elle doit être épaisse avec des trous rapprochés.

On cite des maisons qui emploient des filières trempées en acier dur ou en fonte et refroidies par circulation d'eau. On n'est pas très renseigné sur la valeur industrielle de ces filières.

Coramment les filières comportent une queue afin de pouvoir les manœuvrer plus aisément. Il n'est pas nécessaire que cette partie soit faite du même métal que la filière elle-même. Un métal

moins coûteux peut convenir. C'est pourquoi on emploie parfois des filières à queue rapportée. Les grosses filières lourdes sont munies fréquemment de deux queues.

Elles sont employées pour travailler des fils du n^o 30 au n^o 21. Elles ont 12 trous et 40 à 45^{mm} d'épaisseur.

Pour aller du n^o 20 au n^o P, on emploie des filières plus petites et percées d'un plus grand nombre de trous.

Il en faut trois pour descendre le fil du n^o 20 au n^o P.

La première va jusqu'au n^o 12, elle est percée de 24 trous. Son épaisseur varie de 35 à 40^{mm}.

Du n^o 13 au n^o P, on emploie des filières beaucoup moins épaisses, 20^{mm}, 25^{mm} conviennent, avec 24 trous et même plus; elles n'ont pas de queue.

Un dispositif avantageux consiste à percer les orifices de telle



Fig. 39.

sorte que le fil traverse la filière, tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre.

On évite ainsi la déformation (*fig. 39*) qui résulte du tapage qu'il faut pratiquer sur le petit orifice de sortie. Mais, elles ont justement l'inconvénient d'être difficiles à rabattre.

Les trous affectent une forme conique dont la grande base, tournée vers l'entrée du fil, prépare l'amincissement.

La figure 40 représente une filière employée dans les tréfileries de fer.

Puis, le cône se modifie; dans certains cas même, l'orifice devient cylindrique; enfin, à la sortie il s'évase très légèrement.

Pour rectifier l'ouverture, le tréfileur emploie un poinçon ou, plutôt, une série de poinçons; ces poinçons sont en acier dur trempé, ils ont une forme conique. Quelquefois, au lieu d'être coniques, ils présentent des pans, c'est-à-dire que la forme géné-

rale est celle d'une longue pyramide, mais leur emploi n'est possible que par des ouvriers très habiles; la section est dans ce cas hexagonale. L'ouvrier tourne l'outil dans l'orifice très adroitement et arrive à donner une forme circulaire parfaitement exacte.

Lorsque les ouvertures sont usées, on les affecte au calibre immédiatement supérieur, en y enfonçant à froid les poinçons dont nous avons parlé; mais ceci n'est appliqué qu'aux filières d'acier spécial, les filières allemandes, faites en acier à outil ordinaire, subissent un calibrage pratiqué à chaud, suivi d'une trempe.

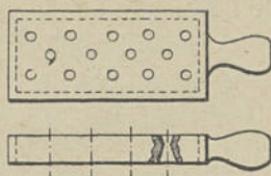


Fig. 40.

Nous avons dit qu'à la sortie l'orifice s'évasait légèrement. Il faut en effet éviter un angle trop vif. Comprimé d'abord dans la partie conique, le fil a tendance à augmenter de diamètre quand il sort de la filière; en laissant un peu de jeu, ce travail de gonflement se produit sans que la face externe de la filière en soit détériorée.

La pente de la génératrice du cône qui forme l'entrée de l'orifice pour du fil d'acier doux est de $\frac{1}{10}$ généralement.

On n'a encore jamais fait d'étude très approfondie sur la détermination de la pente la meilleure à adopter.

Si le profil de la filière a besoin d'être bien précis, et lorsque le trou est large, on le confectionne sur des machines à outils ordinaires, tours, perceuses, etc., avec vérification à la meule; après usure, on retouche de la même façon.

Pour les trous de faible diamètre, on opère de la même manière sans rectification.

Si le profil a une forme compliquée, on procède, pour l'étrépage, par passes successives dont le nombre peut être élevé. Autant que

possible, la même filière portera toutes les ouvertures nécessaires. On retrouve alors la disposition des filières dont nous avons donné le croquis.

Le travail des fils très fins se fait à la filière de diamant, qui donne une grande régularité de diamètre au produit étiré, car l'usure étant très minime, le profil de l'ouverture ne se déforme presque pas. Cette régularité du diamètre, nécessaire dans beaucoup de cas, pour les fils électriques, en particulier, permet l'emploi des machines à tréfiler continues, comme nous le verrons plus loin.

Le diamant est enchâssé dans une bague d'acier, elle-même

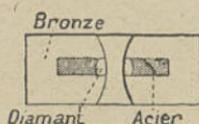


Fig. 41.

assujettie dans une monture de bronze (fig. 41). On évite ainsi la corrosion de l'acier par les substances toujours un peu acides qui enduisent le fil pour le lubrifier. On dépasse rarement le diamètre de $0^{\text{mm}},1625$, mais on descend au-dessous de $0^{\text{mm}},025$. On arrive à une très grande précision dans la confection du trou et l'on obtient couramment une approximation de $0^{\text{mm}},025$. Ainsi, à titre d'exemple, pour transformer un fil de $0^{\text{mm}},182$ en un autre de $0^{\text{mm}},162$, on pratique une seule passe; au-dessous, la série des réductions est la suivante: $0^{\text{mm}},135$; $0,114$; $0,102$; $0,091$; $0,081$; $0,071$; $0,063$; $0,056$; $0,051$; $0,048$. Il n'est sans doute pas utile de dire que les filières en diamant ne servent qu'à étirer les fils fins. Elles s'usent, malgré tout, après un certain temps de service. Voici, dans l'ordre, les métaux qui provoquent le plus l'usure. Tout d'abord l'acier au creuset, employé pour les cordes à piano, puis l'acier doux, l'acier extra-doux, le fer, le nickel, le platine, le bronze, le laiton, le cuivre, l'argent et l'or.

Mais avec un métal ductile, le laiton par exemple, une filière de cette espèce peut durer cinq ou six ans, en travaillant constamment.

Ainsi, M. Henning cite une filière de $0^{\text{mm}},1$ qui aurait étiré $249\,500^{\text{kg}}$ de fil de cuivre.

Nous verrons que certaines machines sont construites de façon à permettre à la monture de diamant de tourner sur elle-même, grâce à des engrenages. On obtient, par un mouvement rapide de rotation de la filière, un produit de diamètre plus régulier encore.

La *Technique moderne* a reproduit une communication de M. Atckins sur l'étirage des fils d'acier. Elle donne les indications suivantes : pour un fil n° 5, jauge de Birmingham étiré en n° 18 de la même jauge, c'est-à-dire de $5^{\text{mm}},58$ à $4^{\text{mm}},19$, la force de traction étant de 700^{kg} , la pression sur l'épaule conique serait de 100^{kg} par millimètre carré, ce qui donnerait par unité de volume du cône comprimé un travail de compression de $2^{\text{kgm}},3$. Le travail de la force d'étirage dans l'exemple considéré serait de $1^{\text{kgm}},3$. Le travail total de réduction du volume serait donc de $3^{\text{kgm}},3$. Le travail réellement exécuté étant 5^{kgm} , le frottement absorberait la différence $1^{\text{kgm}},7$; par suite $31,5$ pour 100 du travail seraient employés à surmonter les résistances passives.

Pour obtenir un bon résultat, il faut que le métal traverse la filière en s'écoulant très uniformément en tous les points de sa section. Le centre ne doit prendre ni avance ni retard par rapport à la périphérie. Si le centre, ce qui arrive quelquefois, prend du retard, la fibre se déchire et le fil présente des défauts internes. Au passage dans la filière, les cristaux qui constituent le métal en travail s'écrasent et en se déformant s'allongent. La section parabolique serait préférable à la section conique, mais elle est très difficile à réaliser. L'écrasement se produirait en effet suivant une loi meilleure.

La réduction de section peut aller jusqu'à 40 pour 100 dans les gros diamètres et 20 pour 100 dans les petits quand il s'agit d'acier doux.

Réduction de la section du fil. — La réduction de la section du fil ne se fait pas d'une façon régulière, suivant les passes. Avec un acier doux Martin, de bonne qualité, pour descendre du n° 30 au

n° 20 de la jauge de Paris, on opère environ 8 passes à la vitesse de 50^m à 100^m, suivant les numéros, la vitesse étant plus grande pour les numéros les plus petits.

Les couronnes de fil varient de poids; elles sont en général pour le fil machine de 50^{kg}. Nous en avons vu de 120^{kg}.

Vers le n° 10, les couronnes devraient avoir conservé le même poids. Mais, en réalité, comme il y a eu des déchets qui peuvent monter à 3 et 4 pour 100, quand il n'y a pas eu d'oxydation ayant amené une rupture du fil au cours du travail, il faut compter 45^{kg} en moyenne pour ce numéro. Dans les numéros plus fins, les pièces sont d'un poids moindre évidemment.

Par exemple, du 10 au 4, elles sont de 20 à 25^{kg} et pour les numéros plus fins encore le poids oscille autour de 10^{kg}; mais cette grande réduction du poids ne provient pas uniquement des pertes: en cours de fabrication, presque inévitablement des ruptures amènent des réductions de longueur des couronnes.

Perfectionnements apportés aux appareils de tréfilerie. — Nous avons dit qu'avant d'introduire le fil dans le trou de filière, il était nécessaire de l'appointer. Ce travail fait au marteau cause une perte de temps. On préfère, dans les installations importantes, employer des machines spéciales qui préparent mécaniquement l'extrémité du fil. Ces machines se composent d'un bâti qui supporte, par l'intermédiaire de deux paliers, un arbre horizontal commandé par des poulies et une courroie; à l'une de ses extrémités et perpendiculairement, est fixé un plateau circulaire qui porte en son centre un trou de 1^{cm} ou 2^{cm} de diamètre.

Sur ce plateau sont disposés suivant des rayons plusieurs coussinets qui peuvent se mouvoir longitudinalement. Comme leur longueur est plus petite que celle du rayon du plateau, le centre peut toujours être dégagé, en les repoussant vers l'extérieur. Un plateau fixe percé également en son centre vient s'appliquer sur le premier qui est mobile comme l'axe qui le porte.

Enfin, une ceinture circulaire, solidaire du plateau fixe, enferme

ce mécanisme; elle est munie d'un certain nombre de saillies intérieures qui jouent le rôle de cames pendant le fonctionnement.

On met l'appareil en mouvement grâce aux poulies folle et fixe et à la courroie, l'axe tourne ainsi que le plateau mobile qui est claveté sur lui (la vitesse est environ de 1800 tours à la minute). Les coussinets, par la force centrifuge, tendent à sortir de l'appareil, en se déplaçant, dans le mouvement relatif, parallèlement à eux-mêmes, c'est-à-dire suivant un rayon. Ils en sont empêchés par la ceinture fixe. Mais les cames de cette dernière renvoient brusquement ces coussinets vers le centre et il se produit un martelage sur le fil qu'on a introduit dans le trou dont les deux plateaux sont percés. Les cames sont disposées (il y en a généralement six) de façon qu'il y en ait toujours deux qui agissent en même temps, mais en sens opposé, c'est-à-dire qu'elles sont sur un même diamètre, de sorte que le fil qu'on enfonce progressivement est martelé très régulièrement. On arrive facilement à obtenir avec un fil de bronze ordinaire n^o 20, une pointe presque parfaitement conique ayant 20^{cm} à 25^{cm} de longueur et dont l'extrémité est extrêmement fine. Dans la pratique, quelques centimètres seront suffisants et la pointe n'aura pas besoin d'être ni aussi régulière, ni aussi ténue.

Lorsque l'ouvrier appointe le fil au marteau, il ne peut le faire que d'une façon grossière et les irrégularités de la pointe fatiguent parfois le trou de la filière. D'autre part, le fil ne se trouve pas ainsi écroui uniformément; la pointe présente des parties faibles, et comme c'est justement en cet endroit que la pince viendra le saisir, à sa sortie de l'ouverture, il arrivera souvent que cette pointe cassera, ce qui obligera l'ouvrier à recommencer l'opération. Nous avons déjà fait cette remarque à propos de l'étirage.

La machine précédente opère plus rapidement et supprime dans une certaine mesure cette rupture de la pointe.

Le fil étant introduit dans la filière, l'ouvrier est obligé, avec une pince, d'amorcer le tréfilage afin qu'il en sorte une longueur suffisante pour qu'il puisse le fixer au tambour.

Il y a là une manœuvre de force assez pénible, surtout lorsqu'il

s'agit de gros fils; on peut l'éviter en adaptant, aux bancs de tréfilerie, un dispositif permettant de réaliser ce qu'on appelle « l'enfilage mécanique ». Voici en quoi il consiste :

Une pince indépendante du tambour vient saisir l'extrémité du fil dès qu'elle sort de la filière. Cette pince est reliée à un mécanisme qui exerce une traction de façon à tréfiler environ 25^{cm} à 30^{cm}. Ceci fait, on sépare le fil de cette pince et on le saisit avec celle du tambour, à un endroit où le diamètre est normal, c'est-à-dire ailleurs qu'à la pointe. Cette dernière peut être coupée dans le cas où étant trop longue elle serait gênante.

On distingue quatre sortes d'appareils :

1^o *Enfilage par levier*. — Le mouvement de la pince est obtenu, dans ce cas, par un levier qu'on actionne à la main, c'est le dispositif le plus employé.

2^o *Enfilage par chaîne*. — L'effort est fourni par une chaîne sans fin constamment en mouvement; on fixe la pince à un maillon, et un débrayage permet d'arrêter la traction. Le retour en arrière se fait à la main évidemment.

3^o *Enfilage par embrayage à griffes*. — L'appareil se compose d'un petit tambour sur lequel vient s'enrouler une chaîne à l'extrémité de laquelle est fixée la pince devant servir pour l'enfilage. Un manchon à griffes permet de faire tourner ce tambour en établissant la liaison entre lui et les arbres de transmission. Enfin une pédale déplace ce manchon dans un sens ou dans l'autre suivant qu'on veut ou non actionner le tambour. Le retour en arrière se fait à la main après avoir dégagé le manchon à griffes.

4^o *Enfilage par l'air comprimé*. — Il est réalisé par de l'air comprimé qu'on envoie dans un cylindre et qui chasse en arrière un piston à la tige duquel est fixée la pince. Comme on admet l'air progressivement, le déplacement se fait sans brusquerie; c'est là un avantage sérieux. Mais il faut disposer d'une source d'air comprimé, d'où une complication d'installation qui ne présente peut-être pas suffisamment d'avantages pour la recommander. Le retour en arrière se fait en ouvrant l'échappement et en admettant la

pression sur l'autre face du piston, ou, plus simplement encore, avec la main, le cylindre étant à l'échappement.

Lorsqu'on regarde fonctionner un banc de tréfilerie, on est surtout frappé de la brusquerie et de la force avec lesquelles l'opération débute. Cette brutalité de l'effort, dangereuse d'ailleurs pour l'ouvrier, s'il n'a pas pris soin de bien assujettir la filière, est mauvaise pour le fil. Il peut se rompre, ce qui, en dehors du retard résultant, présente l'inconvénient de réduire la longueur de la couronne en la partageant en deux tronçons.

Pour éviter cela, on emploie un embrayage par cônes, l'un creux, l'autre plein, entrant l'un dans l'autre et adaptés à l'arbre actionnant le tambour ou encore à celui, horizontal, qui court sous le banc; cette dernière disposition est surtout employée dans les machines à tréfiler multiples que nous étudierons plus loin. Une garniture de cuir adoucit le frottement de ces deux cônes métalliques; une fourchette, mue par un levier, déplace le cône plein suivant la direction de l'arbre, de façon à le mettre en contact avec l'autre, ce qui, après un certain glissement, détermine l'embrayage. Le débrayage se produit par un déplacement en sens inverse. C'est une disposition analogue qui est employée par certains constructeurs de voitures automobiles. Ajoutons que des ressorts agissent sur la fourchette, de sorte que l'appareil est toujours embrayé, sauf lorsqu'on appuie sur la pédale. Souvent, la disposition par cônes est remplacée par une poulie creuse et le contact se fait par des sabots qui viennent s'appliquer sur l'intérieur de la jante.

Au point de vue du rendement, voici quelques renseignements relatifs à un banc de tréfilerie (Crossley) pour gros fils :

| | |
|--|---|
| Vitesse périphérique du tambour, c'est-à-dire vitesse d'étirage.... | 0 ^m , 60 par seconde |
| Puissance | 20 à 25 chevaux |
| Diamètre du fil..... | 13 ^{mm} , 2 |
| Réduction de surface..... | 15 pour 100 |
| Rendement..... | 34 ^{kg} à la minute, soit 6000 ^{kg} par jour en comptant 3 heures de travail continu. |

Les bancs de tréfilerie que nous avons décrits présentent de nombreux inconvénients. Depuis longtemps, on cherchait à les remplacer par des machines perfectionnées, permettant d'obtenir, en une seule opération, une réduction du diamètre, trois, quatre et même huit fois plus grande.

On arrive aujourd'hui à ce résultat au moyen des machines à tréfiler continues, appelées encore « machines à tréfiler multiples ».

Nous avons dit que, pour un métal déterminé, on ne pouvait réaliser une réduction importante du diamètre par une seule passe de tréfilage, la résistance du fil établissant une limite qu'il est impossible de dépasser; le principe ne peut donc pas être modifié; mais si l'on dispose, à la suite les unes des autres, une série de filières dont les ouvertures se réduisent dans des proportions admissibles, la rapidité de l'opération augmentera avec le nombre de ces filières.

L'appareil se composera, par conséquent :

- 1^o D'un dévidoir sur lequel sera placé le fil;
- 2^o D'une première filière;
- 3^o D'un tambour d'entraînement sur lequel le fil fera deux ou trois tours seulement;
- 4^o D'une deuxième filière dont l'ouverture sera plus petite que celle de la précédente;
- 5^o D'un deuxième tambour, etc. La même succession se reproduisant jusqu'à ce qu'on ait obtenu le diamètre demandé, le fil s'enroulant tout entier sur le dernier tambour, comme dans les machines discontinues.

Le principe est donc très simple, mais la réalisation a présenté de nombreuses difficultés, aussi ces machines ont-elles beaucoup tardé à devenir pratiques.

Remarquons, en effet, que toute diminution du diamètre entraîne une augmentation de longueur; par suite, les vitesses, à la sortie des filières, doivent être différentes, sans quoi le fil s'emmêlerait à cause du plus grand débit de l'une par rapport à la suivante. Au contraire, si la vitesse est trop grande, le fil cassera, le débit étant

insuffisant. Pour réaliser ces différences des vitesses de passage, il y a deux moyens qui sont tous les deux appliqués :

1^o Toutes les poulies d'entraînement (ou tambours, comme on voudra) ont même diamètre, mais leurs vitesses de rotation sont différentes;

2^o Toutes ces poulies ont même vitesse angulaire, mais leurs diamètres sont différents.

Il n'y avait pas là une bien grosse difficulté, car il était facile de déterminer l'allongement du fil correspondant à une réduction donnée, mais ce qu'il fallait obtenir, c'était que cet allongement restât toujours le même pour une même filière.

M. Gibbs, dans *The Iron Age* (1907), émettait l'opinion que la nature du métal de la poulie d'entraînement jouait un rôle très important, que les énormes difficultés rencontrées dans la création de ces machines résultaient presque uniquement de cette considération, qu'une matière dure avait donné de mauvais résultats et qu'il fallait employer des tambours de bronze. Nous croyons, au contraire, que la perfection des filières est la seule clef de la solution. D'ailleurs, il existe un grand nombre de machines à tréfiler multiples dont les poulies sont en acier ou en fonte trempée. Nous devons dire cependant que, pour les fils très fins, ces poulies doivent être parfaitement construites et même polies sur la partie qui est en contact avec le fil, une rugosité pourrait, multipliée par le nombre de tours, amener une augmentation notable du débit total au bout d'un certain temps de tréfilage d'une même couronne et entraînerait la rupture.

Quels sont les avantages de ces machines ?

D'abord la grande rapidité, car on évite les multiples manipulations nécessitées par les appareils anciens. Celles-ci étant moins nombreuses, on peut employer des couronnes de fil plus lourdes, par conséquent augmenter encore le rendement. D'autre part, le travail est mieux fait. Sur les bancs ordinaires, on se sert du même tambour, c'est-à-dire de la même vitesse d'étirage pour un grand nombre de diamètres, on change simplement la filière. Dans

ces machines, au contraire, à chaque filière correspond un tambour, par suite, une vitesse appropriée. Enfin, l'encombrement est moindre et un même ouvrier peut mener plusieurs machines, ce qui réduit considérablement la main-d'œuvre.

En Amérique, il existe des usines où ce travail est confié à des femmes. Il n'y a pas, en effet, besoin d'un apprentissage spécial; la pointe est toute préparée par une machine analogue à celle que nous avons décrite. Il n'y a qu'à placer la botte sur le dévidoir. L'enfilage est mécanique, par suite aisé; d'ailleurs, il peut être fait par un homme chargé exclusivement de cette besogne, cela lui est d'autant plus facile que la durée des passes, sur une même machine, est longue, car elle correspond au tréfilage du plus petit diamètre. Les femmes ne s'occupent que de la surveillance et du graissage.

On a construit, à Buffalo, une installation comportant plus de 300 machines de ce genre et qui sont conduites par des femmes; le courant électrique, fourni par la chute du Niagara, actionne toute l'usine.

Les machines à tréfiler multiples ne conviennent pas dans tous les cas. Pour les gros fils, en particulier, leur emploi doit être à peu près complètement repoussé. En effet, la botte n'a pas une grande longueur, elle a tout de suite traversé la machine; on ne tire donc absolument aucun profit de cette rapidité, l'ouvrier ne pouvant conduire plusieurs appareils à la fois.

On admet généralement qu'au-dessus de 2^{mm} de diamètre, il est préférable d'employer les machines discontinues, c'est-à-dire celles qui ne comportent qu'une seule passe par opération.

Au-dessous de 2^{mm} jusqu'à 0^{mm},5, les machines continues sont recommandées.

Enfin, pour les fils très fins, inférieurs à 0^{mm},5, les machines continues deviennent d'un usage nécessaire. Elles sont munies de filières en diamant. Ces filières sont refroidies par un liquide que l'on fait couler sur elles pendant l'opération; nous en verrons un exemple à propos des fils de cuivre. Souvent, on adjoint un dispositif qui permet à la filière de tourner sur son axe assez rapidement;

de cette façon, l'usure est plus régulière et le fil est mieux fait. A la suite de ces machines produisant les fils très fins, il est nécessaire d'adjoindre un dispositif de dressage, car on a remarqué que les bottes, après travail, avaient tendance à se mettre en huit, c'est-à-dire à se recourber sur elles-mêmes et à provoquer un emmêlement du fil. Le dressage se faisait souvent par des clous plantés dans une planche tout simplement et entre lesquels le fil serpentait, mais il ne sortait plus très rond, il s'aplatissait dans ce contact. On emploie, aujourd'hui, des galets qui permettent d'éviter cet inconvénient.

Une dernière remarque à faire sur ces machines, c'est qu'elles ne présentent de grands avantages que pour les métaux qui ne s'érouissent pas trop rapidement. En effet, s'il fallait procéder à un recuit, il empêcherait de faire à la suite les unes des autres, sur une même machine, un grand nombre de passes. L'acier extradoux, le cuivre, le laiton (composition, 67 pour 100 de cuivre et 33 pour 100 de zinc) seront tréfilés avantageusement par ces machines. Cette remarque fait comprendre, en outre, que les bancs établis pour l'un de ces métaux ne conviennent pas toujours à un autre, car les vitesses d'étirage doivent être modifiées ainsi que le nombre des recuits.

On peut considérer deux sortes de machines :

- 1^o Celles du type linéaire;
- 2^o Celles que nous appellerons « circulaires ».

Les premières sont réservées aux numéros moyens, les autres conviennent aux fils fins.

1^o *Machines à tréfiler multiples du type linéaire.* — Nous ne donnerons ici que les principes; nous décrirons quelques-unes de ces machines à propos de la fabrication des fils de laiton dont nous nous occuperons plus loin.

Les filières sont toutes disposées en ligne droite, à la suite les unes des autres, de sorte que le banc a une assez grande longueur.

Entre chaque filière se trouve une poulie d'entraînement; à l'entrée est placé un dévidoir, à la sortie un tambour.

On trouve trois dispositifs :

- 1^o Tous les axes des poulies et des tambours sont verticaux;
- 2^o Tous ces axes sont horizontaux;
- 3^o Certains d'entre eux sont verticaux et les autres horizontaux.

Un dispositif permet de réaliser l'enfilage mécaniquement. Il se compose d'une tige placée dans le sens de la longueur du banc et qui peut coulisser au moyen d'un levier que l'ouvrier manœuvre à la main ou au pied, ou encore par embrayage spécial, comme nous l'avons indiqué plus haut. A chaque filière correspond, sur cette tige, un crochet sur lequel on fixe la pince qui saisit l'extrémité du fil. Un embrayage par frottement est toujours prévu dans ces machines, pour mettre les tambours en mouvement.

2^o *Machines à tréfiler multiples du type circulaire.* — Pour les fils fins, qui peuvent facilement circuler sur des poulies de petit diamètre, il est aisé de réduire les dimensions des appareils, car c'est là un inconvénient des machines précédentes. Le principe est le même, mais les différentes parties du mécanisme, au lieu d'être disposées en ligne droite, sont rapprochées de manière à diminuer l'encombrement; le fil est alors obligé de suivre un parcours plus compliqué, parcours qui lui est imposé par des galets supplémentaires qu'on ne trouve pas dans les types précédents. On peut dire que, généralement, les poulies et les tambours ont leurs axes disposés verticalement. Quelquefois, ils sont un peu inclinés, de façon que la surface du banc qui leur est toujours perpendiculaire étant en pente, les poulies sont immergées, à la partie basse formant cuvette, dans un liquide gras (*fig. 42*).

On retrouve tous les accessoires des autres machines, embrayage, dispositif d'enfilage, frein, etc. Mais tous ces organes ont une douceur plus grande dans leur action, à cause de la délicatesse du produit à travailler.

Les surfaces des poulies d'entraînement, sur lesquelles les fils s'enroulent, sont parfois creusées d'une gorge large qui maintient le fil, mais cela présente un inconvénient à cause du frottement de ce fil sur lui-même. On préfère la jante plate, composée d'une bande d'acier trempé et qui peut être rapidement enlevée et remplacée. La maison Gerhardt (Ludenscheid, Westphalie) fabrique

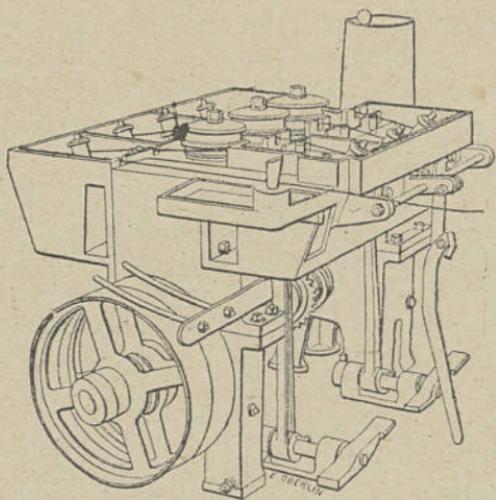


Fig. 42.

même des machines dont la jante des poulies d'entraînement a une largeur plus grande qu'il n'est utile; le fil s'enroule sur une moitié seulement de la hauteur, puis, lorsqu'il y a usure, on enlève cette jante, on la retourne bout pour bout, et c'est la partie usée qui devient inutilisée.

Les machines que nous venons de citer ont encore une autre particularité. Il n'est pas nécessaire d'attendre la fin de l'opération pour préparer la suivante, de sorte qu'au moment où toute la botte a passé dans la machine, celle-ci est toute prête à repartir sans qu'il y ait eu pour ainsi dire d'interruption. Pour en finir avec ces machines (*fig. 42*), nous dirons que les poulies sont dis-

posées de façon que, par le chemin même suivi par le fil, il y ait dressage et qu'il ne soit pas nécessaire d'ajouter à la machine un mécanisme dans ce but.

Une remarque est à faire à propos du graissage. Nous avons dit qu'il était obtenu, dans beaucoup de machines, par l'immersion des galets dans le liquide lubrifiant, mais il faut que les poulies d'entraînement soient disposées de façon à n'être pas mouillées par lui, car cela déterminerait un glissement du fil sur la poulie et par suite la rupture. Cette condition est facile à réaliser, puisque le fil sort à peu près sec de la filière.

Le refroidissement des filières est assuré par une circulation de liquide au moyen d'une pompe actionnée par la machine elle-même.

On voit que tous les organes sont très ramassés, par suite, l'encombrement est réduit. La disposition verticale des axes des poulies et galets facilite la surveillance et le graissage.

Voici, pour les rendements, quelques chiffres qui sont des résultats moyens fournis par divers types, ils varient évidemment avec ceux-ci, avec le métal à travailler et aussi avec l'habileté de l'ouvrier :

Fils de cuivre.

| Diamètre en millimètres | | Débit en kilogrammes par heure. | Nombre de machines conduites par un ouvrier. | Force en chevaux. |
|----------------------------|--------|--|--|-------------------------|
| initial. | final. | | | |
| 3,6 | 1,30 | 41 | 2 | 5 |
| 3 | 1,08 | 30 | | |
| 2,5 | 0,90 | 24 | | |
| 2 | 0,75 | 17 | 3 | 3 |
| 1,7 | 0,65 | 14 | | |
| 1,6 | 0,62 | 13 | 5 | 2 |
| 1,4 | 0,55 | 12 | | |
| 1,3 | 0,50 | 10 | | |
| 1,2 | 0,45 | 9 | 7 | 1 |
| 1 | 0,37 | 6 | | |
| 0,85 | 0,32 | 5 | | |
| 0,80 | 0,10 | 0,4 | 12 | 0,75 |
| 0,60 | 0,07 | 0,3 | | |
| 0,40 | 0,05 | 0,15 | | |

Fils d'acier.

| Nombre des passes. | Diamètre | | Nombre de tours du tambour. | Nombre de machines conduites par un ouvrier. | Pro- duction en 10 heures. | Force en cheveau . | |
|--------------------------|-------------------|-----------------|--------------------------------------|---|-------------------------------------|--------------------------|----------|
| | initial en mm. | final en mm. | | | | | |
| 5... | 2,12 | 1,65 | 305 | 40 | 4 | 295 | 2,0 à 3 |
| 7... | 1,83 | 0,81 | 305 | 50 | 5 | 115 | 1,5 à 2 |
| 7... | 1,25 | 0,5 | 254 | 60 | 4 | 40 | 0,75 à 1 |
| 7... | 0,5 | 0,2 | 203 | 75 | 12 | 9 | 0,5 |

Recuit. — Le fil, après plusieurs passages dans la filière, est fortement écroui. Cet état ne lui permet pas de subir certaines transformations, il faut le recuire. Une étude préalable permet de fixer le moment où doit être faite cette opération.

Par exemple, pour tirer du fil machine des fils fins, un recuit intermédiaire est nécessaire. On le pratique sur le n° 12; on pourra ensuite descendre jusqu'aux fins numéros.

Si l'on doit s'arrêter au n° 5, ce recuit intermédiaire n'est pas indispensable. Naturellement nous n'envisagerons que le cas d'un bon fil machine en acier extra-doux.

Parfois une passe suivra après le recuit, donnant un léger écrouissage au fil, par exemple pour la fabrication des semences, des rivets, etc. Le commerce demande du fil recuit, du fil galvanisé sur recuit; les clous en fil d'acier proviennent de fils recuits. Enfin, il est une foule de cas où le fil clair ne peut être directement employé.

Comme nous l'avons expliqué, une température de 925°, enlèvera tout écrouissage aux fils en acier extra-doux : 850° pour l'acier demi-dur, 875° à 900° pour l'acier doux.

Nous savons en effet que le carbone abaisse le point de transformation; la température du recuit devra donc être fixée d'après la nature de l'acier.

La température sera suivie dans les fours au moyen de pyromètre.

D'autres points sont à fixer : le temps de recuit (nous en avons déjà parlé), la vitesse de refroidissement.

Dans la pratique, il suffit de porter d'une façon certaine toute la masse à la température de recuit et de la laisser refroidir lentement à l'abri de l'air.

FOURS. — Les fours comportent généralement une seule cuve chauffée par en dessous. La cuve est soulevée par un appareil de levage quelconque, déposée à terre et vidée. Quelquefois la cuve est fixe. Le four est disposé dans certains cas de telle sorte qu'une cuve vide se réchauffe au passage des fumées du foyer vers la cheminée; on la remplit, puis avec un palan on lui fait prendre la place de celle qu'on doit vider, laquelle se trouve directement sur le foyer; on utilise ainsi quelque peu des chaleurs perdues.

La consommation de charbon dans des fours de ce genre atteint, avec un combustible de bonne qualité, environ 15 à 20 pour 100 de la masse chauffée. On voit l'intérêt qu'il y a à ne pas employer des cuves épaisses, cependant la question de durée et de fragilité intervient. Divers systèmes de chauffage sont en usage. Il est à peine utile de dire que le chauffage au gaz de gazogène, avec récupération des chaleurs perdues, est le meilleur.

On obtient un rendement supérieur avec des cuves multiples (trois cuves par four) chauffées par un seul foyer; il y a en effet moins de déperdition que dans le cas du chauffage par cuve isolée et la température peut cependant être à peu près également épartie.

CUVES. — Quand les fours sont suffisamment refroidis, on sort les couronnes de fils; il faut, par économie de combustible, vider les cuves à la température la plus élevée possible, pour ne pas perdre la chaleur emmagasinée dans le métal des récipients et n'avoir par conséquent pas à réchauffer ceux-ci dans l'opération suivante.

Les cuves sont en fonte, en acier coulé ou encore en acier embouti.

En fonte on doit leur donner une certaine épaisseur, leur poids est plus grand; la masse morte inutile à réchauffer dépasse parfois le double de la masse utile, c'est-à-dire celle de la charge du fil, d'où perte de combustible. Elles sont cylindriques, peuvent contenir un chargement d'une tonne environ et, suivant leur qualité, supporter 700 à 800 opérations.

Les cuves sont fermées par un couvercle, mais on n'empêche pas l'oxydation, le fil en effet sort noir. Si l'on veut éviter cette oxydation, par exemple pour faire une économie de décapage, il faut procéder au recuit en atmosphère réductrice. Il suffit d'introduire dans la cuve un agent réducteur, de la tournure de fonte grise du charbon de bois, etc. Il faut évidemment empêcher toute rentrée d'air pour obtenir un produit bien blanc susceptible d'être tréfilé sans décapage. Le couvercle doit donc être parfaitement luté avec de la glaise. On emploie parfois dans ce but des cuves à double couvercle, le premier ne fermant pas parfaitement et servant à supporter le corps réducteur.

En vidant les cuves on constate, pour les fils fins, surtout si les couronnes ont été très serrées les unes contre les autres, des irrégularités d'oxydation; or, pour le commerce, le fil recuit doit avoir une teinte noire uniforme. Pour remédier à cet inconvénient, il est nécessaire de laisser librement circuler l'air entre les couronnes.

La Société des Tréfileries du Havre a pris en 1918 un brevet pour une méthode de recuit des fils. Cette méthode présente un intérêt lorsque, pour obtenir des réductions importantes de diamètres, on est obligé de procéder à des recuits à températures très précises.

Les bottes de fils sont soumises à l'action d'un bain de soude en fusion. De semblables bains peuvent être maintenus aisément à une température à peu près fixe. La couche de soude se solidifie et, recouvrant le fil à sa sortie du bain, elle protège le métal contre l'oxydation ultérieure; cette couche disparaît par un simple lavage.

Pour les fils fins on préfère les placer dans des pots eux-mêmes plongés dans les bains de soude.

Ce procédé s'applique évidemment au recuit de toutes pièces métalliques; il suffit de déterminer la température du recuit et de composer un bain d'alcali caustique dont le point de fusion corresponde à cette température.

Echelonnage des réductions de diamètre et modification de la résistance du métal. — Pour du fil de 40^{kg} de charge de rupture, en bon acier Martin, on peut admettre les réductions suivantes :

| Nombre de passes. | Numéro du fil. | Diamètre | | Différence. |
|--------------------------|----------------------|--------------------|--------------------|-------------|
| | | avant la passe. | après la passe. | |
| 1 ^{re} passe... | machine n° 22 | 54/10 | 45/10 | 9/10 |
| 2 ^e » ... | | 45/10 | 39/10 | 6/10 |
| 3 ^e » ... | n° 19 | 39/10 | 34/10 | 5/10 |
| 4 ^e » ... | n° 18 | 34/10 | 29/10 | 5/10 |
| 5 ^e » ... | | 29/10 | 24/10 | 5/10 |
| 6 ^e » ... | n° 15 | 24/10 | 20/10 | 4/10 |
| 7 ^e » ... | n° 13 | 20/10 | 16/10 | 4/10 |
| 8 ^e » ... | n° 11 | 16/10 | 14/10 | 2/10 |

Ces opérations, par suite de l'écroissage qu'elles déterminent, modifient la résistance du métal.

Ainsi le fil machine n° 21 de 49/10 de diamètre présente une charge de rupture de 45^{kg} par millimètre carré.

Après un premier passage qui le fait descendre du n° 21 au n° 20 (49/10 à 44/10), la charge de rupture monte à 59^{kg} par millimètre carré.

Après le deuxième passage (du n° 20 au n° 19, soit de 44/10 à 39/10), R = 67^{kg}.

Après le troisième passage (du n° 19 au n° 18, soit de 39/10 à 34/10), R = 73^{kg}.

Enfin, après le quatrième passage (du n° 18 au n° 17, soit de 34/10 à 30/10), R = 76^{kg},500.

Voici d'autre part le résumé de plus de 200 essais entrepris sur un acier Martin ayant la composition suivante :

| | | |
|----------------|-------|----------|
| Carbone..... | 0,09 | pour 100 |
| Manganèse..... | 0,56 | » |
| Soufre..... | 0,16 | » |
| Phosphore..... | 0,034 | » |
| Silicium..... | 0,057 | » |

| Numéros des essais. | Passes. | Diamètres. | Sans recuit. | | Après recuit. | |
|---------------------------|-------------|------------|------------------|------|------------------|------|
| | | | R. | A %. | R. | A %. |
| 1..... | fil machine | 5,3 | 37 ^{kg} | 29 | 37 ^{kg} | 29 |
| 2..... | 1 passe | 4,3 | 54,63 | 5 | 37 | 29 |
| 3..... | 2 passes | 3,7 | 64,71 | 3 | 37 | 29 |
| 4..... | 3 passes | 3,2 | 69,55 | 2 | 37 | 29 |
| 5..... | 4 passes | 2,8 | 74,79 | 1,5 | 37 | 29 |
| 6..... | 5 passes | 2,4 | 80 | 1 | 38 | 28 |
| 7..... | 6 passes | 2 | 85 | 0,5 | 43 | 24 |

On remarque qu'après recuit le métal reprend ses qualités primitives, sauf pour l'échantillon n° 7, qui présente une anomalie, sans doute parce que le recuit n'a pas été fait dans de bonnes conditions.

Un autre point intéressant à noter. Le recuit n'étant pas pratiqué, on voit que la résistance à la rupture augmente considérablement en même temps que diminue le pourcentage de l'allongement, au fur et à mesure que le fil subit des passes nouvelles. Dans ces conditions, l'acier devient fragile; il faudrait le travailler sans chocs pour éviter des ruptures. Un démarrage progressif serait donc à recommander. Il n'est pas réalisé dans les ateliers généralement, l'entraînement se fait très brusquement. Il y aurait de ce côté, à notre avis, des améliorations à apporter dans la construction des bancs de tréfilerie. En cours de travail, d'autre part, des variations brusques de l'effort sont, pour la même raison, dangereuses. Il faut donc veiller à la sensibilité des régulateurs de distribution de la force motrice, que celle-ci provienne d'une chute d'eau ou d'un moteur quelconque.

Essais pratiques sur des câbles d'acier.

| | Résistance des fils clairs par millimètre carré de section | | Nombre moyen de pliages entre mâchoires arrondies de 10 ^{mm} de rayon. | |
|--------------------------------------|--|-----------------------|--|--------|
| | avant câblage. | après câblage. | N° 18. | N° 13. |
| Métal doux..... | 63 à 75 ^{kg} | 55 à 75 ^{kg} | 19 | 14 |
| Qualité ordinaire... | 85 à 95 | 75 à 85 | 19 | 14 |
| Grande résistance... | 130 à 140 | 115 à 125 | 20 | 18 |
| Qualité supérieure.. | 150 à 160 | 135 à 145 | 24 | 21 |
| Qualité extra - supé- rieure..... | 210 à 225 | 195 à 205 | 30 | 23 |

La galvanisation détermine une diminution de la résistance des fils; elle peut atteindre 10 pour 100.

Résistance et malléabilité des fils d'acier. — Considérons un morceau de fil d'acier doux, du fil machine, par exemple, auquel on a donné la forme indiquée par la figure 43.

A froid le métal offre une résistance à la traction d'environ 40^{kg}

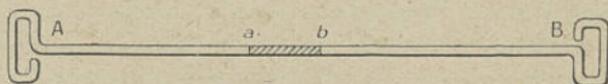


Fig. 43.

par millimètre. Chauffons en son milieu une longueur *ab* au rouge sombre et tordons la pièce. Les parties *A* et *B* ne subissent aucune torsion; seule la portion *ab* est tordue, l'effort est minime, et il faut un grand nombre de tours pour amener la rupture. Cette expérience conduit M. Seigle à la conclusion suivante : à chaud la résistance est faible et la malléabilité est grande. Si l'on chauffe la portion *ab* non plus au rouge, mais au bleu, la torsion est toujours localisée; la rupture se produit dans cette région également, mais

après un nombre de tours assez petit. Il y a donc une résistance plus faible en *ab* que dans le reste de la tige et une malléabilité moindre au bleu qu'au rouge. Pour bien se rendre compte de la torsion, il suffit de tracer sur le fil, tout le long d'une génératrice, un trait à la lime. La torsion se manifeste plus aisée à partir de 100°.

Pour l'acier dur, à 75^{kg} ou 80^{kg}, on ne constate pas de différence entre les parties chauffées au jaune (250°) et les autres parties.

Les mêmes phénomènes se retrouvent sur le fil machine chauffé et essayé à la traction. En chauffant au jaune de l'acier doux avant de commencer la traction et pendant la traction, la rupture se produit toujours dans la partie froide; les allongements constatés par une mesure directe de la distance séparant des repères préalablement tracés sont plus forts dans la partie froide.

Ainsi, entre 200° et 300°, l'acier accuse une augmentation de sa résistance qui passe de 35^{kg} à 50^{kg} et, pour des températures supérieures, une diminution; les allongements et la limite élastique suivent des variations analogues.

Métaux employés pour l'étirage. — 1° Acier doux (nous en avons donné la composition);

2° Acier dur susceptible de prendre la trempe.

Le fer puddlé est rarement employé. En tréfilerie, il a été remplacé par l'acier. Les impuretés ont de l'influence sur les opérations de l'érouissage. C'est en effet une opération très sévère que l'on fait subir aux métaux et le moindre défaut provenant du laminage est révélé.

Le carbone à l'état combiné ne constitue pas une impureté. Cependant, comme un excès donne une grande dureté au métal, s'il n'est pas uniformément réparti dans la masse, l'homogénéité au point de vue de la résistance manque.

Dans l'acier dur, la ségrégation du carbone au centre du fil en provoque parfois la rupture. Le soufre donne aussi des ennuis. Cette impureté provoque la fragilité; en outre, au décapage, il

se produit une dissolution du sulfure dans l'acide, ce qui détermine des cavités où l'acide reste logé; le fil se tache et il perd son bel aspect que l'on recherche; d'ailleurs cette inclusion du sulfure sert de point de départ à l'oxydation. Le phosphore, on le sait, à l'état de phosphure de fer, présente les plus grands inconvénients. Il détermine la fragilité quand il se trouve dans les fils, par la formation de parties dures qui rendent le produit susceptible de se déchirer pendant le tréfilage. Le manganèse durcit l'acier. Il lui donne une plus grande résistance; mais le fil qui en compte des quantités notables doit être très surveillé, pendant les traitements thermiques. Le nickel permet de faire les mêmes remarques. Le cuivre est nuisible et il rend le fil, surtout dans les petits diamètres, fragile. L'aluminium se rencontre à l'état d'alumine, substance très dure qui détériore rapidement les filières. Le fil alors a un calibre plus fort à une extrémité qu'à l'autre.

L'oxygène présente évidemment de très gros inconvénients, puisque les particules d'oxyde forment des solutions de continuité, usent les trous de la filière et donnent des taches si l'on veut étamer ou galvaniser le produit. Ces particules servent du reste de point de départ pour la corrosion.

Essais mécaniques des fils d'acier. — Il a été publié, par M. Fremont, en 1921, sur les essais mécaniques des fils d'acier, un travail que nous allons résumer, car il présente un très réel intérêt.

L'essai de traction du fil d'acier s'effectue depuis longue date, et Réaumur, il y a deux siècles, en a appliqué la méthode; mais il n'est devenu d'une pratique courante qu'à partir de l'emploi du fil de fer dans les constructions des ponts suspendus. Il faut, en effet, pour ces constructions être très renseigné sur la résistance des fils, afin de pouvoir calculer exactement les charges que ces ponts seront capables de supporter. Les premiers essais sérieux sont dus au lieutenant-colonel du génie Dufour, en 1820, à l'occasion de la construction du pont suspendu de Saint-Antoine, à Genève. Ces expériences portèrent sur des essais à la traction à des températures différentes, simples essais de rupture, sous charge directe; il n'était

pas question alors d'allongement, ni de limite élastique et la conclusion de Dufour fut que les différences de résistance constatées devaient être attribuées aux irrégularités de l'agrégation des molécules du métal plutôt qu'à une influence de la température; on opérerait très rudimentairement.

Ainsi, en 1823, en vue d'un projet de pont suspendu sur le Rhône entre Tain et Tournon, Séguin d'Annonay mesurait approximativement l'effort à l'aide d'une charpente portant un bras de levier muni d'un poids mobile; néanmoins un graphique était tracé un peu comparable à celui des diagrammes qui, automatiquement, s'inscrivent sur les machines de nos laboratoires actuels. Depuis un siècle l'essai à la traction est le seul qui soit appliqué à la réception des fils de fer. Des essais de torsion et de traction combinés ont été proposés, mais il ne donnent pas de résultats différents des précédents.

Pour déceler la fragilité, on a effectué des essais de traction par choc; les résultats ont été les mêmes que ceux obtenus par traction statique. Le cahier des charges de l'aéronautique, dont les conditions de réception doivent être des plus sévères, impose l'essai à traction pour les fils quel qu'en soit le diamètre; en outre, une mesure de l'allongement doit être faite pour les fils d'un diamètre supérieur à 3^{mm}. On ne prévoit, en aucun cas, la spécification de la limite élastique, ce qui est très justement critiqué. Comme le fait remarquer M. Frémont, deux fils ayant même résistance à la rupture peuvent avoir des limites d'élasticité très différentes, de sorte que, montés sur un appareil d'aviation et subissant la même tension, l'un s'allongera et se détendra prématurément, tandis que l'autre ne subira aucune déformation. Les Compagnies de chemins de fer, pour les fils d'acier servant à manœuvrer les signaux, exigent une limite d'élasticité déterminée.

Pour la même raison, ils ne doivent pas s'allonger sensiblement sans quoi la position des signaux pourrait devenir douteuse. Dans l'aéronautique on impose en outre des essais de flexion, pour mesurer la ductilité du métal, mais, pour les diamètres supérieurs à 5^{mm}, cet essai est remplacé par un essai de coudage, plus facile à

réaliser. Enfin, on impose un essai d'enroulement qui a pour but de vérifier le degré d'adhérence de la couche de zinc, puisque l'on emploie des fils galvanisés. Cet essai ne donne pas des indications très probantes, car le métal parfois se crique et, en tout cas, les mesures ne sont pas précises. Dans tous les essais de flexions alternées, il faut tenir compte du serrage du fil, du rayon de la courbure, de la tension, de la rapidité de l'opération; pour éliminer tous ces facteurs, on doit employer des machines spéciales, réalisant toujours les mêmes conditions dans la pratique de l'essai.

Et, malgré tout, si l'on se trouve ainsi renseigné sur la ductilité du métal, on ne sait rien de sa fragilité.

M. Frémont a montré que si des ruptures intempestives se produisaient, qu'on attribuait souvent à la fatigue du métal, elles n'étaient dues réellement qu'à des impuretés qui s'y trouvaient contenues ou à la retassure. Aussi a-t-il préconisé la méthode d'essai au choc sur fil entaillé pour apprécier justement ce degré de fragilité.

Il est curieux de constater, dans les fils avariés, comme d'ailleurs dans les barres d'acier laminé, que le métal sain, considéré au voisinage de la retassure, est d'une qualité très supérieure à la qualité moyenne de la barre ou du fil, même après en avoir enlevé toute la partie affectée par la retassure.

Dans les essais de pliages successifs, c'est la périphérie du fil qui travaille le plus, la partie centrale étant la fibre neutre; en service le fil travaille dans son ensemble; ces essais ne rappellent donc pas la réalité.

L'essai au choc, au contraire, se rapproche beaucoup mieux des conditions de travail du métal, mais on sait que si l'éprouvette n'est pas entaillée dans les essais au choc, la fragilité du métal n'est pas forcément révélée.

Si le centre est contaminé et la périphérie saine, l'entaille dans l'éprouvette doit atteindre la partie mauvaise, sans quoi la couche saine sera une protection, comme dans les essais de pliages alternés.

M. Frémont cite un fil qui ne s'est pas rompu au choc, quoique le métal fut fragile, quand l'éprouvette n'était pas entaillée et

qui, au contraire, s'est rompu brusquement avec une petite déformation et une minime dépense de travail, l'éprouvette ayant été cette fois entaillée.

La deuxième expérience démontrait la fragilité du métal non prouvée par la première et la nécessité d'entailler l'éprouvette.

A propos des impuretés, nous dirons qu'elles ont pour conséquence de faciliter l'oxydation du métal.

Cette oxydation se propage du point où l'impureté affleure à la surface, jusqu'à l'intérieur, en gagnant l'impureté la plus proche et creusant ainsi des galeries d'oxydation; c'est un phénomène qu'on observe en particulier sur des fils exposés à l'air humide ou à des fumées dans les tunnels.

Ces impuretés constituent donc un double danger puisqu'elles diminuent la résistance du métal et qu'elles facilitent la propagation de l'oxydation.

Quelles conditions de réception doit-on imposer à des fils d'acier? Elles dépendent évidemment de l'usage auquel ils sont destinés. Si la qualité du fil n'a pas une grosse importance, ou si la résistance du métal peut présenter une certaine marge, un essai de dureté suffit. Dans le cas où la bonne qualité est exigée, par exemple pour les fils de signaux de chemins de fer, d'avions, de câbles, etc., il serait bon de procéder aux trois essais suivants :

1^o Essai de corrosion qui fixera sur la pureté du métal;

2^o Essai de cisaillement qui, remplaçant l'essai de traction, donne la limite d'élasticité et la résistance à la rupture;

3^o Essai au choc sur éprouvette entaillée qui fixera sur la fragilité.

Essai de dureté. — On peut procéder par comparaison avec un fil étalon dont la dureté est connue. Un moyen très pratique consiste à placer en croix, dans les mâchoires d'une pince, le fil à essayer et le fil modèle; le plus dur forme une empreinte dans le plus mou.

Il est plus précis de produire sur une génératrice du fil à essayer

une empreinte avec une molette circulaire de 60^{mm} de diamètre, présentant un angle au tranchant de 90°, et s'appliquant sous une pression de 50^{kg} (Congrès des méthodes d'essais de New-York, 1912).

Essai de corrosion. — Deux méthodes sont à recommander suivant qu'on opère dans l'atelier ou dans le laboratoire :

Dans l'atelier, on examinera l'échantillon poli au papier émeri et attaqué avec un réactif approprié; au besoin on pourra s'aider d'une loupe; c'est l'examen macroscopique.

Un ouvrier dressé peut l'effectuer très rapidement et très simplement. Il est mieux de couper le fil obliquement, à la scie pour les gros fils, à la lime pour les petits; cette coupe biaise est d'un examen plus aisé.

Une meule à grain fin polit la section; on opère de préférence une série de polissages de plus en plus fins et, pour finir, on attaque par le réactif iodé comprenant de l'iode sublimé, de l'iodure de potassium et de l'eau dans la proportion de 1^g, 2^g et 10^g.

Ce réactif est appliqué avec un pinceau et l'image apparaît au bout de quelques instants. Elle est suffisante pour donner un renseignement, mais l'oxydation la ternit rapidement.

Si l'on voulait conserver cette image, il faudrait en prendre un cliché photographique, en maintenant la face à examiner sous l'eau pendant la pose.

Par une attaque plus lente, on obtient une gravure profonde et par suite durable; on élimine ainsi l'inconvénient signalé plus haut.

Pour cette attaque lente, on emploie le même réactif iodé; mais au lieu de l'appliquer au pinceau, on plonge la surface à examiner dans le liquide pendant 2 heures environ.

Il faut avoir soin d'agiter ce réactif légèrement de temps en temps pour que l'attaque donne tous les détails qui, d'ailleurs, ne sont pas absolument nécessaires, puisqu'il s'agit de savoir simplement si le fil est peu ou beaucoup contaminé par la ségrégation du métal.

Parfois on se contente d'employer l'acide sulfurique du commerce étendu de 5 parties d'eau.

Des essais pratiqués de la sorte ne permettent pas d'apprécier quantitativement la qualité du fer ou de l'acier; ils attirent seulement l'attention sur l'hétérogénéité du métal.

Dans les laboratoires, la coupe du fil est examinée au microscope.

Pour manier plus aisément l'échantillon, on l'encastre dans un prisme d'acier; on peut ainsi le tenir dans les doigts pour le polissage au papier d'émeri de grains de plus en plus fins, le travail étant terminé par le polissage sur du drap enduit d'alumine.

L'attaque se fait dans les conditions décrites plus haut.

Essai de cisaillement. — Autrefois, pour déterminer la limite élastique, on pratiquait la traction; on y renonce, car cette méthode ne donne pas habituellement des résultats d'une exactitude suffisante, quand il s'agit de fil d'acier. C'est pourquoi on est venu aux essais de cisaillement.

Ils s'effectuent au moyen d'une machine spéciale qui est en somme une machine à traction modifiée en conséquence. En cisillant successivement un fil à examiner et un fil étalon de même diamètre, on peut par comparaison fixer la limite élastique et la résistance à la rupture.

Il existe d'ailleurs des relations entre les limites d'élasticité au cisaillement et à la traction et aussi entre la résistance au cisaillement et celle à la traction.

M. Frémont a trouvé, à la suite de nombreuses expériences, que la résistance à la rupture par cisaillement : $C = 8^{kg} + 0,45 T$ T étant la résistance à la rupture par traction.

La limite d'élasticité au cisaillement est considérée comme égale à 0,6 de la limite d'élasticité à la traction.

Pour ces essais, il est de toute importance de les pratiquer sur le métal écroui et sur le même métal recuit.

Essai de fragilité. — Comme il est dit plus haut, pour les essais de

fragilité, il faut entailler préalablement et assez profondément l'échantillon à étudier; nous donnerons les spécifications recommandées par M. Frémont lui-même.

Le percuteur, c'est-à-dire la partie de l'appareil qui détermine le choc, doit avoir une vitesse d'au moins 8^m à la seconde au moment où il est en contact avec la pièce qu'il doit briser.

L'enclume sur laquelle repose l'échantillon doit présenter une masse suffisante pour résister complètement à l'effort.

Dans les fils d'acier, le volume du métal intéressé par la déformation étant faible, une petite quantité de force vive est suffisante, 3^{kgm} pour des fils de 4^{mm} par exemple.

M. Frémont a employé un marteau formé d'une lame d'acier trempé de 1^{mm} d'épaisseur. La quantité de travail dépensé pour produire la rupture est, dans la plupart des appareils employés actuellement, donnée par la mesure de la quantité du travail résiduel, après le choc, au moyen d'une lecture directe faite sur l'appareil; en effet, connaissant la force vive au moment du choc et la force vive après le choc, on en déduit par différence le travail dépensé par le choc.

Comme pour les essais de traction et de cisaillement, il est à recommander d'étudier le fil non seulement à l'état d'écroui, c'est-à-dire tel qu'il sera employé, mais aussi à l'état recuit afin de savoir si sa faible résistance est due à l'écroutissage seul ou à la nature du métal.

Quand on a affaire à des fils fins réunis en torons, il faut employer un marteau très petit. Pour les essais au choc des fils fins composant un câble, M. Frémont expose une méthode qui lui a donné de bons résultats.

Il dénante chacun des torons du câble, redresse chaque fil, les réunit à chaque extrémité par un point de soudure à l'étain; chaque toron formant ainsi une éprouvette composée de fils parallèles et contigus qu'il entaille à l'aide d'un tiers-point. Il essaye chacune de ces éprouvettes comme s'il ne s'agissait que d'un fil.

M. Frémont, pour effectuer des essais au choc sur des fils qui n'ont parfois que 1^{mm} de diamètre, a imaginé une nouvelle méthode.

qui consiste à renforcer l'éprouvette dans toute la partie qui ne doit pas se déformer.

Ce renforcement est obtenu par deux manchons, laissant libre entre eux la partie du fil qui doit fléchir; la longueur de chaque manchon est d'environ 14^{mm}, la largeur sur la face d'appui est de 10^{mm}.

Pour préparer l'éprouvette, on coupe le fil à essayer sur une longueur de 32^{mm}; enfin l'écartement des points d'appui a été fixé à 23^{mm}.

Une paire de manchons est nécessaire pour chaque grosseur de fil parce que ce fil est introduit dans le trou qui traverse ces manchons dans toute leur longueur. Les extrémités des manchons qui sont en contact doivent être inclinées pour former en dessous une entaille angulaire qui sert de guide au tiers-point que l'ouvrier emploie pour entailler le fil. Au-dessus, un arrondi est pratiqué aux extrémités en contact des manchons afin de permettre par un petit espace le libre passage du percuteur qui donnera le choc.

Un perfectionnement consiste à serrer le fil dans les deux manchons, fendus longitudinalement, au moyen de deux vis qui agissent transversalement. Quand le métal est de bonne qualité, l'éprouvette se plie sous le choc, l'entaille s'allonge, mais il n'y a pas cassure.

Si le métal est de mauvaise qualité, il y a rupture.

Il est nécessaire d'insister sur le fait que l'entaille est indispensable, car sans elle, même si le métal est fragile, l'expérience n'aboutit pas forcément à la rupture.

Essai de traction sur des barres d'acier doux. — On considère généralement qu'un acier écroui par traction est devenu cassant, fragile, hétérogène et d'un emploi dangereux.

M. Seigle a présenté à l'Académie des Sciences, une Note qui semble apporter une contradiction à cette opinion généralement admise. Il a effectué sur des barreaux d'acier doux des essais, après leur rupture par traction.

Ces aciers, à l'état recuit, présentaient 25^{kg} de limite élastique et 40^{kg} de résistance à la rupture par millimètre carré.

Ces barreaux avaient une section circulaire, rectangulaire ou même encore affectant des formes de profilés en T, en U, etc., enfin, des essais furent faits sur des tubes.

Ainsi un fil machine de 5^{mm} peut donner, après rupture par traction, des allongements considérables jusqu'à 150 et 170 pour 100 par la méthode dite « d'enroulement et de déroulement sous charge ».

Pour cela on fait faire au fil un enroulement d'une spire sur une tige de 10^{mm} à 15^{mm} de diamètre.

On fait tourner cette tige sur son axe, pendant qu'on soumet le fil à un effort de traction, d'environ 60 à 70 pour 100 de sa charge de rupture.

Dans une seconde Note, M. Seigle rappelle que les aciers tréfilés à haute résistance sont d'un emploi industriel courant pour les câbles. Ils entrent même dans la confection des conduites d'eau, dans les constructions en béton armé, etc. L'écroutissage par traction est un moyen de relever la limite élastique beaucoup plus simplement et d'une façon moins coûteuse que par tréfilage.

On ne peut arriver, il est vrai, à ce résultat que dans des limites plus restreintes.

Mais le métal y gagne une meilleure striction et de meilleurs résultats aux essais au pliage.

Le cas extrême de l'écroutissage par traction s'obtient par une rupture préalable des barres, et la limite devient alors deux fois plus grande qu'elle n'était primitivement.

En un mot, l'écroutissage par traction peut doubler le coefficient de sécurité.

L'acier doux tractionné ne demeure pas moins très facilement travaillable par les machines-outils, on le poinçonne, on le perce aussi aisément, ce qui ne serait pas le cas si l'on employait un acier ayant même limite élastique et qui n'aurait pas été tractionné.

Il semble donc qu'en tractionnant plus ou moins des barres ou des fils de manière à en relever la limite élastique, on constaterait des facilités de travail en même temps que des possibilités d'emploi

plus grandes, spécialement dans le cas d'une fatigue anormale, par traction directe, supportée par l'ouvrage où ses matériaux ainsi préparés seraient utilisés et ils seraient susceptibles de donner d'excellents résultats.

Il y a là une étude en tout cas dont les applications pratiques devraient tirer profit.

Particularités de l'étirage des fils. — Les fils étirés à froid présentent parfois des différences de dureté. Cette hétérogénéité serait due, d'après M. Longmur, à ce que la partie du fil qui passe la dernière à la filière est forcément à une température supérieure à celle de la partie qui a passé la première.

Exemple : Un fil de 370^m de longueur, en acier, ayant la composition suivante :

| | |
|---------|---------------|
| C..... | 0,68 pour 100 |
| Mn..... | 0,75 » |
| Si..... | 0,20 » |
| S..... | 0,03 » |
| Ph..... | 0,03 » |

donne, pour R, 74^{kg},7 par millimètre carré et, pour A, 14,7 pour 100 au commencement du rouleau, tandis que R = 79^{kg},4 par millimètre carré et A = 13,6 pour 100 à la fin du rouleau.

Cette hétérogénéité entraîne quelquefois des ruptures aux passes suivantes; la composition chimique n'est pas cause de ces accidents.

Pour éviter ces ennuis, il suffirait de normaliser la couronne en lui faisant subir un revenu entre 550° et 700°.

Comment varie la résistance d'un acier avec le nombre des passes de tréfilage ?

Prenons un exemple :

Un acier ayant la composition indiquée plus haut et recuit entre 900° et 950° avant tout étirage donne, après une réduction de

section de 82 pour 100 en six passes, une résistance à la rupture qui, de 75^{kg}, atteint 154^{kg} par millimètre carré.

La dimension d'origine a cependant une influence sur la résistance du produit final, cette dernière est d'autant plus grande que la dimension de départ est plus faible. M. Longmur cite un étirage très remarquable d'un fil d'acier ayant comme composition :

| | |
|---------|---------------|
| C..... | 0,10 pour 100 |
| Mn..... | 0,89 » |
| Si..... | 0,06 » |
| S..... | 0,103 » |
| Ph..... | 0,307 » |

Sans recuits intermédiaires, ce fil a subi en une série de passes une réduction de 23 pour 100 qui a fait monter sa résistance par millimètre carré de 56^{kg} à 176^{kg}.

Les déboires qu'on rencontre dans l'étirage des fils de bonne qualité, recuits, proviennent de la vitesse de refroidissement; elle doit être telle que la structure soit sorbitique et non donner de la martensite ou de la troostite.

Certains prétendent que l'hétérogénéité en question provient de ce que les dimensions originelles de la tête et de la partie étirée en dernier lieu sont différentes; on constate d'ailleurs que la densité du métal de tête est plus petite. Enfin la ségrégation, c'est-à-dire la modification chimique entre le cœur et l'écorce de la pièce étirée, expliquerait beaucoup d'accidents survenus pendant le travail sans que celui-ci puisse être incriminé.

Influence de l'étirage progressif à froid sur les propriétés physiques du cuivre. — Quand on a réduit la section d'un fil ou d'une barre de 50 pour 100, un point critique apparaît. Il en existe un autre à 92 pour 100 de réduction, pour des fils ayant subi une douzaine de passes après décapage sans recuit et, pour d'autres fils ayant subi des passes plus nombreuses et un recuit de 4 heures à 600°. Les courbes de résistance à la traction font apparaître en effet des points de décrochement. Le fil de cuivre étiré puis recuit ne rede-

vient pas tout à fait aussi élastique qu'avant l'étirage. Il conserve un certain allongement après une traction, même si cette traction est faible. Cet allongement croît avec la traction subie et le diamètre du fil diminue de manière assez régulière dans toute sa longueur jusqu'à ce que l'allongement soit de 40 pour 100 environ. Alors se produit une striction ou a lieu, inévitablement et subitement, la rupture.

La dureté n'est pas constante dans toute la section d'un fil étiré. Si l'on met à part une mince couche superficielle, cette dureté semble croître de la périphérie au centre et diminuer dans la région axiale.

En polissant légèrement à l'émeri la surface du fil étiré, des anneaux perpendiculaires aux génératrices apparaissent et leur écartement est sensiblement égal au diamètre du fil.

La ténacité du fil étiré, puis recuit, paraît d'autant plus grande qu'il a été étiré davantage avant le recuit. La conductibilité électrique est plus grande dans le fil soumis à l'étirage modéré (par exemple, à 25 passes) que dans celui étiré plus brutalement en 13 passes pour la même réduction de section. Il est à remarquer que le laminage à froid du cuivre donne des résultats analogues. On arrive à un état d'équilibre pour les propriétés physiques du métal, qui restent les mêmes quand le diamètre varie dans certaines limites.

Tréfilage du cuivre. — Les fonderies de cuivre coulent des blocs appelés *billetes* qui mesurent à peu près 0^m,80 de longueur et qui ont une section carrée d'environ 0^m,08 de côté. On les fait passer dans un four à réchauffer qui les porte à 800°. C'est un four à réverbère ordinaire avec entrées latérales. De là, on les conduit au train dégrossisseur qui tourne à 100 tours à la minute et qui est actionné par une machine de 200 chevaux environ, puis au finisseur (450 tours et 600 chevaux). Les cannelures de ces laminoirs sont alternativement carrées et ovales; une cannelure finisseuse est ronde.

Le fil produit par ces différentes opérations est enroulé sur un dévidoir, et alors commence le tréfilage proprement dit.

On emploie successivement cinq sortes de bancs :

- 1^o Les gros bancs, toujours discontinus, nous l'avons déjà dit ;
- 2^o Les demi-gros, discontinus ou non, dans le premier cas, ils sont semblables aux précédents ;
- 3^o Les moyens, continus ainsi que les suivants ;
- 4^o Les demi-fins ;
- 5^o Les fins.

Les gros fils sont finis par les premiers ; les autres subissent, au préalable, un laminage plus avancé et passent directement dans les bancs demi-gros.

Voici les puissances absorbées pendant le tréfilage (1) :

| | |
|---|-------------|
| 1 ^o Fil de cuivre étiré de 15,0 à 13 ^{mm} ,0..... | 7,5 chevaux |
| » 6,75 à 4 ^{mm} ,9..... | 5 » |
| 2 ^o Fil de bronze étiré de 16,0 à 14 ^{mm} ,0..... | 9,5 » |
| » 10,0 à 9 ^{mm} ,0..... | 3,75 » |

Les bancs sont semblables à ceux employés dans les tréfileries de fer. Lorsqu'on peut actionner plusieurs bobines par un même arbre, on réalise évidemment une économie de force motrice. On retrouve généralement les dispositifs d'embrayage à friction que nous avons décrits.

Si l'on opère à grande vitesse, il est bon de munir la machine d'un frein actionné par une pédale, de façon à arrêter le mouvement du tambour immédiatement après le débrayage.

Donnons quelques détails sur un banc construit par une maison de Berlin et qui sert à étirer les fils de 7^{mm} à 3^{mm} :

| | |
|--------------------------|-------------------|
| Diamètre du tambour..... | 430 ^{mm} |
| Vitesse du tambour..... | 120 tours/minute |

(1) Extraits de la *Revue de Métallurgie*, octobre 1907.

La puissance absorbée en opérant sur du fil de 5^{mm} à une vitesse linéaire de 2^m,70 est de 15 chevaux, l'embrayage est du genre de celui que nous avons décrit pour les bancs servant à tréfiler le fer, c'est-à-dire qu'il procède par soulèvement et abaissement du tambour. La pince est particulière. Elle est reliée au tambour par une chaîne; on saisit le fil et l'on embraye; lorsqu'il s'est enroulé d'un tour environ, on débraye, on coupe la pointe, on fixe l'extrémité du fil à un petit étau qui fait partie du tambour et l'on embraye à nouveau. C'est, on le voit, une disposition très simple qui permet de réaliser ce que nous avons appelé « l'enfilage mécanique ».

Le banc reçoit le mouvement d'un moteur électrique par l'intermédiaire de deux poulies et d'une courroie disposées de façon qu'on puisse faire tourner le tambour à des vitesses variées. Un démarreur, dans la description duquel nous n'entrerons pas, permet de commencer l'opération très progressivement, le moteur ne court, par suite, aucun risque d'être endommagé.

La filière est fixée sur un plateau pouvant tourner autour d'un axe vertical, si bien que le réglage de son plan sera obtenu rapidement et exactement.

Les fils de trolley doivent avoir de grandes longueurs, ils sont faits d'un cuivre dur, très résistant; ils mesurent 8 à 11^{mm} de diamètre. Ils sont tréfilés sur un banc spécial et le travail se fait à petite vitesse, ceci afin de pouvoir éviter des réchauffages qui ne permettraient pas de conserver la dureté qu'on demande à ces fils.

L'appareil est en trois parties : le dévidoir, le banc proprement dit et l'envidoir.

On part de barres laminées à chaud jusqu'à ce qu'on ait obtenu un diamètre de 22^{mm}. Une dernière passe, à froid, les réduisant à 20^{mm}, joue en même temps le rôle d'une trempe. Ces barres sont en cuivre électrolytique.

Voici comment se pratique l'opération :

Le fil, enroulé sur le dévidoir, passe dans la filière après avoir été graissé (dans ce but, on emploie généralement du talc), il s'enroule sur un tambour à axe horizontal mû par un moteur

électrique de 15 chevaux par l'intermédiaire d'engrenages, poulies et courroie. Ceci permet de réaliser la vitesse de rotation qui convient au diamètre du fil. Après avoir fait deux ou trois tours, ce dernier quitte le tambour pour aller se fixer sur la bobine amovible, à axe horizontal, de l'envidoir qui est actionné indépendamment par un moteur de 2 chevaux; les transmissions permettent également de faire varier la vitesse de l'enroulement, afin qu'elle corresponde à celle du tambour. Lorsque la passe est terminée, on enlève la bobine de l'envidoir, on l'échange contre celle du dévidoir qui est vide et l'on recommence l'opération autant de fois qu'il est nécessaire.

Pour un fil de 8^{mm}, on fait six passes qui réduisent les diamètres de 20^{mm} à 17^{mm}, puis 14^{mm,5}; 12^{mm}; 10^{mm,5}; 9^{mm} et 8^{mm}. On emploie soit les filières allemandes (en acier à outils ordinaire), soit les filières anglaises (en acier rapide).

Il faut, lorsqu'on a atteint le diamètre voulu, réunir les couronnes à la suite les unes des autres; pour cela, on taille les extrémités en biseau et on les soude au moyen de minces feuilles d'argent. La soudure autogène électrique donne d'excellents résultats; dans ce procédé, les extrémités sont coupées normalement et rapprochées.

Nous avons dit, à propos du tréfilage du fer, ce qu'on entendait par « bancs continus »; nous allons en étudier quelques-uns, en commençant par ceux qui travaillent le gros fil.

Une des dispositions les plus employées est la suivante :

Un arbre horizontal actionne, par engrenages, quatre poulies d'assez grand diamètre et un tambour. Tous les axes sont horizontaux et les vitesses différentes, grâce à des rapports d'engrenages appropriés. Le fil est placé sur un dévidoir qui, lui, est vertical; une petite poulie renvoie le fil à la première filière; il s'enroule ensuite d'un tour ou deux sur la première poulie d'entraînement qu'il quitte pour s'introduire dans la deuxième filière. Il en sort pour entourer la deuxième poulie, et ainsi jusqu'à la cinquième filière qui est suivie du tambour sur lequel il s'enroule complètement.

Un débrayage et un frein permettent l'arrêt immédiat de toutes les poulies à la fois. Pour du fil de 8^{mm}, le tambour mesure 0^m,50 de diamètre et tourne à 100 tours à la minute. Les quatre poulies ont également 0^m,50 de diamètre, la force est de 20 à 22 chevaux et les passes sont successivement de 6^{mm},5; 5^{mm},2; 4^{mm}; 3^{mm},4 et 3^{mm}.

Comme on le voit, cet appareil n'a rien de particulier, il est du type linéaire, mais la maison Hodgson a imaginé un perfectionnement. Pour remédier aux inconvénients dus aux glissements du fil sur les poulies d'entraînement, les arbres de celles-ci portent chacun un ensemble d'engrenages différentiels du type planétaire. Si la tension du fil entre la filière et la poulie vient à augmenter, cet appareil entre en action et diminue la vitesse de rotation; on obtient ainsi une tension régulière et l'on évite tout glissement.

Le banc américain, dont nous allons parler maintenant, permet de réunir en un seul les bancs demi-gros et moyens. Les poulies d'entraînement, toutes de même diamètre, sont montées sur le même axe horizontal, quoique chacune d'elles soit mise en mouvement séparément, grâce à des manchons qui se recouvrent les uns les autres, sur lesquels elles sont clavetées et qui portent chacun, à l'extrémité opposée aux poulies, un engrenage actionné par l'arbre moteur.

La plaque d'étirage, percée d'autant de trous qu'il y a de poulies, est placée parallèlement à l'axe de celles-ci; enfin, derrière cette plaque, se trouvent les rouleaux guides qui sont fous sur un seul axe disposé aussi parallèlement à la plaque.

Pour engager le fil au début, dans les différents trous de la filière, on se sert d'une poulie d'engagement qui est munie d'une pince; elle est folle sur un arbre et, pour l'entraîner, il suffit de mettre en prise un taquet. On commence, en agissant sur un volant, par amener la plaque d'étirage, de façon que le trou de droite se trouve en face de la poulie d'engagement. Le fil étant appointé, on l'assujettit sur cette poulie, après l'avoir introduit dans le premier trou de la filière. On fait faire à la machine plusieurs tours, on l'arrête ensuite, on dégage le fil de la pince, on présente le deuxième trou

de la plaque devant la poulie et l'on passe le fil sur le premier rouleau d'entraînement. On recommence ainsi la même opération pour chaque trou de la filière. Lorsque l'enfilage est terminé, on donne à la machine, en déplaçant un levier spécial, sa vitesse normale qui est double de celle utilisée pendant l'engagement du fil.

La vitesse tangentielle du tambour est de 2^m,80 à 3^m, la force est de 15 chevaux pour un fil de 6^{mm}, les passes sont successivement 5^{mm},1; 4^{mm},5; 3^{mm},9; 3^{mm},4; 2^{mm},9; 2^{mm},5 et 2^{mm},2. Un seul ouvrier conduit la machine et peut produire 200^{kg} de fil à l'heure.

Il faut graisser avec soin et arroser constamment la filière pour la refroidir.

L'inconvénient de cette machine réside, comme on a pu s'en rendre compte, dans le soin extrême qu'il faut apporter à l'enfilage, d'ailleurs on retrouve ce même inconvénient dans la plupart des machines à tréfiler multiples.

Les bancs demi-fins abaissent le diamètre de 2^{mm} à 0^{mm},05; ils ont comme caractéristique d'être presque généralement composés de poulies d'entraînement ayant des diamètres différents tournant à la même vitesse angulaire.

Pour ces petits diamètres, il devient presque absolument nécessaire d'employer la filière de diamant. Nous en avons déjà parlé. Nous n'ajouterons ici que quelques mots. Pour empêcher que les diamants ne sautent pendant l'étrépage, on a cherché à les enchâsser dans l'acier par compression, ceci n'a pas réussi, car on écrasait souvent la pierre. On préfère couler de l'acier autour et par la contraction résultant du refroidissement, on obtient un assujettissement très satisfaisant. Le perçage est extrêmement délicat, à cause de la dureté du corps et de la finesse du trou; il faut employer un autre diamant ou de la poudre de même matière. Pour cela, on délaie celle-ci dans de l'huile et, avec cet enduit, on garnit une fine aiguille d'acier tournant très rapidement. A l'aide d'une machine spéciale, on applique la pierre sur cette pointe qui la perce.

Comme pour les filières d'acier, après une certaine usure, on fait passer celle en diamant au calibre supérieur; ainsi le calibre 0^{mm},07

sera, après usure, affecté au travail du fil de $0^{\text{mm}},075$. Il faut procéder à un affutage. On fixe la pierre au moyen de cire, sur un plateau animé d'une grande vitesse de rotation. Une aiguille, reposant sur des rouleaux et poussée par un ressort, vient appliquer sa pointe exactement au centre du trou, une came la ramène en arrière, si bien qu'elle n'agit que par des chocs répétés. La vitesse de rotation varie avec la grosseur du trou; elle est comprise entre 1500 et 2500 tours à la minute. L'aiguille frappe 200 à 300 coups; elle est en acier doux et sa course est réglée de façon qu'elle reste engagée un instant seulement dans le diamant. On emploie successivement des poudres de plus en plus fines que l'on dépose avec une spatule sur la tige après les avoir très intimement mélangées avec de l'huile d'olive.

On doit obtenir un trou poli, conique, sans arête vive à la sortie. Un même ouvrier peut conduire plusieurs de ces machines, qui, une fois réglées au moyen de vis spécialement disposées à cet effet, ne demandent qu'un peu de surveillance et le remplacement du mélange d'huile et de poudre.

Généralement, les machines à tréfiler continues pour fils fins se composent d'un axe portant les poulies et d'un autre pour les galets, tous deux verticaux. Pour la mise en marche, on opère comme avec le banc américain, mais on se sert des poulies d'entraînement, il n'y en a pas de spéciale pour l'engagement; de plus, les filières ne peuvent être déplacées latéralement. L'embrayage est déterminé par un levier à main qui abaisse un manchon, lequel fait appliquer, à la circonférence intérieure d'un tambour creux coulé sur l'arbre moteur vertical, deux pièces en arc de cercle qui relient ainsi, avec une certaine douceur, la partie supérieure solidaire de la transmission inférieure. Les filières sont animées d'un mouvement de rotation grâce à deux poulies, une courroie et des engrenages. La commande de toute la machine se fait par un moteur électrique monté directement sur l'arbre horizontal.

Les vitesses extrêmes du fil sont $0^{\text{m}},80$ et $2^{\text{m}},40$ à la minute. Les diamètres sont réduits successivement de 2^{mm} à $1^{\text{mm}},78$, puis $1^{\text{mm}},68$; $1^{\text{mm}},58$; $1^{\text{mm}},48$; $1^{\text{mm}},38$; $1^{\text{mm}},30$; $1^{\text{mm}},22$; $1^{\text{mm}},19$;

1^{mm},10. On peut tréfiler de cette façon environ 80^{kg} par heure.

Les bancs à fils très fins sont semblables à ceux du type précédent, mais on prévient l'échauffement de la filière déterminé par le passage rapide du fil, en disposant une circulation de liquide gras. A cet effet, les filières qui, ici, ne peuvent pas tourner, sont fixées aux parois de petits bassins placés les uns sous les autres, de façon que le liquide puisse tomber en cascade.

L'embrayage est semblable à celui que nous venons de décrire, mais il est construit de telle sorte qu'on peut obtenir plus de douceur encore pour le démarrage. La vitesse du fil est de 1^m,40 au début et 3^m,90 à la fin de l'opération. Pour réduire le diamètre de 0^{mm},5 à 0^{mm},15, on fait dix passes; la puissance nécessaire est de 3/4 de cheval.

Un même arbre moteur, afin d'éviter les pertes de force, actionne généralement plusieurs bancs demi-fins placés à la suite les uns des autres; ici, au contraire, chacun d'eux est mû par un moteur électrique spécial; on a ainsi plus d'indépendance; cependant certains constructeurs (Dalhaus et C^{ie}, Iserlohn) réunissent deux appareils sur un même arbre.

L'appointage se fait par le petit laminoir à main dont nous avons parlé pour le tréfilage de l'acier.

L'érouissage ayant enlevé toute la souplesse, le « fil d'acier clair » ne peut convenir à certains usages. Il ne peut être employé, par exemple, à la confection des treillages, à la fabrication des clous, etc. C'est pourquoi on le recuit dans des cuves en fonte parfaitement closes, le couvercle en est luté soigneusement de façon à éviter toute action oxydante. Ces cuves, introduites dans un four, sont portées à la température de 900° environ pendant plusieurs heures. Les fours ont souvent, pour faciliter la manœuvre, deux portes se faisant face: l'une sert pour l'entrée, l'autre pour la sortie. Malgré toutes les précautions prises, le fil n'a pas conservé son brillant comme dans le cas du cuivre; il est recouvert d'une légère couche d'oxyde gris bleu, nous n'insisterons pas sur ces diverses questions

déjà traitées; mais, si le recuit est, pour la fabrication du fil d'acier, une opération subséquente, pour celle des fils de cuivre, laiton ou bronze, elle est nécessaire, et il faut la pratiquer après quelques étirages. On opère comme nous l'avons dit, mais à température moins élevée, en général, aux environs de 600°. On arrive facilement, lorsque les cuves sont parfaitement closes, à éviter absolument toute oxydation et le fil sort des cuves brillant comme lorsqu'on l'y a mis, mais il faut dire que le prix élevé du produit, en comparaison de celui du fer, fait prendre beaucoup plus de précautions, car, sans cela, il faudrait procéder à un décapage semblable à celui dont nous avons parlé à propos de l'étirage, décapage qui entraîne une perte de métal.

Pour obtenir du fil, nous sommes partis de billettes que nous avons fait laminier en barres, puis en fils. On procède quelquefois différemment. En Allemagne et dans quelques usines françaises notamment, on transforme les billettes en plaques par laminage et les plaques en bandes par un découpage en spirale, afin d'obtenir une plus grande longueur. On se sert pour cela de machines à cisailles rotatives, ou mieux de scies à découper les métaux. On lamine et l'on tréfile ces bandes comme à l'ordinaire. On applique quelquefois cette méthode, appelée « escargotage », à la fabrication des fils de maillechort.

Fabrication des fils de laiton. — Les alliages employés sont fondus dans des creusets de plombagine; nous n'entrerons pas ici dans les détails de ces opérations de fonderie, nous dirons cependant que la température de coulée joue un rôle très important. Coulé trop chaud, le métal présentera des soufflures et de la porosité; trop froid, le moulage sera défectueux.

Le laminage se fait à chaud ou à froid suivant la composition. Les lingots qui ont une forme plate et ovale sont laminés en planches qu'on découpe ensuite en cercles, lesquels sont enfin escargotés en bandes à section carrée qu'on lamine à froid, ensuite au moyen de petits laminoirs qui écrasent les angles des bandes. Celles-ci prennent alors une section octogonale qui permet le tréfilage; parfois

on tréfile directement après l'escargotage, mais le métal est alors soumis à un travail très dur; le fil casse souvent et les filières d'autre part se détériorent rapidement; d'ailleurs le fil ne sera dans ce cas réellement beau qu'après plusieurs passes.

Les billettes pesant au maximum 20^{kg} ne permettent pas d'obtenir des planches ayant un grand diamètre; par suite, la longueur est dans certains cas trop faible. On évite cet inconvénient en coulant des barres carrées de 30^{mm} de côté et pesant de 25^{kg} à 30^{kg}.

On les lamine de façon à les transformer en barres rondes de 10^{mm} de diamètre. D'autres procédés plus ou moins ingénieux sont employés dans le but d'obtenir une grande longueur, en partant d'un lingot de poids déterminé.

Ainsi on coule un cylindre creux qu'on lamine à la façon d'un bandage de roue, c'est-à-dire de manière que le diamètre augmente, tandis que l'épaisseur diminue. On découpe ensuite une hélice de telle sorte que tout le métal se trouve transformé en une seule bande. Ce procédé serait, paraît-il, employé dans le nord de l'Angleterre.

L'escargotage comporte une assez forte proportion de déchets qui doivent repasser à la fonderie. Le disque doit d'abord être découpé en rond d'où tout autour, une chute importante. Il faut, d'autre part, rejeter en fin d'opération le cercle résiduel dont le diamètre dépend de la machine employée. Avec des disques sains, exempts de soufflures, de crasses, criques, etc., on arrive à escargoter en une seule bande, sauf les deux parties signalées plus haut qu'il faut refondre.

Le tréfilage se pratique de la même façon que pour le cuivre. Pour un fil de laiton (composition : cuivre, 60; zinc, 40) de 12^{mm} à 14^{mm} de diamètre, le diamètre du tambour d'entraînement est, en général, de 60^{cm}, et la vitesse de rotation 15 tours à la minute. Si le diamètre du fil est inférieur à 2^{mm}, celui du tambour est d'environ 30^{cm} et la vitesse de 45 tours. D'une façon générale également, on peut dire que les passes sont de 15 dixièmes de millimètre jusqu'au diamètre de 10^{mm}; de 1^{mm} jusqu'au diamètre de 5^{mm}; de

5 dixièmes jusqu'à celui de 1^{mm}. Au-dessous, l'importance des passes dépend trop de la qualité du fil pour que nous puissions donner des chiffres moyens.

On emploie beaucoup les bancs continus, car on utilise surtout les fils très fins. Le nombre des filières d'une même machine est limité par l'érouissage, érouissage qui nécessitera d'autant plus fréquemment un recuit que l'alliage contiendra moins de cuivre. En Angleterre, on emploie pour les filières l'acier dur. En Amérique, on préfère la fonte trempée. Pour les fils fins, le diamant devient nécessaire.

Fabrication des fils en bronze siliceux. — Le phosphore et le silicium jouent dans les bronzes à peu près le même rôle; ils réduisent les oxydes. Ainsi le silicium donne de la silice qui, avec les oxydes non réduits, forme des silicates fusibles. Les expériences qui ont été faites en 1881, aux usines Weiller d'Angoulême, ont démontré que le cuivre phosphoré avait une conductibilité deux fois et demie plus grande que le fer et l'acier, quoique moindre d'un tiers de celle du cuivre rouge. Pour conserver la résistance et pour augmenter la conductibilité, propriétés nécessaires aux câbles électriques, on fut amené à faire des bronzes au silicium. Nous ne parlerons pas de la pratique du tréfilage des bronzes siliceux, nous avons donné, à propos du cuivre et du laiton, à peu près tout ce qu'il est intéressant de savoir à ce sujet. Nous nous occuperons seulement ici de la composition de ces fils pour câbles.

M. Sperry préconise l'alliage obtenu en fondant 98^{kg},55 de cuivre, 1^{kg},40 d'étain et 0^{kg},05 de silicium. Le but qu'on se propose est d'obtenir la parfaite désoxydation, afin d'avoir une plus grande résistance mécanique, c'est là le rôle du silicium, mais il faut éviter la formation de siliciure de cuivre qui se produirait s'il restait trop de silicium, car ce siliciure diminuerait la conductibilité.

Les bronzes ayant la composition indiquée présentent les propriétés suivantes :

| Désignation. | Recuit. | Étiré. |
|---|-----------------------|-----------------------|
| Conductibilité électrique (échelle de Mathiesen)..... | 41 pour 100 | 40 pour 100 |
| Résistance à la traction..... | 30 ^{kg} , 23 | 65 ^{kg} , 24 |
| Allongement sur 200 ^m | 34 pour 100 | 1 pour 100 |
| Striction..... | 85 | 68 |
| Torsion sur 150 ^{mm} | 119 | 8 |

Le phosphore peut remplacer le silicium, mais il faut le doser très exactement, car, en excès, il exerce plus d'influence sur la conductibilité que le silicium.

On utilise aussi, pour les câbles, les alliages cuivre-silicium (sans étain) et, en particulier, la composition suivante :

| | |
|---------|-------|
| Cu..... | 99,98 |
| Si..... | 0,02 |

Quelques industries dérivées de la tréfilerie. — Nous voudrions pouvoir les étudier toutes, mais elles sont si nombreuses que nous dirons quelques mots seulement des plus intéressantes.

Commençons par l'acier.

Les câbles employés dans la marine sont constitués par des fils d'acier à haute résistance ayant subi un recuit après tout travail pour détruire la fragilité, conséquence de l'érouissage. Le tréfilage ne présente pas de particularités, sauf cependant qu'il exige des recuits assez fréquents. Nous avons donné, dans le premier Chapitre, les teneurs en carbone des aciers employés. Les machines à câbler se composent d'une sorte de dévidoir à axe horizontal et qui porte autant de poulies, sur lesquelles sont enroulés les fils, qu'il doit y avoir de brins dans le câble. Ces poulies étant garnies de fils et ceux-ci réunis par leurs extrémités au centre du tambour si l'on vient à faire tourner tout l'appareil, il se produit une torsion de ces différents brins autour d'un fil de chanvre qui constitue l'âme et qu'on a pris soin de disposer au milieu d'eux.

Les clous et les pointes sont tirés du fil; les premiers, comme on le

sait, présentent une partie effilée sur toute la longueur ; ils exigent, pour leur fabrication, des fils en acier extra-doux, recuits après le tréfilage. Les pointes, dont l'extrémité seule est taillée, s'obtiennent en partant du même acier auquel on conserve son écrouissage. Il est nécessaire, pour les clous, d'employer du fil recuit, plus facile à travailler que le « clair », car leurs pointes étant plus longues, il faut enlever davantage de métal ; d'autre part, leurs têtes sont plus larges et souvent plus épaisses (clous de sabots, par exemple), donc la masse de métal à écraser est plus grande. Enfin, la longueur totale est plus petite que celle des pointes et il y a moins d'inconvénients à utiliser un métal plus malléable, car on n'a pas à craindre qu'ils se courbent quand on les enfonce.

Les machines se composent : 1^o d'un mouton, chassé par un ressort puissant, qui forme la tête ; 2^o par deux couteaux qui taillent la pointe. Le tout est actionné par des comes qui reproduisent successivement les mêmes mouvements au fur et à mesure que le fil avance dans la machine. Ce mouvement d'avancement est obtenu par un dispositif spécial qui pince le fil et le pousse dans la machine, d'une quantité correspondant à la longueur du clou ou de la pointe. Des réglages permettent d'obtenir, avec le même appareil, une grande variété de diamètres et de longueurs. Un mécanisme de dressage (par galets) précède la machine.

Pour les ressorts, on emploie de l'acier doux, quelquefois demi-doux, et l'élasticité est obtenue par l'écrouissage résultant du tréfilage. Le fil passe dans la machine après avoir été dressé, en suivant un parcours qui lui est imposé par un moule approprié. Il en sort en spirale, mais en se développant sensiblement, si bien qu'il faut avoir prévu un moule de diamètre plus petit que celui du ressort qu'on veut obtenir.

Les treillages sont faits avec du fil en acier extra-doux, non recuit le plus souvent ; ils sont tissés en quelque sorte par des métiers spéciaux portant des bobines sur lesquelles les fils sont enroulés et qui se déplacent les unes par rapport aux autres. Ils sont galvanisés après tissage.

La galvanisation du fil se pratique de la façon suivante :

Une machine à bobiner, comprenant deux rangs ayant chacun six bobines à axes horizontaux, tire douze fils à la fois. Ces derniers, disposés en couronnes sur douze dévidoirs, passent rapidement dans une cuve en fonte contenant du zinc en fusion. Un peigne enlève l'excès de zinc; l'opération se fait donc par un simple passage dans le bain. Il faut opérer rapidement, car le fer se dissout dans le métal liquide et forme avec lui un composé riche en zinc. La température du bain est une seconde cause favorisant cette dissolution. On voit donc que, pour réaliser la fabrication le plus économiquement possible, il faut agir sur deux facteurs :

- 1^o Rapidité du passage;
- 2^o Température du bain.

Nous avons dit plus haut qu'il fallait, avant de galvaniser les fils de fer, procéder à un décapage; on emploie généralement l'acide chlorhydrique. De même, pour l'étamage et le cuivrage.

Pour obtenir du fil cuivré, on le fait plonger dans un bain de sulfate de cuivre; le dépôt métallique formé n'est ni adhérent ni brillant, c'est pourquoi on lui fait subir ensuite deux passes successives de tréfilage; le cuivre se trouve maté et le fil en sortant de la filière présente un très beau poli.

Pour les fils de plomb et d'étain, nous avons résumé leur fabrication à propos de l'étirage par compression.

Propriétés du zinc tréfilé. — Le zinc se prête facilement au forgeage, au laminage, au tréfilage. Ses qualités électrochimiques et électriques le placent parmi les succédanés du cuivre, du laiton, et de l'aluminium.

On distingue : le zinc dur, le zinc demi-dur, le zinc ductile, zinc très ductile. Ce métal est très sensible, en effet, à l'écroutissage qui fait varier ses propriétés. Le recuit a par conséquent une influence importante.

La résistance et les allongements subissent une diminution rapide par des recuits entre 100° et 125°; ils augmentent quand ces recuits se font à des températures plus élevées.

La durée du recuit intervient également, ainsi le nombre de pliages avant rupture varie en fonction de la température et du temps de recuit du zinc écroui. Il faut maintenir le zinc du commerce pendant un temps très long à la température de 100° pour l'amener à l'état de recuit complet.

La proportion d'impuretés a une grosse importance sur ses propriétés.

Le zinc du commerce, dont le chiffre de dureté est double de celui du zinc chimiquement pur, contient 0,75 pour 100 de plomb, 0,33 pour 100 de cadmium et 0,01 à 0,02 pour 100 de fer.

La ductilité devient satisfaisante après un chauffage d'une heure à 100° pour le zinc le plus dur et à 125° pour le zinc demi-dur et dont les proportions d'impuretés sont les suivantes : 0,26 pour 100 de plomb ; 0,08 pour 100 de cadmium et 0,02 pour 100 de fer.

Ces indications permettent de fixer les conditions d'étirage de ce métal.

Emploi de l'aluminium pour les lignes électriques. — Depuis longtemps déjà en Europe et en Amérique, des câbles en aluminium ou en alliages de ce métal ont été employés dans certains réseaux électriques.

Cet emploi a été autorisé par le Ministre des Travaux publics dès 1908, et par les cahiers des charges de chemins de fer de l'État en 1913.

Pendant la guerre, cet emploi s'est développé.

Un métal très pur serait trop doux et inutilisable sous forme de conducteurs aériens ; mais des alliages de fer et de silicium donnent à l'aluminium la ténacité nécessaire, tout en accroissant la résistance, ce qui est un inconvénient ; il faut donc faire un choix et il semble que l'alliage, le meilleur à ce point de vue, doive contenir 99 pour 100 d'aluminium et sans autres éléments que du fer, du silicium, quelques traces d'oxygène et de carbone. Il ne faut y admettre en tout cas aucune quantité de sodium. Pour les câbles suspendus, la résistance mécanique est intéressante, les brins qui les composent devront être écrouis au maximum et présenter une

charge de rupture de 20^{kg} au moins par millimètre carré pour les diamètres inférieurs à 3^{mm},5.

La mesure se fera par celle de chacun des brins composant le câble, si l'on ne peut effectuer une mesure directe sur le câble lui-même. La limite d'élasticité du métal écroui ne sera pas inférieure à 11^{kg} par millimètre carré, et l'allongement à 2 pour 100. Pour les fils recuits, l'allongement ne sera pas inférieur à 25 pour 100, pour une résistance à la rupture de 9^{kg} par millimètre carré.

En Amérique, on a atteint des portées de 200^m et même 300^m. Dans le Dauphiné, une ligne de 60 000 volts traverse le massif de Belledonne à 2000^m d'altitude; elle supporte des charges de 9^{kg} par mètre courant, des températures de moins de 35° et des vents très violents,

Il semble que ce genre de câble devrait rendre de grands services pour l'établissement des réseaux de distribution; un champ très étendu s'offre à l'emploi de l'aluminium soit pur, soit à l'état d'alliage, associé même à l'acier pour former des câbles mixtes pour les appareillages, les lignes de distribution d'énergie, les réseaux télégraphiques et téléphoniques, etc.

Emploi des fils à âmes d'acier à revêtement de cuivre pour les transmissions électriques. — On est amené à donner aux conducteurs électriques une section plus grande qu'il ne faut pour la quantité d'électricité qui doit les parcourir afin que la résistance mécanique soit suffisante, quand il s'agit de conducteurs aériens, pour qu'ils puissent supporter leur propre poids, résister à la tension au moment de la pose et aux efforts provenant des différences de température, de l'influence du vent, du givre, etc. M. Denisson, professeur à l'Institut Carnegie, a fait à ce sujet une étude importante qui justifie l'emploi des fils à âmes d'acier revêtus de cuivre.

Un conducteur de cette nature pèse environ 8 pour 100 de moins qu'un conducteur de cuivre. Il a une résistance à la rupture qui dépasse celle du cuivre de 20 pour 100 pour les conducteurs à

gros diamètres et de 55 pour 100 pour ceux de petits diamètres.

Actuellement, en Amérique, on fabrique des fils acier-cuivre, d'une résistance à la traction exceptionnellement élevée, et dépassant de 150 pour 100 celle du cuivre. L'âme est constituée par de l'acier à haute teneur en carbone. Il y a des cas où ce conducteur mixte ne peut pas être employé, mais il trouve sa place dans les installations où le diamètre des conducteurs, au lieu d'être déterminé par la conductibilité, est fixé par des considérations mécaniques; ou encore quand il s'agit de conducteurs galvanisés exposés à des effets de corrosion et d'usure; par exemple, s'ils sont exposés, pour des transports de faible capacité à la campagne, aux effets du vent et de la gelée, qui alourdissent les fils. Également, dans le cas de longues portées, ce conducteur remplacera avantageusement le bronze au silicium, ou le bronze au phosphore, puisqu'il offre la même résistance et la même conductibilité, et qu'il coûte moins cher.

En effet, lorsque les conducteurs dans les villes par exemple, ou dans les tunnels, sont susceptibles d'être oxydés par des gaz corrosifs, des fumées, par l'humidité, on les emploiera avantageusement.

Le procédé de fabrication est le suivant : quand le lingot d'acier a été porté à la température de soudure à l'intérieur d'un moule en graphite, on verse autour de cet acier le cuivre électrolytique fondu qui doit en constituer le revêtement. Il se forme ainsi au refroidissement une chemise symétrique de cuivre fortement soudée à l'acier, et c'est ce lingot qu'on lamine pour l'étirer ensuite.

La conductibilité, suivant les proportions et le traitement, varie de 30 à 40 pour 100 de celle du cuivre. Elle peut se réduire même à 25 pour 100. On peut donc ainsi obtenir une très grande variété dans cette conductibilité et dans la résistance mécanique, pour composer des câbles avec une partie de cuivre pur et une partie

de fils composites, ce qui permet de réaliser toutes les combinaisons désirées.

M. Dennisson fait remarquer en outre que ces fils seraient heureusement appliqués dans la traversée des villages, de manière que la résistance mécanique des conducteurs soit telle que tous risques de rupture soient écartés; on éviterait ainsi les accidents particulièrement graves résultant de ces ruptures.



CHAPITRE V.

DRESSAGE.

Le dressage, comme le mot l'indique, est l'opération qui consiste à donner à une barre une forme rigoureusement rectiligne. Elle s'applique également aux tubes et aux fils métalliques. Nous ne parlerons pas ici du dressage des tôles.

Cette opération se complète assez souvent par un calibrage et un polissage, de sorte que, sans avoir recours au tour ou à la meule, on peut obtenir très rapidement et économiquement des pièces mécaniques de forme parfaite, telles que des axes, des tiges de commande, etc.

L'industrie automobile a beaucoup contribué au développement de ces procédés, d'abord parce qu'ils facilitent la fabrication en série de pièces détachées; en effet, les barres dressées sont employées dans les machines automatiques dites à *décolleter*; ensuite à cause de la plus grande sécurité que ces procédés semblent apporter. A ce point de vue, remarquons que l'étirage cache les défauts par le resserrement des fibres du métal; le travail au tour, quoique ne modifiant pas les qualités, ne permet pas de se rendre compte de l'homogénéité. Si, par exemple, une paille se trouve au cœur de la barre, le tour ne la révélera pas, tandis que par le dressage, cette barre s'ouvrira, ou, tout au moins, il se produira un défaut apparent qui la fera rejeter. D'autre part, comme cette opération ne comporte pas de recuit, donc pas de décapage aux acides, il n'y aura ni détérioration, ni décarburation superficielles.

Or, on sait que la décarburation empêche les aciers riches en carbone de prendre la trempe. On trouve donc des garanties supplémentaires venant compléter les résultats des essais de réception qui ont pu être faits au préalable.

Est-ce à dire que la sécurité soit complète ? Malheureusement non ; mais, d'après ce qui vient d'être dit, il semble bien qu'elle soit plus grande. Ce dressage détermine un écrouissage irrégulier ; certains points subissent des compressions, d'autres des tensions, et il est certain qu'en plusieurs endroits, la limite élastique a été dépassée. Si l'on pouvait utiliser cette barre sans déranger cet équilibre des tensions internes, il n'y aurait, sans doute, pas d'inconvénients à conserver l'écrouissage, mais il faut couper cette barre ; elle peut être entaillée légèrement, soit volontairement, soit accidentellement, elle aura à subir certains chocs ; alors il pourra se produire une rupture de cet équilibre, entraînant une déformation de la pièce, et c'est ainsi qu'il faut sans doute expliquer quelques accidents qui paraissent spontanés. Après la trempe, on constate souvent une déformation, surtout lorsqu'il s'agit d'une pièce longue et étroite, un arbre par exemple, mais comme elle est complètement finie, on est obligé de la redresser pour l'utiliser ; après un certain usage, ou une légère retouche à la meule, la pièce se déforme à nouveau. Ne s'est-il pas produit le phénomène indiqué plus haut ? L'hypothèse est vraisemblable.

Nous avons cherché à nous rendre compte de ce qui pouvait se passer dans les machines à dresser, afin d'établir une sorte de théorie du dressage.

Voici ce que cette recherche nous a suggéré :

L'opération de dressage doit conduire à deux résultats :

- 1^o Suppression des petites sinuosités ;
- 2^o Redressement des longues courbures.

Il semble logique, pour détruire les petites sinuosités, de faire glisser le fil (le raisonnement serait le même pour une barre) sur un appareil qui obligera successivement tous ses éléments à prendre

une courbure plus grande que celle de n'importe laquelle des sinuosités antérieures. Nous entendons le mot courbure dans le sens que les mathématiques lui donnent $\left(\frac{1}{R}\right)$.

En effet, raisonnons d'abord dans le plan pour simplifier.

Prenons un fil métallique (fig. 44), exerçons une traction suivant la direction T et une résistante R plus petite que T, de façon qu'il

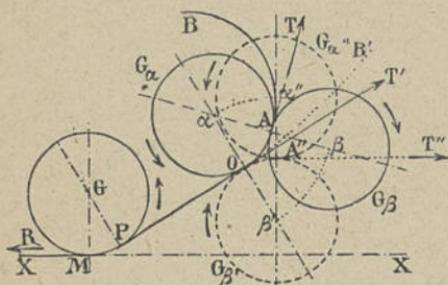


Fig. 44.

soit toujours tendu. Imaginons un galet G forçant le fil à s'appliquer sur un arc MP de sa circonférence. Enfin supposons que T n'agisse qu'en un point A du plan par lequel tous les points du fil viendront successivement passer, de sorte qu'immédiatement après A, le fil pourra reprendre toute sa liberté. On peut réaliser ceci par deux galets α et β tournant à la même vitesse, en sens inverse, et déterminant ainsi l'entraînement du fil tout en laissant à ce dernier toute sa liberté après qu'il a dépassé leur point de contact A.

R étant suffisamment grand, le fil s'appliquera parfaitement sur un arc du galet G, si le rayon de celui-ci est inférieur aux plus petits rayons de courbure des sinuosités du fil, car, de cette façon, la circonférence du galet et le fil ne seront jamais sécants. D'autre part, l'écroutissage qu'on fera subir ainsi au métal sera supérieur à tous les écroutissages antérieurs; par suite, ces derniers auront

été détruits et remplacés par d'autres; le fil en sortant de A aura donc perdu ses petites sinuosités.

Quelle direction ou plutôt quelle forme générale prendra-t-il après ce point ?

A priori, on peut dire qu'il prendra une forme circulaire B, tangente en A, au galet α et dont la courbe sera comprise entre la circonférence du galet α et sa tangente T au point A.

En effet, le fil s'est appliqué sur OA, il en a pris la forme et, comme après A toute action cesse, il devrait conserver cette forme. Mais nous supposons qu'il est fait d'une matière douée d'une certaine élasticité, il va donc se redresser, incomplètement toutefois.

Laissant le point α fixe, faisons tourner β pour l'amener en β' de façon que la ligne des centres des deux galets soit perpendiculaire à PA. L'arc OA devient nul, par suite le galet α n'a plus d'action et le fil devrait sortir droit. Mais l'arc MP a agi sur lui, aucune action en sens inverse n'étant intervenue, par l'élasticité du métal, le fil sortira en O, courbé suivant B', T ayant pris la direction T'. La courbure de B' sera plus petite que celle de B, par conséquent, on se rapproche de la droite. Que faut-il pour qu'il y ait dressage complet? Agir à partir de O de façon à reproduire en sens inverse l'action de l'arc MP. Pour cela, faisons tourner α en α'' autour de β' jusqu'à ce que $\alpha''\beta'$ soit parallèle à GM. T' vient en T'' parallèlement à la direction primitive XX.

Les arcs MP et OA'' sont égaux (si l'on a pris soin de donner à tous les galets le même rayon), leur courbure est en sens inverse, le fil sort donc dressé.

D'où la règle suivante :

Pour dresser un fil (ou une barre), il faut :

1^o Supprimer les petites sinuosités en faisant appliquer ce fil sur un arc de cercle dont le rayon est plus petit que n'importe lequel des rayons de courbure de ces sinuosités;

2^o Appliquer ce fil sur un autre arc semblable au premier, mais présentant sa convexité en sens inverse.

Si l'on pouvait réaliser rigoureusement ces deux opérations, il suffirait d'un seul passage pour obtenir le parfait dressage. Mais, dans la pratique, cela est presque impossible; aussi, pour beaucoup de machines, il faut recommencer l'opération plusieurs fois, par un mouvement de va-et-vient; en général, on préfère, et cela revient au même, placer, à la suite les uns des autres, une série de dispositifs identiques, qui constituent par leur ensemble une même machine, cela permet alors de n'effectuer qu'un petit nombre de passages.

On n'emploie pas toujours des galets pour le dressage grossier



Fig. 45.

des fils fins, mais simplement des clous. Il suffit d'en fixer deux l'un près de l'autre et de faire passer le fil entre eux comme l'indique la figure 45. Pratiquement, on en met trois, cela facilite l'opération, car la résistance à T étant plus grande, le fil s'applique mieux et le dressage est meilleur, d'autant plus que l'opération est double par suite du passage entre 1 et 2 puis entre 2 et 3.

Jusqu'ici nous avons raisonné dans le plan de la figure. Pour avoir un dressage complet, il faut opérer dans deux plans rectangulaires. On y arrive par deux procédés :

1^o En disposant deux séries d'appareils dans des plans perpendiculaires l'un à l'autre. Cette disposition est employée dans les machines à galets qui dressent les fils et les barres de petit diamètre.

2^o En utilisant un seul ensemble d'appareils auquel on donne un mouvement de rotation assez rapide. Une autre méthode, qui se rattache à cette dernière, consiste à laisser la machine fixe et à faire tourner la barre sur elle-même.

1^o *Machines à galets.* — Elles conviennent au dressage des fils

de toutes sortes et des barres dont le diamètre ne dépasse guère 15^{mm}. Elles se composent (*fig. 46*) d'un groupe de 7 petites poulies en acier trempé disposées dans un plan vertical sur deux lignes horizontales; le fil circule donc entre 4 poulies inférieures et 3 poulies supérieures, ces dernières étant placées dans les intervalles des premières et de telle sorte que le fil serpente en présentant trois convexités tournées vers le bas et deux seulement vers le haut. Un mécanisme de réglage permet de donner l'écartement voulu à ces deux lignes de galets. Un deuxième groupe, semblable

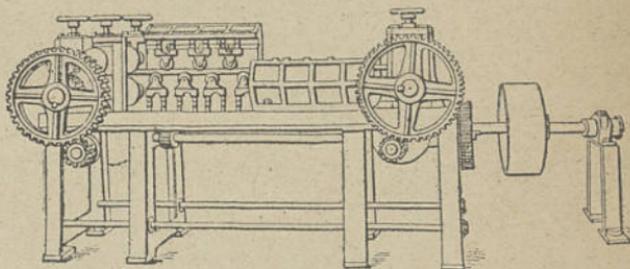


Fig. 46.

au précédent, fait suite, mais son plan est horizontal. Enfin l'avancement du fil est obtenu à la sortie par des cylindres entraînés mécaniquement. Il faut remarquer que l'entraînement est ici indépendant du dressage. Nous verrons d'autres machines où l'appareil de dressage proprement dit entraîne la barre; mais cela n'est pas appliqué pour les fils. La machine représentée par la figure 46 convient surtout aux barres de section carrée, hexagonale ou octogonale.

Généralement, ces machines sont complétées par une sorte de cisaille qui coupe, à la longueur voulue, les tiges dressées sortant de la machine. La force nécessaire pour dresser des barres de 15^{mm} est d'environ 4 chevaux, la vitesse de passage, 8^m à la minute.

Pour les fils fins, on opère sur plusieurs brins à la fois, six ou huit en général, les galets sont remplacés par des espèces de filières

dont les ouvertures sont juste du diamètre des fils, si bien qu'il n'y a dans le passage aucune réduction de leurs sections. Le principe reste le même évidemment, mais l'avancement des fils est obtenu par le déplacement automatique d'une sorte de pince à mâchoire multiple.

2^o *Machines à coussinets.* — Les machines à galets présentent de grands inconvénients. D'abord elles ne sont pas assez robustes pour supporter les efforts importants que nécessite l'opération dès qu'on doit travailler des barres d'un diamètre supérieur à 20^{mm}. D'autre part, les axes de ces galets s'usent assez rapidement, malgré le graissage et la bonne qualité du métal avec lequel ils sont faits, et si cette usure est irrégulière et les décentre, même très légèrement, ils ne tournent plus. Ils agissent alors comme des coussinets, c'est ce qui a donné l'idée de les remplacer par des pièces de bronzes fixes dont on règle la position au moyen de vis et sur lesquelles la barre frotte. Ces coussinets sont fixés à un cadre qui tourne; il n'y en a donc qu'un seul groupe. Les différences qu'on rencontre dans ces machines, qui semblent mieux convenir aux diamètres moyens de 4 à 25^{mm}, portent sur la forme et le nombre des coussinets.

Quelques-unes en ont trois seulement, en général cinq; en tout cas, toujours un nombre impair; cela résulte de la nécessité de faire sortir le fil de l'appareil exactement dans le prolongement de la direction qu'il avait à l'entrée. Pour les gros diamètres, ils sont formés d'une pièce de bronze de section carrée percée transversalement d'un trou du diamètre de la barre. Souvent, cette pièce de bronze n'est pas percée et elle agit simplement par son extrémité qui appuie fortement sur la barre. Enfin on applique aussi une disposition mixte (*fig. 47*) entre la machine à galets et la machine à coussinets. Le cadre existe toujours, mais les coussinets sont remplacés par des galets; il y en a trois ou cinq également, ils ont des surfaces concaves et peuvent être rapprochés ou éloignés les uns des autres de façon à serrer plus ou moins la barre. Pour bien saisir la barre, on ajoute toujours un galet supplémentaire qui ne

sert pas au dressage; il est placé en regard du premier et non dans un intervalle. Le cadre peut tourner dans les deux sens au moyen de poulies et de courroies droites et croisées. Les axes des galets ne sont pas perpendiculaires à celui de la barre, mais inclinés sur lui d'un angle qui varie avec le diamètre de celle-ci. Dans toutes les machines dont nous avons parlé, l'avancement se fait par des galets ou des cylindres spéciaux; ici, au contraire, il se produit de lui-même par la rotation du cadre et l'inclinaison des galets. A droite et à gauche de l'appareil se trouvent des voies de roule-

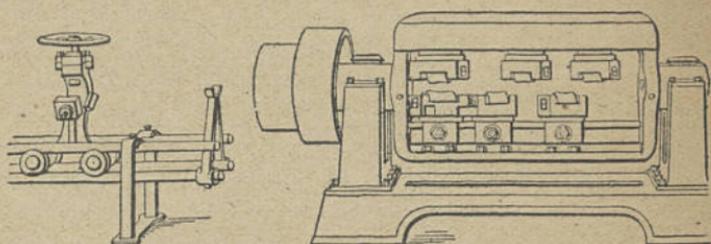


Fig. 47.

ment sur lesquelles circulent deux petits chariots à roulettes qui supportent la barre et se déplacent avec elle. On peut ainsi dresser des arbres de 25 à 60^{mm} et des tubes en acier de 25 à 100^{mm} de diamètre. Il faut quelquefois plusieurs mouvements de va-et-vient avant d'arriver au parfait dressage. Le rendement varie de 4 à 6^m à la minute. Il dépend évidemment de l'épaisseur du tube, ou du diamètre de la barre, ainsi que des courbures primitives.

Il existe un autre type de machine à dresser les barres dont le principe repose aussi sur les règles que nous avons établies au début de ce Chapitre. Ces machines agissent un peu à la façon d'un laminoir auquel on demanderait, non pas de diminuer la section, mais de faire subir à tous les éléments de la barre, successivement, des courbures déterminées, de façon à produire le dressage. On voit tout de suite les différences qu'il y a entre ces machines et celles dont nous avons parlé jusqu'ici. D'abord

leur mécanisme de dressage est fixe, la barre seule tourne sur elle-même; l'avancement est produit par l'inclinaison des axes des cylindres, enfin ces derniers tournent sur eux-mêmes, entraînés par des transmissions spéciales.

La machine Perdrizet (*fig. 48*) que nous allons décrire donne en une seule passe, un dressage très satisfaisant; elle convient aux barres et aux tubes et peut même servir à leur polissage. Elle se compose d'un bâti très solide de deux rouleaux calés sur des axes en acier tournant dans des coussinets de bronze qui sont

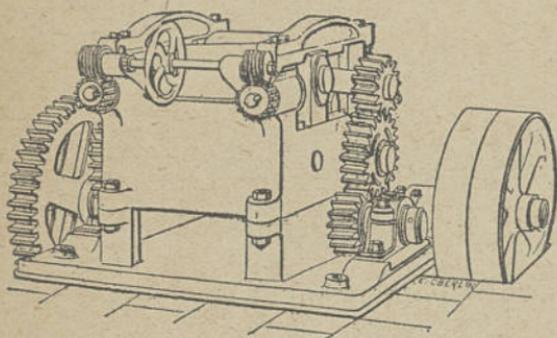


Fig. 48.

encastrés dans des boîtes de fonte pouvant coulisser horizontalement sur le bâti. Les rouleaux sont de fonte moulée en coquille lorsque le dressage est fait à chaud, et d'acier coulé s'il est fait à froid.

Leurs formes sont inverses, c'est-à-dire que l'un présente une surface concave et l'autre porte un renflement circulaire en son milieu, de sorte que la barre, pour ainsi dire, laminée par ces deux cylindres, s'appuie sur les trois parties saillantes.

Les axes ne sont pas horizontaux, mais inégalement inclinés, ceci produit l'avancement de la barre qui est, en plus, soutenue pendant tout le passage, à la partie inférieure, par une sorte de règle-guide à section prismatique. De cette façon, la barre se trouve

ployée entre les trois points de contact des cylindres qui, de plus, la font tourner sur elle-même; il en résulte une sorte de pli rotatif qui la dresse parfaitement. Elle sort ensuite de la machine soutenue par des guides extérieurs réglables.

Si les axes des cylindres étaient fixes, l'appareil ne pourrait servir que pour des diamètres déterminés, mais ils peuvent se déplacer parallèlement à eux-mêmes; l'un d'eux, en particulier, a ses deux coussinets reliés par des vis sans fin à un volant à main,

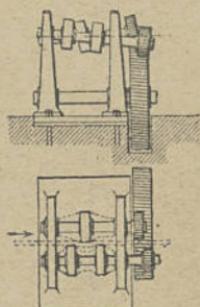


Fig. 49.

de sorte qu'en fixant le premier, on règle exactement l'écartement en agissant sur le second. La vitesse de passage varie de 5 à 6^m à la minute et 8 numéros de machines, qui correspondent à des puissances différentes, peuvent se répartir le dressage de barres et de tubes dont les diamètres sont compris entre 6 et 250^{mm}. De 6 à 20^{mm} on emploie une seule machine qui reçoit son mouvement par poulies et courroies; pour les autres, la transmission se fait par un harnais d'engrenages.

En remplaçant les rouleaux par d'autres présentant des formes telles que la barre puisse subir une série de sinuosités au lieu du pli unique dont il a été question plus haut, on arrive à écrouter, polir et cylindrer, après plusieurs passages, des barres brutes. Celles-ci peuvent alors servir au décolletage, tout aussi bien que

les barres étirées; leurs surfaces sont parfaitement lisses, sans croûte dure, et leurs diamètres tout à fait uniformes.

Il existe des modifications de ce type de machine. Nous avons dit que la barre était ployée entre trois points résultant des contacts entre elle et les deux cylindres. Il est évident qu'en dehors de ces trois points les cylindres sont totalement inutiles; on conçoit donc qu'on puisse les remplacer par trois galets cylindriques. On a ainsi une machine plus simple, moins robuste peut-être. Le croquis ci-contre (*fig. 49*) montre la disposition de ces galets; les axes sont inclinés sur l'horizontale, comme précédemment, afin d'obtenir l'avancement de la barre.

Quelle que soit la disposition adoptée, il y a une difficulté de

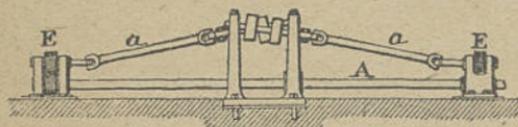


Fig. 50.

construction qui résulte, d'une part, de cette inclinaison des axes et, d'autre part, de la nécessité, pour le réglage, du déplacement de l'un par rapport à l'autre. En effet, comment peut-on communiquer le mouvement à l'appareil? Un moyen très simple consiste à employer des transmissions à la Cardan. Pour cela, chaque arbre est actionné séparément l'un à droite, l'autre à gauche, comme le montre la figure 50.

Dans ces conditions, le réglage est très aisé, il suffit de prévoir l'allongement des arbres à la Cardan par des manchons spéciaux. L'arbre A est moteur, il transmet son mouvement à des engrenages E qui agissent sur les deux arbres a, les manchons permettent le réglage qui est obtenu par un volant à main qui ne figure pas sur le croquis. On peut aussi employer tout simplement des engrenages qui sont calés sur les axes des cylindres, mais leurs dentures

étant établies de façon à pouvoir rester en prise après le réglage de l'écartement.

La mise en marche est obtenue par un manchon à griffes que l'on déplace par un levier.

Le sens de rotation des cylindres est le même, de sorte que la barre prise entre eux deux roule sur elle-même; c'est, on le voit, une différence avec les laminoirs auxquels nous comparions tout à l'heure ces machines, car, dans ceux-ci, les cylindres tournent en sens contraire. Il faut remarquer aussi que la barre ne pénètre pas perpendiculairement à leur axe, mais obliquement.

Il existe encore un autre type de machine à dresser dont nous ne dirons qu'un mot, car il n'est pas très répandu. C'est une modification du précédent; au lieu d'avoir trois galets montés sur deux axes, ils sont indépendants, reçoivent chacun séparément leur mouvement de rotation et présentent une gorge. Les axes inclinés sur l'horizontale sont tous dans des plans verticaux parallèles. Le principe est le même, il consiste à obtenir un pli rotatif.

Nous avons étudié les principales machines à dresser les barres, il existe des variantes; mais, en somme, toutes s'appuient sur les règles que nous avons énoncées au début, les différences résident dans le procédé mécanique employé pour appliquer ces règles. Nous terminerons en disant que les machines à cylindres semblent être les plus pratiques à cause de leur robustesse; c'est sans doute pourquoi elles sont les plus répandues. Celles à galets (nous ne voulons pas parler de celles qui se rattachent aux machines à cylindres) ne conviennent que pour les fils. Enfin, celles à coussinets sont de moins en moins employées à cause de l'usure qu'elles offrent. On est, en effet, obligé de faire ces coussinets en bronze, car s'ils étaient en acier, il y aurait grippage; d'autre part, elles agissent par frottement et non par roulement; la barre est donc toujours un peu détériorée, souvent même rayée profondément.

Nous signalerons aussi un nouveau type de machine qu'une maison anglaise vient de créer pour redresser les barres et les tubes.

Le mécanisme de dressage consiste en deux rouleaux en acier

forgé, commandés par des engrenages actionnés par un moteur électrique à vitesse variable. Ces deux rouleaux entraîneurs ont des axes qui font un angle de 20° avec l'horizontale, de sorte qu'ils communiquent à la barre en cours de redressement un mouvement d'avancement longitudinal en même temps qu'un mouvement de rotation. La barre est tenue fermement en contact avec les rouleaux au moyen de trois galets fous. Deux d'entre eux sont placés juste en face des rouleaux entraîneurs, tandis que le troisième est placé à mi-distance entre les deux premiers. Ces galets fous ont également leurs axes à 20° , mais dans une direction opposée à celle des galets entraîneurs. C'est le galet intermédiaire qui constitue l'organe de redressement, on l'applique plus ou moins énergiquement, par un système à vis, sur la barre, en tenant compte du diamètre de celle-ci et, s'il s'agit d'un tube, de l'épaisseur de sa paroi.

Les rouleaux ont un contour tel que la barre a une ligne de contact avec eux sur toute leur longueur. On évite ainsi des rayures en hélice sur la surface de la pièce à dresser; de plus, dans le cas d'un tube mince, la surface de contact étant plus grande, l'écrasement n'est pas à craindre. Il est évident que cette ligne de contact n'est pas réalisable pour tous diamètres des barres, avec les mêmes rouleaux entraîneurs; mais, dans la pratique, la différence, quand elle n'est pas trop importante, n'apporte pas d'inconvénients.

Quant aux galets fous, ceux-ci ayant la possibilité de prendre une inclinaison variable, un simple réglage permet de les faire s'appliquer aussi exactement que possible sur la barre à dresser. Ils peuvent d'ailleurs être avancés ou reculés, suivant le besoin. Ces galets sont montés sur des coussinets en bronze phosphoreux, mais pour les machines destinées à dresser des petits tubes polis, ils sont montés sur des roulements à billes.

Le seul réglage est celui des galets fous, comme nous l'avons dit, et une fois fait pour une barre de diamètre déterminé, il n'y a plus à y retoucher pour toutes les autres barres venant ensuite à la machine. La vitesse d'avancement varie de 7 à 21^m par minute. La machine peut être mise en marche arrière, de sorte que la barre

peut, si cela est nécessaire, subir plusieurs fois de suite l'opération; après chaque passe, on serre le galet de dressage et l'on arrive ainsi progressivement à un dressage parfait. Très souvent cependant, le résultat est obtenu en une seule passe.

La machine travaille tous les métaux, les aciers au carbone, les aciers spéciaux, soit recuits, soit écrouis. Elle a l'avantage d'améliorer l'aspect de la surface des pièces qu'elle travaille. Elle convient pour les tubes étirés sans soudure aussi bien que pour ceux qui sont soudés par recouvrement ou par rapprochement, qu'ils soient en laiton, en cuivre, en fer ou en acier. Il existe trois types de ces machines qui demandent respectivement 20, 36 et 74 chevaux. Le premier type opère sur les barres de 6^{mm},5 à 38^{mm} de diamètre et sur les tubes de 12^{mm},5 à 101^{mm},5, le deuxième sur les barres de 19 à 89^{mm} et sur les tubes de 25 à 101^{mm},5; enfin le troisième sur les barres de 76 à 152^{mm} et sur les tubes de 101^{mm},5 à 305^{mm} de diamètre.

Pour finir, signalons le dressage à chaud des fils destinés à la fabrication des aiguilles à coudre.

Le métal employé est de l'acier demi-dur de très bonne qualité; il provient surtout des aciéries de Scheffield; les fils sont coupés sur une longueur représentant le double de celle des aiguilles finies qu'on se propose d'obtenir, car les machines travaillent deux aiguilles à la fois; on les sépare ensuite, entre les deux têtes, par un léger coup d'une meule très fine, suivi d'un pliage.

Il faut avant toute fabrication dresser ces brins; cette opération est pratiquée à chaud et en paquet.

On réunit, en une botte de 15 à 20^{cm} de diamètre, ces fils coupés au préalable de la longueur voulue; on porte au rouge cerise, ensuite on introduit cette botte dans deux anneaux d'acier ayant 20 à 22^{cm} de diamètre intérieur et de section carrée (25 × 25^{mm}).

Les deux anneaux disposés verticalement sont distants de quelques centimètres. Entre eux on pose horizontalement, et sur les fils encore rouges, une barre de fer de section carrée dont les deux extrémités sont dans les mains d'un ouvrier qui, tout en

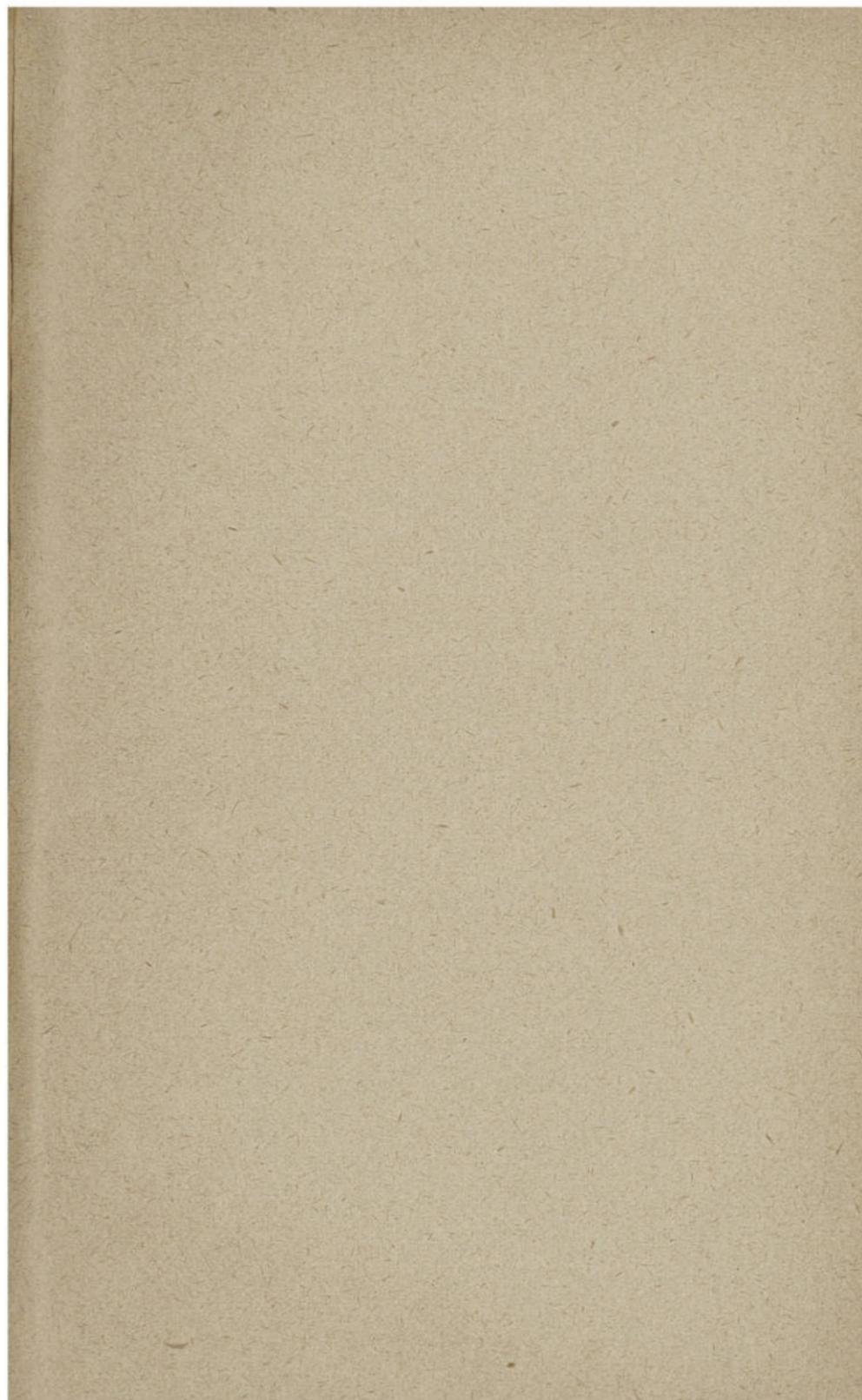
appuyant vigoureusement, fait rouler tout l'ensemble sur un marbre, de droite à gauche et de gauche à droite.

Les brins, roulant les uns contre les autres, se dressent d'une façon parfaite en quelques instants et le refroidissement leur donne la rigidité nécessaire; après fabrication, une trempe, également en paquet, est pratiquée.



TABLE DES MATIÈRES

| | Pages. |
|---|--------|
| CHAPITRE I. — Propriétés des produits métallurgiques..... | 1 |
| CHAPITRE II. — Recuit et écrouissage..... | 41 |
| CHAPITRE III. — Étirage..... | 97 |
| CHAPITRE IV. — Tréfilage..... | 143 |
| CHAPITRE V. — Dressage..... | 221 |



MANUEL DE L'OUVRIER-MÉCANICIEN

Ces ouvrages clairs et précis sont à la portée de tous ceux qui, dès l'apprentissage, cherchent à se familiariser avec les procédés industriels modernes en dehors des formules compliquées ou des études superficielles par correspondance : le **chef d'atelier**, le **chef d'usine**, y trouveront un moyen commode d'augmenter leurs connaissances pratiques, tandis que l'**ouvrier-mécanicien** ainsi que l'élève des écoles ou des cours professionnels y puiseront un enseignement complémentaire rendant leur travail plus intéressant et leur salaire moins machinal.

La preuve en est faite par le succès de ces volumes de 300 pages environ dont, au surplus, le prix unitaire est fort modéré.

| | |
|--|--------|
| I — Mécanique générale, Carnet du Mécanicien | 9 fr. |
| II — Outils, Machines-outils (n° 1) | 6 fr. |
| III — Forge, Fonderies | 6 fr. |
| IV — Engrenages, Transmissions | 6 fr. |
| V — Chaudronnerie, Tuyautages | |
| VI — Machines et Turbines à vapeur | |
| VII — Moteurs à gaz et à huile | 15 fr. |
| VIII — Hydraulique | 6 fr. |
| IX — Tour, Filetage | 6 fr. |
| X — Dessin d'Atelier | 12 fr. |
| XI — Outils et Machines-Outils (n° 2) Travail du Bois | |
| XII — Outils et Machines-Outils (n° 3) Précision, Calibres | |
| XIII — Les Chaudières et la Vapeur | |

Envoi dans toute l'Union Postale contre mandat-poste ou valeur sur Paris
Frais de port en sus (Chèques postaux : Paris 29.323)

Couleurs. — Exécution. — Lavis. — Teintes conventionnelles. — Chiffres et Ecritures. — Organisation et Archives. — Reproduction des plans. — Tirages.
Courbes et tracés usuels (Petit cours de *Géométrie descriptive* pour les tôliers et les traceurs).
Vérification et Calibres. — Jeux et tolérances. — Exemples. — Fabrication du Crayon. — Fabrication des Plumes métalliques.

XI. — Outils et Machines-Outils (n° 2) : Travail du Bois. 3^e mille

Essences. — Bois industriels. — Dimensions commerciales. — Défauts. — Abatage. — Notions de Sylviculture. — Travail manuel. — Machines-Outils. — Mode d'action des outils à bois. — Scies et Dentures. — Fabrication des Scies. — Outillage américain. — Abatage mécanique. — Scies alternatives, à ruban, circulaires. — Vitesses. — Dents serties. — Dents écrasées. — Réglages. — Soudure à l'argent. — Instructions de constructeurs. — Affûtage des outils, des scies. — Mesures de sécurité. — Assemblages. — Repères professionnels. — Machines diverses à corroyer. — La Contre-plaque. — Profils usuels.

XII. — Outils et Machines-Outils (n° 3) : Précision et Calibres. 3^e mille

Ajustage manuel. — Interchangeabilité. — Traçage. — Appareils de mesure — Instruments et Outillage. — Propriété des aciers. — Traitement des Outils : Forgeage, Recuit, Trempe, Revenu, Redressage, Cémentation. — Soudage. — Aiguisage. — Exemples de traitement d'Outils variés.
Matériel d'Outillage. — Fours et Bassins. — Températures. — Pyromètres.
La Vérification. — Etalons. — Jauges. — Calibres. — Appareils de haute précision. — Diviseurs. — Instruments vérificateurs. — Méthode optique *Devé*. — Calibres de filetage.

XIII. — Les Chaudières et la Vapeur 9^e mille

Notions générales sur la *Vapeur*. — Foyer. — Cheminée. — Diverses formes de chaudières. — Tubes. — Appareils de sûreté et d'observation. — Alimentation. — Incrustations et désincrustants. — Accidents des chaudières. — Surchauffe. — Conduite et entretien des chaudières. — Allumage. — Niveau de l'eau. — Décrassage et Ramonage. — Chargement mécanique.
Quelques chaudières marines. — Surveillance des feux. — Chauffage au mazout.

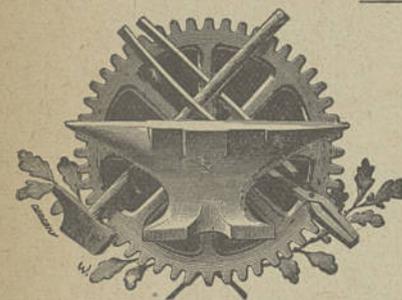
En préparation :

XIV. — Electro-Mécanique. | XV. — Air comprimé.

GAUTHIER-VILLARS & C^{ie}

55, Quai des Grands-Augustins, PARIS-VI^e

COLLECTION BERNARD TIGNOL



Manuel de L'Ouvrier Mécanicien

par G. FRANCHE, Ingénieur A. & M. — E C P

I. — Mécanique générale 11^e mille

Organes élémentaires. — Statique. — Cinématique. — Dynamique. — Calcul graphique. — Pesanteur. — Transformation du mouvement. — Balances. — Poulies. — Palans. — Vis. — Choc. — Vitesse. — Frottement. — Mouvement perpétuel. — Théorie mécanique de la chaleur.

CARNET DU MÉCANICIEN, recueil de formules simples, de renseignements usuels et de tables numériques :

Surfaces. — Volumes. — Densités. — Résistance des matériaux. — Chaleur. — Vitesses d'outils. — Trigonométrie. — Vocabulaire de mots techniques. — Règle à calculs (mode facile d'emploi).

II. — Outils et Machines-Outils 12^e mille

Travail du Bois : Division et Emploi des diverses essences. — Cubage. — Défauts. — (Le tome XI développe cette première partie).

Travail des métaux : Scies. — Perceuses. — Tours. — Métaux usuels. — Trempe. — Recuit. — Mesures de sécurité. — Ajustage. — Montage. — Accessoires et Outillage. — Outils simples. — Outils pneumatiques. — Outils rapides. — Fraisage. — Meules. — Rectification. — (Le tome XII développe quelques-uns de ces chapitres.)

- III. — Forge et Fonderies..... 8^e mille**
 Essais du fer. — Corps étrangers. — Outils et Outillage de forge. — Feu. — Forgeage. — Soudure. — Transformation du métal. — Marteaux pneumatiques. — Ventilateurs. — Fours. Fonderie ordinaire. — Défauts de la fonte. — Formes. — Fusion. — Cubilots. — Pression du vent. — Fours. — Moules. — Matériel. — Trousses. — Sables. — Coulée.
 Acier moulé. — Fours à sole. — Convertisseurs.
 Fonte malléable. — Fonderie de cuivre. — Aluminium.
 Moulage mécanique. — Soudure autogène et Découpage au chalumeau.
- IV. — Engrenages et Transmissions..... 9^e mille**
 Engrenages cylindriques, coniques et autres. — Tracé et calcul des dentures. — Epicycloïde. — Développante. — Engrenages intérieurs. — Crémaillère. — Lanterne. — Méthodes de Willis, de Poncelet. — Vjs sans fin. — Dentures à chevrons. — Transmissions fixes. — Arbres. — Assemblages. — Embrayages. — Poulies. — Montage. — Mesures de sécurité. — Maniement des courroies. — Transmissions mobiles, transmissions flexibles. — Grues. — Ponts roulants.
- V — Chaudronnerie, Tuyautages..... 12^e mille**
 Assemblages. — Rivure. — Matériel pneumatique. — Perceuses et Poinçonneuses. — Boulons. — Taraudage. — *Tracés pratiques* : Sections coniques et épures, Courbes usuelles, Développements de tôle, Coudes et Embases de tuyaux, Intersections et Pénétrations, etc.
Chaudronnerie de fer : Dressage des tôles et des fers, Découpage, Emboutissage, Perçage, Meulage, Montage, Rivure. — Outillage ordinaire à la main. — Façonnage des tuyaux à haute pression.
Chaudronnerie de cuivre : Envirolage, Agrafage, Soudure, Brasure, Rivure, Finition. — Travail manuel — Emboutis. — Planage. — Coquilles. — Tuyautage et Tours de main. — Brides. — Tubulures. — Dudgeonnage des condenseurs. — Serpentins.
- VI. — Machines et Turbines à vapeur..... 13^e mille**
 Notions générales sur leur fonctionnement. — Principes physiques et mécaniques. — Classification. — Distribution. — Excentriques. — Tiroirs et Organes de détente. — *Corliss*. — Compound et Multiple expansion. — Régulateurs. — Echapement central. — Commandes. — Servo-moteur et coulisses. — Disposition des cylindres. — Presse-étoupe et Garnitures modernes. — Diagrammes. — Régulation. — Epure circulaire. — Graissage des alternatives et des turbines. — Condensation. — Réfrigérants. — Locomobiles et Mi-fixes. — Tuyautages.

Fondations. — Précautions générales. — Accouplement de moteurs. — Mise en route. — Conduite et entretien. — Soins à donner. — Instructions diverses de constructeurs.
 Turbines et stations centrales.

- VII. — Moteurs à gaz et à huile..... 11^e mille**
 Historique. — Théorie et Formules pratiques. — Diagrammes et essais. — Freins. — Consommation. — Mode de réglage. — Combustibles. — Généralités sur les installations. — Petits moteurs agricoles et industriels. — Degré d'irrégularité et volants. — Démarrage. — Moteurs à gaz de grande puissance. — Accidents et palliatifs. — Moteur *Diesel*. — Compresseurs et réservoirs. — Moteur *Still*. — Moteur *Hvid*. — Pompe, aiguille, solid-injection, changement de marche. — Graissage. — Moteurs semi-Diesel. — Huiles combustibles pour Diesel et essais. — Pompe *Humphrey*. — Gazogènes au gaz pauvre. — Epuration. — Moteurs d'automobiles. — Formules spéciales. — Graissage des autos. — Moteurs rotatifs.

- VIII. — Hydraulique..... 7^e mille**
 Hydrostatique et Hydrodynamique. — Ecoulement de l'eau. — Trajectoire de la veine liquide. — Déversoirs, Vannes, Barages. — Roue en dessus et détails. — Roue de poitrine, Roue de côté, Roue *Sagebien*, Roue *Poncelet*. — Rendement. — Turbines. — Tracé des aubes. — Vannages. — Hydro-pneumatisation. — Turbines *Hercule*. — Turbines américaines. Pompes à piston. — Manèges. — Grands services — Pompes de divers systèmes. — Béliers. — Haute chute. — Pompes centrifuges. — Canalisations et accessoires.

- IX. — Tour et Filetage..... 6^e mille**
 Travail à la main : tour d'horloger, bidet. — Centrage. — Vitesses. — Tours de précision. — Outils de tour. — Façonnage des outils. — Tour à engrenages. — Tour parallèle. — Tour en l'air. — Alésage. — Filetage et sa pratique. — Divers systèmes de filets. — Notions succinctes de *Métallographie*. — Acier au carbone. — Acier rapide. — Meulage. — Trempe, Recuit. — Renvoi et accessoires de tour.
 Tours verticaux. — Tours revolver. — Tours à bois. — Tours à repousser.

- X. — Dessin d'atelier..... 10^e mille**
 Lecture des plans. — Définitions et conventions. — Coupes. — Hachures. — Cotes. — Echelles. — Exemples simples et Exercices. — Lettres de référence. — Applications diverses et graduées.
 Tracé des plans. — Dessin industriel. — Croquis, Schémas, Esquisses. — Croquis et Dessin à la plume. — Bagage du Dessinateur. — Entretien des compas. — Pinceaux, Godets et



BULLETIN DE COMMANDE

Veillez trouver, inclus, une valeur de exemplaire
 pour
 d volume ci-après :
 N°
 N°
 N°
 N°

Nom : le 192

Adresse :

LIBRAIRIE GAUTHIER-VILLARS ET C^e

55, QUAI DES GRANDS-AUGUSTINS, PARIS (6^e)

Envoi dans toute l'Union postale contre mandat-poste ou valeur sur Paris.
Frais de port en sus 10%. (Chèques postaux : Paris 29,323) R. C. Seine 22520.

FRANCHE (Georges), Ingénieur-Mécanicien (Arts et Métiers, E.C.P.). — **Manuel de l'Ouvrier Mécanicien**, 13 volumes in-16 avec nombreuses figures dans le texte.

| | |
|--|---------------------|
| I — Mécanique générale, <i>Carnet du Mécanicien</i> | 9 fr. |
| II — Outils, <i>Machines-outils</i> (n° 1)..... | 6 fr. |
| III — Forge, <i>Fonderies</i> | 6 fr. |
| IV — Engrenages, <i>Transmissions</i> | 6 fr. |
| V — Chaudronnerie, <i>Tuyautages</i> | <i>Sous presse.</i> |
| VI — Machines et Turbines à vapeur..... | <i>Sous presse.</i> |
| VII — Moteurs à gaz et à huile..... | 15 fr. |
| VIII — Hydraulique..... | 6 fr. |
| IX — Tour, <i>Filetage</i> | 6 fr. |
| X — Dessin d'atelier..... | 12 fr. |
| XI — Outils et Machines-Outils (n° 2). <i>Travail du Bois</i> <i>Ss. presse.</i> | |
| XII — Outils et Machines-Outils (n° 3). <i>Précision, Calibres.</i> <i>Ss. presse.</i> | |
| XIII — Les Chaudières et la Vapeur..... | <i>Sous presse.</i> |

GAGES (L.), Capitaine d'Artillerie. — **Travail des métaux dérivés du fer.** In-8 (19-12), avec 43 figures; 1900. Broché..... 3 fr. 75

— **Élaboration des métaux dérivés du fer.**

I. *Foyers métallurgiques*, avec 22 figures. II. *Réactions métallurgiques*, avec 17 figures. 2 vol. in-8 (19-12), 1902, se vendant séparément. Broché..... 3 fr. 75

GHERSI (J.). — **Formulaire industriel. (Recettes utiles)**. Procédés utilisés dans les arts, les métiers et l'Industrie. Caractères, essai et conservation des substances naturelles et artificielles d'usage commun. Deuxième édition. In-16 (18-12) de 508 pages; 1920..... 10 fr.

GRIMSHAW (Robert M.-E), Ingénieur-Mécanicien. — **L'atelier moderne de constructions mécaniques.** — *Procédés mécaniques spéciaux et tours de main*. Traduit de l'anglais par A.-N. LATTUGA. 2 volumes in-8 (23-14), se vendant séparément :

I^{re} série : Volume de 394 pages, avec 222 figures; 1903..... 20 fr.

II^e série : Volume de 378 pages, avec 593 figures; 1906..... 20 fr.

LEDEBUR (A.), Professeur à l'Académie des Mines de Freiberg (Saxe). — **Traité de Technologie mécanique métallurgique.** Traduit sur la 2^e édition allemande par G. HUMBERT, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, et un APPENDICE sur la sécurité des ouvriers par M. JOLY. In-8 (25-16) de iv-740 pages, avec 72 figures. Nouveau tirage.....

TRICOT (E.). — **Formulaire du métallurgiste.** U (12-9,5), de 68 pages, 5^e édition revue et au cartonné.....