Zeitschrift: Archives des sciences physiques et naturelles

Herausgeber: Société de Physique et d'Histoire Naturelle de Genève

Band: 7 (1925)

Artikel: Étude du frottement intérieur de minces fils d'invar aux températures élevées

Autor: Biéler-Butticaz

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-740664

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 07.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

ÉTUDE

DU

Frottement intérieur de minces fils d'invar

AUX TEMPÉRATURES ÉLEVÉES

PAR

Mme BIÉLER-BUTTICAZ [1]

(Avec 3 fig.)

I. Introduction.

Les solides présentent une certaine viscosité qui se fait remarquer tout particulièrement lorsque des fils travaillent à la torsion. Abandonnés à eux-mêmes, ces fils effectuent une série d'oscillations qui sont toujours amorties; cet amortissement est dû au frottement intérieur, soit à la viscosité.

Pour trouver une loi permettant d'exprimer ce phénomène, divers auteurs ont considéré le frottement intérieur comme proportionnel à la vitesse ou au carré de la vitesse angulaire de l'oscillation, et ont envisagé aussi l'existence d'une propriété particulière aux solides, la réactivité élastique ou élasticité retardée. Dans l'étude expérimentale de ce phénomène, on peut citer aussi des travaux récents qui se rapportent à l'influence, sur le frottement intérieur global, de la température et des traitements antérieurs auxquels on a soumis le solide.

[1] Ce travail a été effectué au Laboratoire de Physique de l'Université de Genève, à l'instigation et avec les conseils de M. le Professeur Ch.-E. Guye. Que M. Guye veuille bien trouver ici l'expression de notre vive gratitude et de notre très haute estime.

Ces variations du frottement intérieur pour un même corps peuvent être partiellement expliquées par l'agitation thermique des molécules et par des phénomènes d'orientation moléculaire. On a aussi rapproché le frottement intérieur de l'hystérésis magnétique. L'étude de cette question est intéressante encore parce qu'elle peut aider à déceler des points de transformation de la matière.

Coulomb, puis Meyer ont étudié, les premiers, le frottement intérieur des solides [1], puis divers auteurs ont cherché à en établir la théorie. Gauss remarqua l'influence de la durée de la charge. Enfin, dans de nombreuses recherches expérimentales, on a étudié l'influence sur le frottement intérieur global de facteurs tels que température, longueur et diamètre des fils, amplitude et période des oscillations, accommodation, etc.

Depuis plusieurs années, toute une série de travaux sur ce sujet ont été effectués à l'Université de Genève, sous la direction de M. le Professeur Ch.-E. Guye. Leur objet a été l'étude du frottement intérieur des métaux, des verres et du quartz, à des températures variant de — 195° à + 400°. Ces recherches ont montré l'augmentation considérable que subit, en général, l'amortissement des oscillations aux températures élevées, ainsi que la diminution de l'amortissement aux basses températures [2]. Le *décrément logarithmique* des oscillations est considéré comme permettant une sorte d'évaluation indirecte du frottement intérieur [3]. Pour les fils de verre, ce décrément s'est montré indépendant de l'amplitude des oscillations; pour les métaux par contre il augmente avec l'amplitude. Parmi toutes ces recherches faites à Genève, nous ne citerons que celles qui ont quelque rapport avec notre étude.

En 1908, MM. Guye et Mintz [4] ont trouvé que le décrément de divers fils métalliques suspendus varie avec le temps mais

[1] Voir Bibliographie et Historique dans Ch.-E. Guye et Einhorn, *Archives*, (IV) 41, p. 287, 376, 457 (1916), et *Publications du Laboratoire de Physique de l'Université de Genève.*

[2] Kohlrausch supposait que la chaleur est la principale cause de cette réactivité, et que cette dernière diminue asymptotiquement lorsque la température décroît.

[3] Voir *Archives* (V), 2, p. 353, 1920.

[4] *Archives* (IV), 26, p. 163, 1908.

tend vers une valeur fixe. Pour un fil recuit (à environ 300°), cette valeur limite est atteinte beaucoup plus rapidement que pour un fil non recuit. L'augmentation du décrément avec la température est plus sensible si la charge est plus grande. Les variations du décrément en fonction de la température sont réversibles. L'augmentation du frottement intérieur avec la température a été régulière pour tous les métaux examinés, à l'exception du fil d'acier ordinaire. La courbe des décréments d'un fil d'acier ordinaire[1] en fonction de la température a présenté un maximum vers 180°, puis un minimum vers 240°. A partir de cette température, le décrément augmente rapidement, comme pour les autres métaux. M. P. Chevenard[2] a pu faire disparaître cette anomalie par des recuits convenables.

Dans les expériences qui font l'objet de ce travail, nous avons étudié le frottement intérieur et l'élasticité de fils d'invar à diverses températures. Nos expériences ont fait ressortir *un déplacement du point de transformation de cet alliage par l'écrouissage. Pour des fils tirés à froid au diamètre de* 0,2 *mm, le point de transformation est plus élevé d'environ* 90° *que pour l'invar ordinaire.* Trois fils d'invar tirés à froid ont montré un point de transformation à 340° environ. Le recuit annulant l'effet de l'écrouissage, nous avons recuit deux fils au rouge vif pendant dix secondes. Le point de transformation de ces derniers fils se trouve alors à 250°, température du point de transformation normal de l'invar.

II. Principe de la méthode.

L'étude du frottement intérieur se fait par celle de l'amortissement des oscillations d'un fil auquel est suspendu un oscillateur. La démonstration mathématique des formules utilisées dans cette étude a été exposée dans plusieurs travaux sortis du Laboratoire de Physique de l'Université de Genève, et en particulier dans le mémoire de MM. Guye et Einhorn[3].

[1] Pour un fil d'acier de 0,1063 mm de diamètre, de 39 cm de longueur, après 4 heures de chauffage à 350°. Charge 75,415 grammes. *Loc. cit.*, p. 274.

[2] *C. R.*, t. 170, p. 1499, 1920.

[3] *Loc. cit.*, p. 19.

Nous reproduisons donc ici uniquement les formules permettant de représenter les résultats expérimentaux.

Equation différentielle des oscillations non amorties.

$$I\frac{d^2\alpha}{dt^2} = -H\alpha\ , \qquad H = \frac{\pi r^4 G}{2l}\ .$$

I = moment d'inertie de l'oscillateur par rapport à l'axe de suspension.
H = moment du couple de torsion pour une torsion égale à un radian.
α = angle de torsion.
r = rayon du fil.
l = longueur du fil.
G = second module d'élasticité ou module de torsion.

La durée d'une oscillation complète, τ, est donnée par l'expression

$$\tau = 2\pi\sqrt{\frac{I}{H}}\ .$$

Equation différentielle des oscillations amorties.

D'après Coulomb, le couple dû au frottement intérieur qui agit dans un sens opposé à celui du mouvement est proportionnel à la vitesse angulaire de ce mouvement. En utilisant les mêmes symboles, on aura:

$$I\frac{d^2\alpha}{dt^2} = -F\frac{d\alpha}{dt} - H\alpha\ ,$$

où F = coefficient d'amortissement.

La durée d'une oscillation complète, ou pseudo-période, T, est alors:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{H - \left(\frac{F}{2I}\right)^2}}\ .$$

Le rapport des valeurs de deux amplitudes successives est donné par l'expression:

$$\frac{\alpha_n}{\alpha_{n+1}} = e^{kT} = e^{\lambda}\ .$$

On en tire:

$$\lambda = ln \frac{\alpha_n}{\alpha_{n+1}} \text{ [1]} .$$

λ est appelé le *décrément logarithmique des oscillations.* C'est la différence des logarithmes naturels de deux amplitudes successives, α_n et α_{n+1}, soit de deux élongations consécutives de même sens, comptées à partir de la position d'équilibre.

Pratiquement, pour déterminer λ, on ne tient pas compte de la position d'équilibre, mais on mesure l'écart entre les positions extrêmes du disque, le parcours se faisant toujours dans le même sens.

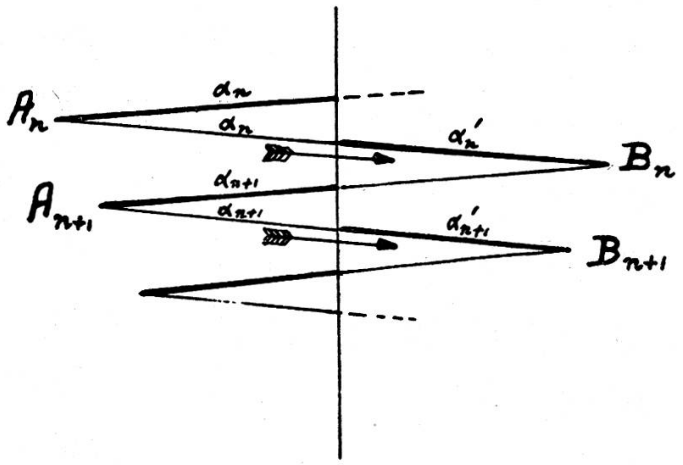

Fig. 1.

Il est facile de montrer que cela revient au même.

Soient α_n et α_{n+1} les élongations de la position d'équilibre vers la gauche, et α'_n et α'_{n+1} les élongations vers la droite succédant à α_n et α_{n+1} (v. fig. 1).

$$A_n B_n = \alpha_n + \alpha'_n \qquad \text{et} \qquad A_{n+1} B_{n+1} = \alpha_{n+1} + \alpha'_{n+1}$$

seront alors les écarts successifs entre les positions extrêmes, le parcours se faisant toujours dans le même sens. On a:

$$\frac{\alpha_n}{\alpha_{n+1}} = \frac{\alpha'_n}{\alpha'_{n+1}} = e^{\lambda} .$$

[1] Voir MASCART et JOUBERT, *Leçons sur l'électricité et le magnétisme*, t. II, p. 31, Paris 1886.

On en tire immédiatement:

$$\frac{\alpha_n + \alpha'_n}{\alpha_{n+1} + \alpha'_{n+1}} = e^{\lambda} .$$

Comme λ était faible, nous avons procédé de la façon suivante: Appelons a_n, a_{n+1}, a_{n+2} .... a_{n+p} les amplitudes totales successives de même sens. On sait, d'après la théorie du décrément logarithmique, que:

$$\frac{a_n}{a_{n+1}} = \frac{a_{n+1}}{a_{n+2}} = \frac{a_{n+2}}{a_{n+3}} \ldots = \frac{a_{n+p-1}}{a_{n+p}} = e^{\lambda} .$$

Multiplions tous ces rapports les uns par les autres, il vient:

$$\frac{a_n}{a_{n+p}} = e^{p\lambda} , \quad \text{et finalement :} \quad \lambda = \frac{1}{p} ln \frac{a_n}{a_{n+p}} = \frac{2,3026}{p} \log \frac{a_n}{a_{n+p}} .$$

Nous avons choisi chaque fois la longueur d'une oscillation et celle de la dixième oscillation consécutive; le diviseur, dans la dernière formule, était donc 10. Pour chaque point nous avons fait une cinquantaine de lectures, ce qui nous permettait d'obtenir plusieurs fois le rapport λ, et de prendre la moyenne de ces diverses valeurs [1].

Rapport des périodes avec et sans amortissement.

$$\frac{T}{\tau} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{4\pi^2}}} = 1 + \frac{\lambda^2}{8\pi^2} + \ldots .$$

T période avec amortissement.
τ » sans »

Le terme $\frac{\lambda^2}{4\pi^2}$ étant très petit, on peut supprimer dans le développement en série les termes supérieurs.

Rapport du second module d'élasticité avec la durée d'oscillation.

$$G = \frac{2\pi I l}{\tau^2 r^4} .$$

Ici τ est la durée d'une oscillation simple.

[1] Voir plus loin le premier tableau des résultats.

Remarque sur l'intérêt de la mesure des durées d'oscillation.

Notre travail avait pour but principal d'étudier le point de transformation de l'invar. Afin d'être bien certaine que la brusque augmentation du décrément observée précédemment correspondait bien à un point de transformation de la matière, il fallait que nous pussions constater un changement dans la variation, à la même température, d'une autre propriété physique. A cet effet nous avons noté les durées d'oscillation de tout notre système, aux diverses températures, dans les mêmes séries d'expériences que nous avons utilisées pour déterminer le frottement intérieur.

Nous avons pu constater alors une variation de la durée d'oscillation de tout le système aux environs du point de transformation, comme elle avait été observée antérieurement par M. Wœlfle [1].

Cette durée dépend du second module d'élasticité, suivant la formule donnée plus haut:

$$G = \frac{2\pi I l}{\tau^2 r^4}.$$

Il convient de faire remarquer que les variations, faibles d'ailleurs, que nous avons constatées dans la durée d'oscillation, proviennent bien du fil d'invar. Pour l'établir, il suffira de rappeler les faits suivants.

1° L'influence du fil de suspension et de l'oscillateur sur la durée de l'oscillation doit rester constante puisque toute la partie supérieure reste à une température constante grâce à la cuve de refroidissement placée sous l'oscillateur, et grâce à la position inférieure du four électrique. Les facteurs l_1, G_1, r_1, relatifs au fil de suspension, et I, relatif à l'oscillateur, sont donc constants.

2° Appelons τ_1 la durée d'oscillation du fil de suspension en acier muni de l'oscillateur; cette durée est constante. Soit τ la durée de l'oscillation de tout le système y compris le fil d'invar. C'est cette durée que nous avons observée et portée sur nos courbes.

[1] *Archives* (IV), 24, p. 63, 159 (1907).

LABORATOIRE DE PHYSIQUE UNIVERSITÉ NEUCHATEL

On a

$$\tau_1 = 2\pi\sqrt{\frac{I}{H_1}},$$

où, comme précédemment, le moment dû au fil de suspension

$$H_1 = \frac{\pi r_1^4 G_1}{2l_1} = \frac{4\pi^2 I}{\tau_1^2},$$

et

$$\tau = 2\pi\sqrt{\frac{I}{H_1 + H_2}},$$

où H_2 est le moment dû au fil d'invar.

On en tire:

$$\frac{\tau_1^2}{\tau^2} = \frac{H_1 + H_2}{H_1}.$$

Or, dans notre cas [1], on a:

$$H_1 = 206{,}1 \text{ gr cm},$$
$$H_2 = 6423{,}3 \text{ gr cm},$$

$$\frac{H_2}{H_1} = 31{,}1 \qquad \text{et} \qquad \frac{\tau_1}{\tau} = \sqrt{\frac{206{,}1 + 6423{,}3}{206{,}1}} = 5{,}66.$$

Expérimentalement nous avons trouvé:

$$\frac{\tau_1}{\tau} = 6 \text{ environ}.$$

Comme H_2 est 31 fois plus grand que H_1, on voit que la variation de τ dépend essentiellement de H_2, soit du fil d'invar. Le moment du couple de torsion dû au fil de suspension H_1 représente seulement le 3% de H_2, couple dû au fil d'invar; d'autre part, si on se borne à étudier l'allure de la courbe, on peut négliger H_1 puisque c'est un facteur constant.

[1] Le diamètre du fil de suspension est de 0,08 mm, celui des fils d'invar examinés est de 0,2 à 0,25 mm.

III. Description de l'appareil et du mode opératoire [1].

Appareil d'oscillation.

Nous avons employé un appareil qui a été utilisé dans plusieurs séries de recherches effectuées au Laboratoire de Physique de l'Université de Genève. Comme sa description est donnée dans le mémoire de MM. Pazziani et Guye [2], nous nous contenterons d'en rappeler les points essentiels (v. fig. 2).

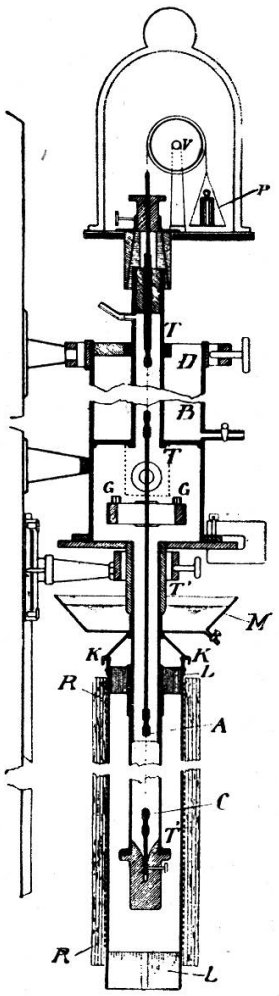

Fig. 2.

[1] Nous exprimons ici encore à M. Pazziani, assistant au laboratoire, nos remerciements pour l'aide qu'il a bien voulu nous donner pour la préparation de nos premières expériences.

[2] *Archives*, (V) 6, p. 62, 1924.

Le fil à examiner est fixé au-dessous d'un oscillateur suspendu par un mince fil d'acier. L'appareil se compose essentiellement de deux tubes verticaux, le premier, TT, entourant le fil de suspension, le second, T'T', le fil à examiner. Le tube supérieur est fixé solidement à un mur sensiblement soustrait aux trépidations des salles et de la rue. Entre les tubes se trouve la cage de l'oscillateur avec son miroir; cette cage est munie d'une fenêtre. Tout le système oscillant est tendu par le contrepoids P, par l'intermédiaire de la poulie V. Grâce à ce dispositif, le fil à examiner est soumis à une traction constante et faible, juste suffisante pour qu'il soit tendu (environ 100 gr). La partie supérieure de l'appareil est maintenue à une température constante au moyen d'un cylindre rempli d'eau entourant le tube TT, et d'une cuve à eau, M, placée sous la cage de l'oscillateur. L'eau de la cuve, qui s'échauffait assez rapidement, était renouvelée fréquemment.

Les deux tubes et la cage de l'oscillateur forment un système étanche fermé au moyen d'une cloche à sa partie supérieure. De cette manière, on peut travailler dans le vide et éliminer ainsi l'influence de la résistance de l'air. Nous avons utilisé une trompe à eau qui nous permettait d'atteindre une pression de 12 à 15 millimètres de mercure.

Pour le montage, nous avons procédé comme suit : le fil d'invar est cimenté à ses deux extrémités, à l'aide d'un ciment de dentiste à prise rapide, dans de petites douilles en argent [1]. Ainsi préparé, le fil d'invar est inséré par une de ces douilles dans une pince A placée à la partie inférieure de l'oscillateur retiré de l'appareil avec son fil de suspension. A l'autre douille, on fixe une tige en fer à l'aide d'une pince C. Cette tige en fer sera fixée elle-même plus tard au bas de l'appareil. Il faut ensuite placer tout le système oscillateur dans sa gaîne, en l'introduisant par le bas à l'aide d'un fil, jusqu'à ce que le miroir de l'oscillateur soit à la hauteur de la fenêtre. Pour pouvoir amener le miroir dans une position approximativement parallèle à la fenêtre d'observation, la partie supérieure de l'appareil est

[1] Pour les détails de la technique utilisée dans la fixation du fil dans ses douilles, voir PAZZIANI et GUYE, *loc. cit.*, p. 91.

aménagée de manière à permettre une rotation autour de la verticale. La position du miroir étant satisfaisante, l'extrémité inférieure du fil d'invar est fixée à l'extrémité du tube T'T'. Pour pouvoir parfaire ce réglage, l'appareil est construit de manière à permettre une légère rotation de l'équipage de fixation inférieur du fil d'invar au moyen du plateau central.

Toute cette partie des manipulations est très délicate à cause de la fragilité des fils.

Le système oscillatoire est mis en mouvement au moyen d'un électroaimant alimenté par deux accumulateurs.

Dispositif de chauffage du fil.

Pour le chauffage du fil, nous avons employé un four électrique qui pouvait se placer à volonté autour du tube T'T' renfermant le fil d'invar.

Le four était alimenté par un courant à basse tension obtenu par transformation du courant de la ville.

Pour son étalonnage, nous avons commencé par le faire marcher à vide, c'est-à-dire sans le placer autour du fil, et nous avons mesuré, à l'aide d'un thermomètre à mercure permettant d'aller jusqu'à 450°, les températures produites par des ampérages déterminés. A l'aide de ces données, nous avons établi une courbe représentant la température du four en fonction de l'intensité du courant. Les températures des expériences ont été déterminées à l'aide de cette courbe par la mesure de l'ampérage. La température la plus élevée à laquelle nous ayons travaillé a été de 420°. Pour les températures élevées, le réglage du courant était quelque peu délicat: les variations du courant de la ville, quoique faibles, faisaient sentir leur effet, et la résistance des rhéostats de réglage augmentait peu à peu avec l'échauffement dû au passage du courant. Nous avons parachevé alors le réglage du courant à l'aide d'une bobine de self. Chaque observation a été faite après environ deux heures de chauffage; ainsi on était sûr d'avoir atteint le régime permanent qui s'obtenait souvent déjà après une heure. Le réglage du courant se faisait au moyen de plusieurs rhéostats placés dans le circuit primaire. Le dispositif employé permettait de faire varier le courant graduellement. Nous avons

admis que les mêmes ampérages produisaient les mêmes températures une fois que le fil avec sa gaîne se trouvait à l'intérieur du four.

Dispositif employé pour le recuit du fil.

Dans un certain nombre d'expériences, nous avons soumis des fils à un recuit à des températures inférieures à 400°, dans l'appareil d'oscillation même. Pour le recuit à des températures plus élevées, nous avons fait passer dans le fil, à l'air libre, le courant alternatif de la ville. C'est pour éviter toute tension dans le fil pendant le recuit que nous l'avons étendu horizontalement et sans traction appréciable. Le fil avait une longueur de 25 cm entre les contacts. Pour nous assurer un bon contact aux extrémités du fil, nous avons procédé comme suit. Le courant arrivait par des fils isolés à des bornes spéciales. Chaque extrémité du fil à recuire était recourbée et serrée entre une petite rondelle de laiton et une surface plane correspondante de la borne.

Pour le recuit, nous avons porté le fil progressivement au rouge cerise (environ 900°), pour l'y maintenir pendant 10 secondes. Ensuite on a laissé le fil reprendre de lui-même la température de la salle (environ 18°).

Comme notre matériel était précieux et délicat à la fois (diamètre du fil environ 0,2 mm), nous avons d'abord déterminé l'ampérage nécessaire pour le porter à la température voulue par l'essai d'un fil d'acier de même longueur et de résistance approximativement équivalente.

Mesure de l'amplitude et de la durée des oscillations.

Les déterminations des amplitudes ont été faites d'après la méthode classique de Poggendorf. La distance de la lunette au miroir était de 2,50 mètres, de façon à n'avoir que de petits angles. Chaque détermination comportait une cinquantaine de lectures successives. De la sorte, on pouvait contrôler par la régularité du phénomène l'absence de causes perturbatrices isolées. Les rapports d'une amplitude à la onzième suivante ont été pris un certain nombre de fois dans ces lectures pour permettre de faire des moyennes.

Les lectures étaient faites sur une échelle permettant d'apprécier le demi-millimètre.

Les amplitudes étaient comprises entre 10 et 40 cm.

La durée des oscillations a été déterminée pour chaque point par plusieurs mesures de la durée de dix oscillations simples consécutives.

IV. Le matériel examiné.

Nos recherches ayant été effectuées sur l'invar, nous croyons intéressant de rappeler ici quelques-unes des principales propriétés des aciers au nickel[1], en particulier des aciers à teneur élevée en nickel, dits alliages réversibles (plus de 26 % de nickel).

Au point de vue physico-chimique, les aciers sont des systèmes d'une très grande complexité[2]. Le fer pur présente trois états allotropiques. Leurs propriétés principales et leurs limites de stabilité sont résumées dans le tableau suivant:

1° le fer α, magnétique, ne dissout pas le carbone, stable au-dessous de 740°,

2° le fer β, non magnétique, ne dissout pas le carbone, stable entre 740° et 860°,

3° le fer γ, non magnétique, dissout le carbone, stable au-dessus de 860°.

La présence d'autres éléments a pour effet de déplacer les points de transformation et d'augmenter le nombre de phases possibles.

L'acier est un fer contenant jusqu'à 2 % de carbone et pouvant renfermer encore d'autres éléments. L'analyse micro-

[1] Les aciers au nickel ont été l'objet de très nombreux travaux. Parmi les ouvrages qui se rapportent à ce sujet, citons les *Recherches sur les aciers au nickel à hautes teneurs*, de M. A. Dumas, Dunod, Paris, 1902, l'*Etude théorique et industrielle des alliages métalliques* de Guillet, et tout particulièrement l'ouvrage dans lequel M. Ch.-E. Guillaume résume ses remarquables recherches : *Les applications des aciers au nickel*, Gauthier-Villars, Paris 1904.

[2] Pour les données métallographiques, nous nous référons aux ouvrages suivants: F. Turpin, *Etude sur les métaux industriels*, Dunod et Pinat, Paris 1919, et P. Goerens, *Introduction à la Métallographie microscopique*, Paris 1911.

graphique des aciers permet d'y distinguer une série de constituants. Les métallographes désignent le fer α pur d'un acier par le terme de *ferrite*. Le carbone d'un acier s'y trouve à l'état de carbure de fer, Fe_3C, appelé *cémentite*. Aux teneurs faibles, cette cémentite forme avec la ferrite un mélange d'éléments très fins des deux constituants, appelé *perlite*. Au-delà de la teneur de 0,9% C, on trouve, à côté de la perlite, le carbure libre. Les propriétés d'un acier dépendent non seulement de sa composition élémentaire, mais encore de son traitement thermique et mécanique. Chauffé au-dessus du point de transformation supérieur du fer, le fer γ, formé dans l'acier, dissout le carbure en donnant naissance à l'*austénite*. Cette solution solide n'est stable qu'à une température élevée. Elle peut cependant être obtenue à la température ordinaire par un refroidissement très rapide (par une trempe exagérée) ou par une trempe ordinaire, lorsqu'on se trouve en présence d'un élément retardateur comme le manganèse ou le nickel.

Dans les aciers au carbone, normalement trempés, la solution solide de carbure dans le fer α constitue la *martensite*. Il existe encore d'autres modifications de ces solutions solides de carbure dans le fer, la *troostite*, l'*osmondite*, la *sorbite*, qui peuvent être obtenues par des traitements thermiques convenables.

A toutes ces variations de la constitution des aciers, dues aux traitements thermiques, il convient d'ajouter celles qui sont dues aux traitements mécaniques. Comme nous avons étudié des fils obtenus par étirement à froid, nous ne voulons signaler que l'influence de l'écrouissage sur les propriétés des aciers. Par suite du travail mécanique que subit l'acier à froid, le métal se durcit, son module d'élasticité s'élève, sa charge de rupture augmente[1]. Le recuit permet aux grains, brisés par l'écrouissage, de se reformer, et tend à ramener le métal à l'état dans lequel il se trouvait avant l'écrouissage.

Parmi les aciers au nickel, ceux à teneur élevée en cet élément sont particulièrement intéressants. Grâce aux belles recherches

[1] Voir par exemple les diagrammes comparatifs des propriétés mécaniques des aciers dans l'ouvrage de MM. C. Bach et R. Baumann, *Festigkeitseigenschaften und Gefügebilder der Konstruktionsmaterialien*, Springer, Berlin, 1915, p. 49.

de M. Ch.-E. Guillaume, on connaît les propriétés de ces alliages. On sait, en particulier, que certains de ces aciers se distinguent par des propriétés de dilatabilité thermique remarquables. Aux températures élevées, le coefficient de dilatation de ces alliages est considérable. Ils sont non magnétiques. A mesure que la température baisse, le magnétisme apparaît pendant que la dilatabilité diminue [1]. Les variations de ces deux propriétés physiques sont dues à l'existence d'un point de transformation.

La présence du nickel change profondément le régime d'équilibre des modifications allotropiques du fer. Le point de transformation supérieur du fer (860°) se trouve ramené à une température beaucoup plus basse. Cette température est fonction de la teneur en nickel. M. Guillaume a établi une formule [2] représentant cette fonction. On trouve ainsi un point de transformation à 250° pour un alliage contenant 36 % de nickel. Les expériences de MM. Guye et Woelfle confirment ce résultat pour un fil ordinaire de cet acier. Cet alliage présente une dilatation particulièrement faible qui lui a valu le nom d'invar. Son coefficient de dilatation linéaire est 12×10^{-6} entre 200° et 300° tandis qu'il n'est que de $1{,}5 \times 10^{-6}$ entre 0° et 200°. L'écrouissage fait diminuer encore ce coefficient, et par un traitement approprié on obtient un métal au coefficient nul à la température ordinaire.

D'autre part l'effet de l'écrouissage pour l'invar est d'élever un peu son module d'élasticité [3]. M. Turpin indique les valeurs comparatives suivantes [4] pour l'invar des aciéries d'Imphy:

	E limite d'élasticité	R charge de rupture	A % allongement à la rupture
Sur métal brut de laminage . .	50	65	25
» » étiré par tréfilage . .	65	70	12
» » trempé ou recuit à 950°	30	52	30

[1] Nous n'avons pas encore étudié la variation des propriétés magnétiques de nos fils en fonction de la température.

[2] Citée par MM. Guye et Wœlfle, *loc. cit.*, p. 169.

[3] Guillaume, *loc. cit.*, p. 24.

[4] *Loc. cit.*, p. 66.

On voit que le tréfilage ou écrouissage augmente la limite d'élasticité et la charge de rupture et diminue d'une manière considérable l'allongement à la rupture de l'invar.

D'après les brèves indications que nous venons de donner sur les aciers en général et l'invar en particulier, il faut s'attendre à trouver de fortes variations des propriétés physiques, entr'autres de la température du point de transformation, dépendant des traitements thermiques et mécaniques qu'aura subi l'échantillon d'invar examiné.

V. Résultats expérimentaux.

Les cinq fils examinés par nous proviennent tous de la même torche de gros fil d'invar que le laboratoire de Physique doit à l'obligeance de M. Guillaume. Les ateliers qui se sont chargés de tirer les fils n'y ont réussi que difficilement. Les fils se brisaient si facilement qu'ils ont été livrés en fragments ne dépassant pas 50 cm de longueur. Les quatre premiers fils, d'un diamètre de 0,2 mm, ont été tirés en même temps. Le cinquième a été tiré plus tard, son diamètre est de 0,25 mm. La longueur libre des fils dans l'appareil a été de 22 à 24 cm.

Les fils ont tous été tirés à froid. Ils n'ont subi aucun traitement mécanique ultérieur. Les traitements thermiques auxquels nous les avons soumis sont indiqués dans les tables qui suivent. Dans ces tables nous avons résumé nos déterminations des décréments logarithmiques et des durées d'oscillation. Comme il s'agissait de faire ressortir la marche générale du phénomène, et non pas de déterminer des constantes absolues, nous avons simplifié les calculs en substituant aux logarithmes naturels les logarithmes vulgaires pour le calcul de λ. Les chiffres de la colonne « λ (log. vulg.) », multipliés par $\frac{1}{M} = 2{,}3026$, donneront la véritable valeur de λ, c'est-à-dire le logarithme naturel du rapport $\frac{a_n}{a_{n+1}}$.

Avec les valeurs qu'on trouve dans ces tables, nous avons construit les courbes de la fig. 3. Dans cette figure, on a représenté le décrément logarithmique et la durée d'oscillation en

1er *Fil d'invar.* 1re *courbe descendante.*

Température du fil 165°. Température de la salle 16°. Pression au manomètre 13 mm Hg.

Nos des lectures	Lectures à gauche	Lectures à droite	Différences	$\frac{a_n}{a_{n+10}}$	Ampères	Touches des rhéostats	Nos des lectures	Lectures à gauche	Lectures à droite	Différences	$\frac{a_n}{a_{n+10}}$	Ampères	Durée d'oscillation	Observations
1	59,80	46,80	13,0		Commencement 9a,0		26	61,50	44,95			A la fin du chauffage 8a,65	Pas mesurée au début des expériences.	A chaque série de lectures on a donné une impulsion au moyen de l'électro-aimant.
2	59,75	46,80				1er *Rhéostat* 9me	27	61,50	44,95					
3	59,75	46,80					28	61,45	44,90					
4	59,70	46,85					29	61,40	45,00					
5	59,70	46,85		13,0 : 12,6 = 1,03175		—	30	61,40	45,05		1,0375			
6	59,70	46,90					31	61,35	45,10					
7	59,65	46,90					32	61,35	45,10					
8	59,65	46,90				2me *Rhéostat* 9me	33	61,35	45,15					
9	59,65	46,95					34	—	45,15					
10	59,65	46,95					35	61,20	45,20	16,0				
11	59,60	47,00	12,6			—	36	61,20	45,20					
							37	61,20	45,25					
12	61,60	44,95					38	61,15	45,25					
13	61,60	45,00	16,6			3me *Rhéostat* 9me	39	61,10	45,30					
14	61,50	45,00												
15	61,45	45,00					40	61,85	44,50					
16	61,45	45,05				—	41	61,85	44,50					
17	61,45	45,10					42	61,80	44,55					
18	61,40	45,10		1,0343			43	61,80	44,55					
19	61,35	45,15					44	61,70	44,60					
20	61,35	45,15					45	61,65	44,65	17,0				
21	61,30	45,20					46	61,65	44,70					
22	61,30	45,20					47	61,60	44,70					
23	61,25	45,20	16,05				48	61,60	44,80					
							49	61,60	44,80					
24	61,50	44,90					50	61,55	44,85		1,0334			
25	61,50	44,90	16,60				51	61,55	44,85					
							52	61,50	44,90					
							53	61,45	44,90					
							54	61,40	44,90					
							55	61,35	44,90	16,45				

Moyenne de $\frac{1,03175 + 1,0343 + 1,0375 + 1,0334}{4} = 1,03424$. Pour 165°, $\lambda(\log \text{vulg}) = \frac{1}{10} \log \text{vulg}\, 1,03424 = 0,00146$

fonction de la température, en plusieurs courbes montantes et descendantes pour chacun des cinq fils examinés. Le sens de la variation thermique est indiqué par des flèches lorsque les courbes montantes et descendantes ne sont pas concordantes.

Pour illustrer ce que nous avons dit plus haut (p. 30) sur le procédé utilisé pour la détermination des valeurs de λ et de la durée d'oscillation, nous reproduisons ici une de nos séries d'observations telles qu'elles ont été établies pour chaque point de chaque courbe (v. p. 35).

DÉCRÉMENTS LOGARITHMIQUES ET DURÉES D'OSCILLATION

Ier *Fil* (tiré à froid).

Température	Durée de 10 oscillations simples	Courbe	λ (log. vulg.)
13°,5	Pas mesurée au début des expériences	Première montante	0,000698
46			0,000890
90			0,001136
165			0,001932
205			0,002342
235			0,002502
270			0,002672
330			0,002490
324		Première descendante	0,002272
270			0,001953
230			0,001891
200			0,001620
165			0,001461
90			0,000813
46			0,000732
40			0,000647
14,5			0,000689
95		Seconde montante	0,000796
160			0,001360
230			0,001874
262	48″ 9		0,001891
330	46″ 3		0,002539

IIme *Fil* (recuit à 350° pendant 3 heures)[1].

Température	Durée de 10 oscillations simples	Courbe	λ (log. vulg.)
14°	51″ 20	Première montante	0,002735
95	50 99		0,002243
160	50 66		0,002684
205	50 75		0,003028
270	49 965		0,003311
330	49 61		0,003575
325	49 53	Seconde descendante	0,003423
235	49 525		0,002938
195	49 85		0,002735
160	49 80		0,002572
92	50 175		0,001953
405	49 85	Descendante	0,013811
408-410	49 75		0,015118
335	48 68		0,003712
365	49 43	Descendante	0,005595
348	48 33		0,004376
335	48 90		0,003703
17	50 66		0,001199
375	49 10	Montante	0,007954

IIIme *Fil* (recuit à 380° pendant 2 heures ½).

Température	Durée de 10 oscillations simples	Courbe	λ (log. vulg.)
345°	45″ 825	Descendante	0,003060
320	45 710		0,002078
340	45 800		0,002366
19,2	47 583		0,000839
170	46 375	Montante	0,001803
370	46 413		0,005173

[1] *Remarque:* Après le premier recuit à 350°, nous avons établi une courbe aux températures descendantes. Nous n'en avons pas indiqué les résultats car le zéro de l'appareil n'était pas constant. Une légère augmentation de la charge a supprimé ces variations. Cette surcharge a été conservée dans toutes les expériences concernant ce fil, MM. Pazziani et Guye ayant constaté qu'une variation de la charge de 15 gr. n'influençait pas le décrément.

IVme *Fil* (recuit au rouge vif pendant environ 10 secondes).

Température	Durée de 10 oscillations simples	Courbe	λ (log. vulg.)
21°	53″ 700		0,001017
155	52 200		0,001242
240	51 950	Montante	0,001199
330	52 075		0,002633
420	54 700		0,065890 [1]
355	51 725		0,003790
280	51 500	Descendante	0,001986
260	51 900		0,001953

Vme *Fil* (recuit comme le IVme fil).

Température	Durée de 10 oscillations simples	Courbe	λ (log. vulg.)
20°	40″ 850		0,001030
90	40 366	Montante	0,000903
240	38 683		0,001410
320	39 200		0,002510

VI. Discussion des résultats.

Il suffit de jeter un regard sur les courbes de la fig. 3 pour constater immédiatement l'existence de phénomènes irréversibles dans la variation du frottement intérieur avec la température. Un fil écroui à froid, tel qu'il se présentait au début de nos expériences, possède un décrément logarithmique qui est diminué par une chauffe à environ 350° prolongée pendant 2 heures comme elle intervient normalement au cours des opérations (fil I). Par un recuit convenable, — quelques heures à la température de 400° — le phénomène du frottement intérieur devient nettement réversible entre 0° et 400° (fil I après la première courbe montante, fils II et III).

Les courbes des λ des fils qui n'ont pas été portés à des températures dépassant 400° présentent un point d'inflexion

[1] Cette valeur n'est pas portée dans le graphique car elle aurait dépassé le cadre du dessin.

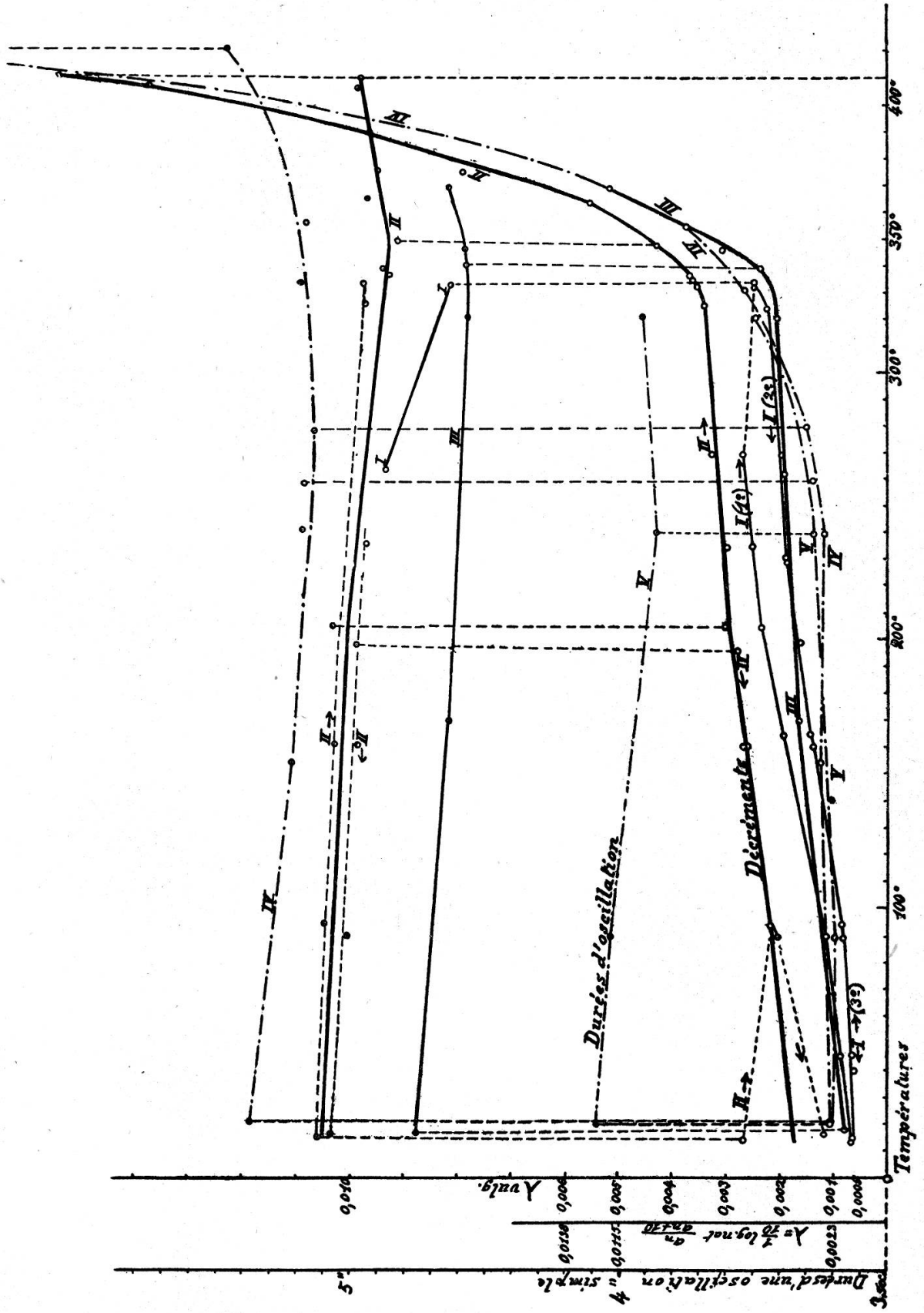
Durées d'une oscillation en secondes
Λ vulg.
Décrements
Durées d'oscillation
Températures
0°
100°
200°
300°
350°
400°

Fig. 3.

très net aux environs de 340° (fils I à III). Les fils IV et V par contre, recuits au rouge, présentent un point d'inflexion à 250°. Cela met en évidence la modification du frottement intérieur due au recuit.

Les courbes des durées d'oscillation présentent des minima aux températures correspondant à l'augmentation marquée de λ. Ces minima représentent des maxima du deuxième module d'élasticité, G.

Pour calculer, d'après les durées d'oscillation indiquées dans les tableaux de nos résultats, les variations de G, on utilise la formule

$$\frac{T_1}{T_2} = \sqrt{\frac{G_2}{G_1}} \, .$$

où les indices 1 et 2 se rapportent à des températures différentes. Nous n'avons pas fait ce calcul que MM. Guye et Wœlfle ont déjà publié. Ils ont trouvé ainsi les valeurs suivantes:

Températures	30°	120°	225°	380°
G [1]	5630	5855	6110	5630×10^8

La coïncidence des deux phénomènes, maximum du module G et augmentation brusque du décrément, montre bien qu'on a affaire à un point de transformation de la matière [2].

[1] Les variations du module d'élasticité de traction, E, des aciers au nickel ont été étudiées par M. Guillaume. E pour l'invar $= 14100 \times 10^8$ à la température ordinaire. L'alliage dont le module d'élasticité est constant en fonction de la température s'appelle élinvar et contient 28 ou 45 % de Ni. Voir les relations théoriques et numériques entre E et G dans l'ouvrage connu de C. Bach (1917).

[2] On pourrait faire l'objection que le minimum de la durée d'oscillation observé pourrait être dû au fait que l'augmentation de λ entraîne une augmentation de la durée d'oscillation puisque cette dernière est amortie. Il est facile de montrer que cet effet est loin de pouvoir expliquer la forte augmentation que présentent les durées d'oscillation. En effet, on a:

$$\frac{T}{\tau} = 1 + \frac{\lambda^2}{8\pi^2} \qquad \text{(v. p. 24)} \, .$$

où T est la durée d'une oscillation amortie et τ celle d'une oscillation non amortie. La valeur maximum observée pour λ est de 0,1519 (en logarithmes naturels), pour le fil IV à 420°, d'où

$$\frac{T}{\tau} = 1{,}00029 \, .$$

La durée d'une oscillation double étant de dix secondes environ,

Il est intéressant de rapprocher ces résultats de ceux des auteurs précédents. En confirmation des indications de M. Guillaume, MM. Guye et Wœlfle ont trouvé que le fil d'invar ordinaire possédait un point de transformation à 250° [1]. Nos fils non recuits présentent *un point de transformation supérieur de* 90° *à celui de l'invar ordinaire. Ce déplacement du point de transformation doit être dû à l'écrouissage très énergique qu'ont subi nos fils lorsqu'ils ont été tirés à froid. Le déplacement du point de transformation dû à l'écrouissage peut être annulé par un recuit à* 900°.

Si nos fils présentent une modification si profonde de leurs propriétés physiques par suite de l'écrouissage, c'est certainement en grande partie parce que l'écrouissage fait sentir ses effets d'autant plus que le diamètre des fils examinés est plus faible [2].

Nos résultats sont une confirmation de la théorie d'après laquelle l'écrouissage entraîne une modification de l'état moléculaire du métal [3], modification que le recuit permet, du moins dans certaines limites, d'annuler.

l'influence de la variation de λ sur la durée d'oscillation est inférieure à un centième de seconde. Or la durée d'une oscillation double a passé dans ce cas de 10″.42 à 330° à 10″.94 à 420°.

[1] *Loc. cit.* Ces auteurs ont déterminé le point de transformation de l'invar par la variation de la durée d'oscillation d'un fil chargé (diamètre du fil 0,3075 mm, charge 783 gr).

[2] D'après *Elastizität und Festigkeit* de C. Bach, Berlin, Springer, 1917, pour des fils d'acier, tirés à froid, de 1 mm de diamètre, la charge de rupture est triple et l'allongement six fois moindre que pour des fils travaillés à chaud. Voir aussi le graphique (p. 80) dans l'ouvrage cité de Turpin.

[3] Voir par exemple les microphotographies de laiton écroui et de laiton recuit dans l'ouvrage cité de Turpin (pl. V), qui montrent les différences de texture résultant de l'écrouissage et du recuit. Le recuit peut annuler aussi l'effet de certains traitements thermiques. Par une trempe très brusque, par exemple, on obtient un acier renfermant de l'austénite et de la martensite. Par un recuit normal, on le transforme en un acier ordinaire, formé par la ferrite et la cémentite.