

Nouvelles recherches sur la dilatabilité de l'invar

Autor(en): **Guillaume, C.-E.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Archives des sciences physiques et naturelles**

Band (Jahr): **43 (1917)**

PDF erstellt am: **21.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-743048>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

NOUVELLES RECHERCHES
SUR LA
DILATABILITÉ DE L'INVAR

PAR

Ch.-Ed. GUILLAUME

Directeur du Bureau international des poids et mesures

BUT DE LA RECHERCHE .

Envisagé comme un produit industriel, l'invar n'est pas un alliage parfaitement défini. Les petits écarts de dosage du fer et du nickel peuvent, d'une part, faire remonter sa dilatabilité au-dessus du minimum, assez brusque, que traverse la courbe des dilatabilités en fonction de la teneur; d'autre part, les additions au fer et au nickel de certains corps comme le manganèse et le carbone, dont une certaine proportion, minime, mais appréciable, est nécessaire au traitement métallurgique de l'alliage, relèvent assez rapidement la valeur même du minimum, de telle sorte que la dilatabilité réalisée en dépend dans une large mesure.

Le total des additions métallurgiques peut difficilement descendre au-dessous de 5 p. 1000, sans laisser un alliage craquelé et mal utilisable. J'ai étudié systématiquement l'action du manganèse, mais les expériences concernant celle du carbone et du silicium sont isolées, et ne permettent aucune conclusion précise. Lorsque ces travaux seront achevés, l'étude de l'action des additions fera l'objet d'un mémoire spécial, qui serait encore prématuré aujourd'hui.

En revanche, je puis, dès maintenant, formuler des conclusions sur une autre cause de changement de la dilatabilité de

l'invar : le traitement thermique ou mécanique auquel l'alliage a été soumis.

J'ai fait, dans des publications antérieures⁽¹⁾, une rapide allusion à l'existence de ces actions ; mais elles sont extrêmement complexes, et il convenait de n'y point revenir avant de les avoir élucidées.

La question présente un double intérêt. L'extrême sensibilité de l'invar aux traitements est un phénomène curieux en lui-même, et qui semble à peu près isolé ; mais aussi, certaines applications de l'alliage rendent désirable de l'obtenir aussi exempt de dilatation que possible.

La plus importante parmi ces applications est celle qui est faite des fils ou rubans d'invar à la mesure des bases géodésiques. Ces fils ou rubans, librement suspendus, ou supportés en quelques points équidistants, possèdent une longueur qui dépasse parfois une centaine de mètres ; si l'on ne veut pas être limité, dans leur emploi, aux journées dans lesquelles la température de l'air est relativement stable et uniforme, il convient de chercher à leur assurer une dilatation aussi voisine que possible de zéro. La recherche du millionième étant courante dans la mesure des bases, on comprendra l'intérêt de l'emploi d'un invar particulièrement indilatable, en remarquant qu'une erreur de un dixième de degré dans la connaissance de la température moyenne d'un fil d'acier rendrait cette recherche parfaitement illusoire. Si, au contraire, la dilatabilité du fil est assez basse pour qu'une erreur de quelques degrés puisse être tolérée dans la valeur de la température, les conditions météorologiques seront toujours suffisantes, et la mesure de la température deviendra élémentaire sinon superflue.

Dès l'année 1902, j'avais obtenu dans cette voie des résultats inespérés⁽²⁾ ; mais ils étaient encore isolés. Depuis lors, une technique a été créée, permettant de les atteindre à coup sûr, et de réaliser industriellement des quantités indéfinies de fil, dont il devient souvent inutile de connaître la température, tant sa dilatabilité est faible. Ces recherches ont été effectuées,

¹⁾ *Archives*, quatrième période, tome 5, année 1898, p. 278.

²⁾ *Ibid.*, quatrième période, tome 15, année 1903, p. 258.

comme les précédentes, avec le concours des Aciéries d'Imphy, de la Société de Commentry-Fourchambault et Decazeville.

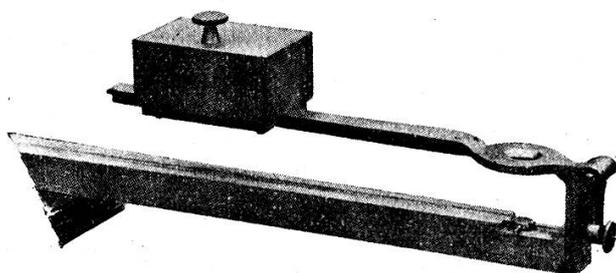
Les actions étudiées ont été le recuit avec refroidissement lent ou rapide, la trempe, l'écrouissage, enfin l'étuvage, c'est-à-dire la chauffe prolongée à une température modérément élevée, 100° par exemple. Ces divers traitements peuvent être appliqués successivement ; pour la stabilisation, l'étuvage suivi du repos est le traitement nécessaire.

FORME DES ÉCHANTILLONS, PROCÉDÉS D'ÉTUDE

Les premières recherches avaient été faites sur des barreaux rectangulaires, de 20 à 24 mm au carré et de 105 cm de longueur ; plus tard, j'ai reconnu que l'on pouvait, sans craindre des déformations accidentelles, susceptibles de fausser les mesures, opérer sur des tiges rondes d'un diamètre de 12 mm. Je suis même descendu jusqu'à un diamètre de 8 mm, mais la manipulation de tiges aussi minces impose quelques précautions. Des recherches faites, en 1898, sur des tiges de 12 mm, étirées, avaient donné déjà des résultats très intéressants ; toutefois, deux raisons m'ont engagé à les considérer comme un simple guide pour les recherches ultérieures. L'invar s'écrouissant très rapidement, il était certain — et des études spéciales l'ont confirmé — que la dureté n'était pas uniforme jusqu'au cœur des tiges ; ignorant alors qu'une chauffe très modérée pût modifier la dilatabilité de l'invar écroui, j'avais soumis les tiges à un étuvage, pour accroître leur stabilité avant d'entreprendre la mesure de leur dilatation. Les tiges se trouvaient donc dans un état mal défini, et les nombres trouvés pour leur dilatation ne possédaient aucun sens précis. J'ai poursuivi les expériences sur des fils, amenés uniformément au diamètre de 1,65 mm, qui est celui sous lequel ils sont employés dans les mesures géodésiques. Le choix de ce diamètre présentait le double avantage d'utiliser pour le tréfilage un matériel existant, et de fournir des résultats directement applicables aux réductions des mesures faites au moyen de ces fils. Ceux-ci ont été étudiés après tréfilage et ils n'ont été étuvés qu'ensuite.

Les mesures des dilatations ont été faites au comparateur, sur une longueur de un mètre. Pour les barres, l'étalon de comparaison était une règle en platine iridié; pour les fils, une tige d'invar, de dilatabilité extrêmement faible.

L'emploi d'un étalon de comparaison en invar présentait, pour les fils, un avantage très sérieux. En effet, ceux-ci étaient, pour leur mesure, soumis à une tension de 10 kg-force obtenue, dans mes premières expériences, au moyen d'un appareil à ressort, ultérieurement, à l'aide d'un tenseur à levier.



Une barre d'invar, à la face supérieure de laquelle on a pratiqué une rainure longitudinale, est munie, à ses extrémités, de deux armatures, dont l'une sert de butoir, tandis que l'autre soutient l'axe du levier coudé assurant la tension du fil. Les extrémités de celui-ci sont munies d'écrous qui appuient sur l'armature et sur le petit bras du levier. Les tracés sont pratiqués sur des pastilles d'invar, serrées par des vis sur le fil, qui les traverse.

La barre ainsi équipée est placée dans l'auge du comparateur à dilatation, parallèlement à la règle étalon. Le fonctionnement du levier est très fidèle et presque exactement réversible, pour autant que l'appareil n'est pas soumis à des secousses. L'expérience une fois montée, tout doit donc rester en place, pendant la série des températures, ou ascendantes, ou descendantes. Il est avantageux de parcourir le cycle dans une même journée; il est donc impossible de consacrer, au réglage de chaque température, le temps nécessaire pour obtenir la stabilité généralement exigée pour les bonnes mesures de dilatation, et il faut, le plus souvent, se contenter de températures dont la marche est encore sensible. Mais, grâce au fait que le fil, de très faible

dilatation, est comparé à un étalon dont la dilatation est elle-même très faible, rend négligeables les petites erreurs dans la mesure de la température moyenne. En fait, on pourrait, dans bien des cas, commettre sur cette moyenne une erreur de l'ordre du degré, sans atteindre encore l'erreur moyenne dans la mesure des longueurs.

L'effort longitudinal auquel le fil est soumis modifie sa dilatation. La tension sous laquelle est faite sa mesure est précisément égale à celle de son emploi ordinaire dans les opérations géodésiques; le coefficient trouvé sera donc celui dont on se servira pour le calcul des observations sur le terrain. Mais, pour les conclusions que l'on veut tirer des mesures en vue de la connaissance de la dilatabilité naturelle du fil, il est nécessaire d'appliquer aux résultats une correction qui est de l'ordre de grandeur de la dilatabilité du fil lui-même.

Soient : f la tension, σ la section, E le module d'élasticité du fil, α et γ les coefficients de la dilatabilité naturelle du fil et de la variation du module d'élasticité. La longueur $l_{\theta, f}$ du fil, sous la tension f et à la température θ sera :

$$l_{\theta, f} = l_{0,0} \left(1 + \alpha\theta + \frac{f}{\sigma E (1 + \gamma\theta)} \right).$$

Dans cette expression, la quantité

$$\left(\alpha - \frac{f\gamma}{\sigma E} \right),$$

facteur de θ , devient, en apparence, le coefficient de la dilatation.

Or, ainsi que Marc Thury l'a annoncé pour la première fois ⁽¹⁾, γ est positif pour l'invar et les alliages voisins, à l'encontre de tous les autres métaux ou alliages connus. Le coefficient de

¹⁾ C'est, en effet, dans une conférence faite le 14 mai 1897, que Marc Thury annonça à la Section d'horlogerie de la Société des Arts de Genève la découverte de ce fait singulier; le même fait m'avait été communiqué la veille par Paul Perret, qui l'avait découvert en observant la marche d'une montre munie d'un spiral d'invar, dont je lui avais fourni la matière. Ce fut le point de départ d'une recherche que nous fîmes en commun, et qui conduisit à l'établissement du spiral compensateur (voir *Archives*, tome XV, page 276, année 1903).

dilatation de l'invar soumis à une traction est donc *plus faible* que celui du même échantillon soustrait à toute force extérieure.

La valeur de γ est $0,47 \cdot 10^{-3}$. Elle varie suivant le degré d'écroutissage de l'invar, entre 15 et 16 tonnes-force : mm^2 . On en conclut que, pour les fils du diamètre indiqué, soumis à la tension employée dans mes mesures, la dilatabilité est abaissée de $0,15 \cdot 10^{-6}$. Cette correction a été appliquée uniformément aux résultats bruts, pour les rendre comparables à ceux qui ont été obtenus dans l'étude des barres.

EXPÉRIENCES ET RÉSULTATS

Variations provoquées par l'étuvage suivi d'un long repos. — Les expériences dont je vais rendre compte ont comporté d'abord l'examen, au bout de plusieurs années, des barres étudiées dès le début de mes recherches sur l'invar, et qui avaient été, pour une première fois, à leur arrivée au Bureau international, soit mesurées avant d'avoir subi aucun traitement de laboratoire, soit étuvées et mesurées. Après cette première mesure, elles ont été abandonnées, après avoir, dans certains cas, subi encore un étuvage plus ou moins prolongé. Plusieurs de ces barres furent soumises à un rabotage destiné à enlever la couche d'oxyde, et mettre à nu l'alliage sain, en même temps que pour régulariser leur section, qui, obtenue par forgeage ou laminage à chaud, présentait quelques irrégularités. Deux barres ont même subi un rabotage beaucoup plus important, par lequel leur section a été amenée à la forme en H, mettant à découvert le plan des fibres neutres. Pour y parvenir, la moitié au moins de la matière initiale des barres a été enlevée en minces copeaux, de manière à éviter autant que possible l'écroutissage de surface, toujours à craindre dans un alliage coriace, comme le sont tous les aciers au nickel réversibles.

Les expériences dont il est question ici n'ont nullement le caractère d'une investigation systématique ; celles du début avaient pour objet essentiel de faire connaître les variations de longueur des barres, partant d'états initiaux différents (for-

geage à chaud ou trempe) et soumises à des actions thermiques variées. Les résultats relatifs à la dilatation ont constitué, au bout de quelques années, comme un sous-produit des recherches principales; elles ont permis néanmoins d'arriver à des résultats intéressants et pleinement rassurants, à l'encontre de l'opinion, parfois exprimée, suivant laquelle la très faible dilatabilité de l'invar serait une propriété passagère, qu'un long repos ferait disparaître.

Dans le tableau ci-après, comme dans tous ceux qui suivront, les dilatabilités α , sont données sous une forme abrégée. La presque totalité des bonnes expériences au comparateur conduisent au calcul d'une formule à deux termes, en α et β ; or, dans le faible intervalle de température auquel ces expériences sont limitées (0° à 38°), le coefficient du terme quadratique est d'une détermination très difficile, et sa valeur est souvent peu certaine. La comparaison des résultats condensés dans des formules à deux termes est ainsi rendue délicate; il n'en est pas de même si l'on considère la dilatabilité moyenne dans un intervalle de température à peu près symétrique par rapport à celui que couvre le champ entier des expériences. J'ai donc choisi,

N ^{os} d'ordre	Nickel pour 100	Traitement.	ΔL	α_{20}	$\frac{\Delta\alpha}{\Delta L}$
1	35,2	{Forgée à chaud 4536 jours à la temp. ambiante	38 ^u	$\left. \begin{matrix} 1,27 \\ 1,32 \end{matrix} \right\}$	0,0013
2	35,5	{Forgée à chaud Écroûtée, 150 heures à 100° , 4820 jours temp. amb.	65	$\left. \begin{matrix} 1,21 \\ 1,32 \end{matrix} \right\}$	0,0016
3	35,5	{Forgée à chaud Écroûtée, 40 h. à 150° , refroidie en 50 j. à 40° , 4802 j. temp. amb.	66	$\left. \begin{matrix} 1,18 \\ 1,31 \end{matrix} \right\}$	0,0020
4	35,5	{Forgée à chaud. 55 heures à 100° 150 heures à 60° 62 heures à 100° refroidie en 73 j. jusqu'à 25° , 4015 jours temp. amb.}	34	$\left. \begin{matrix} 1,67 \\ 1,73 \end{matrix} \right\}$	0,0018
5	35,6	{Trempeée, 55 h. à 100° , 187 h. à 60° 4564 jours temp. amb.	26	$\left. \begin{matrix} 1,36 \\ 1,42 \end{matrix} \right\}$	0,0023
6	35,5	{Trempeée 55 h. à 100° , 189 h. à 60° 479 h. à 60° , 856 h. à 40° , 690 j. temp. amb., rabotée en H... 4145 jours temp. amb.		$\left. \begin{matrix} 1,28 \\ 1,31 \\ 1,32 \end{matrix} \right\}$	
7	35,5	{Forgée à chaud, 66 h. à 100° 739 h. à 60° , ref. en 102 j. jusqu'à 25° , rabotée en H.; 320 j. temp. amb. 4145 jours temp. amb.		$\left. \begin{matrix} 1,30 \\ 1,35 \\ 1,33 \end{matrix} \right\}$	

pour établir les comparaisons, la dilatabilité moyenne entre 0° et 40° égale à la dilatabilité vraie à 20° , extrêmement voisine du résultat le plus probable, et présentant l'avantage d'une définition simple. Les résultats sont limités à l'unité $0,01 \cdot 10^{-6}$, bien que le chiffre suivant ne soit pas tout à fait illusoire ; mais la connaissance de ce chiffre ne modifierait en rien les conclusions de mon travail.

L'indication des dilatabilités est précédée ici de celle des variations de longueur observées sur les barres entre les deux mesures de la dilatation ; les dilatabilités sont exprimées en millionnièmes.

L'examen des nombres du tableau montre que l'étuvage ou le repos à la température ambiante relève la dilatation d'une barre d'invar, forgée ou trempée. Ce relèvement a dépassé légèrement $0,1 \cdot 10^{-6}$ dans le cas de deux barres, mesurées d'abord sans aucun traitement préalable, puis écroûtées, étuvées (l'une d'elles à 150°), et abandonnées pendant plus de treize ans. Le simple repos à la température ambiante a produit une modification de $0,06 \cdot 10^{-6}$. Un traitement thermique prolongé, suivi de repos, a conduit à une valeur qui, au bout d'un repos de onze années, a été retrouvée pratiquement identique ou même avec un léger recul apparent, dû probablement à de très petites erreurs d'observation.

La dilatabilité de l'invar forgé ou trempé, légèrement instable au début, peut donc être parfaitement stabilisée.

Les plus fortes variations trouvées sont de l'ordre du dixième de la dilatabilité ordinaire de l'invar. Mais, pour se faire une idée de la grandeur du phénomène, c'est à l'amplitude de l'*anomalie* qu'il convient de comparer le changement. Or cette anomalie, c'est-à-dire l'écart entre la dilatabilité de l'invar et celle qui résulterait de la règle des mélanges est égale à 10 ou $11 \cdot 10^{-6}$. Le changement apparaît ainsi comme étant de l'ordre du centième de la valeur de l'anomalie ; la grandeur de celle-ci n'est donc pas sensiblement modifiée par l'étuvage et le repos.

La dernière colonne du tableau contient le quotient des changements de la dilatabilité par ceux de la longueur des barres. Les nombres qui le représentent, pour les barres forgées, sont tels qu'il est difficile de dire si, en réalité, ce quotient est

ou non constant pour un même alliage. D'autres expériences ont montré que ce quotient varie rapidement avec la composition de l'alliage, dans le sens d'une diminution en même temps que s'abaisse la teneur en nickel ; ce pourrait être la raison de l'écart que présente le premier des quotients ci-dessus par rapport aux suivants. Si cette interprétation est admise, on pourrait considérer comme identiques les quotients correspondant aux changements de la dilatabilité des barres forgées de même teneur, et calculer les variations ultérieures de leur dilatabilité en faisant des modifications de leur longueur.

Actions thermiques de fabrication. — La plupart des barres sur lesquelles ont porté mes recherches avaient été forgées ou laminées à partir du rouge cerise, puis abandonnées au refroidissement spontané à l'air. Un échantillon ainsi traité sera dit à l'état naturel, celui que fournit directement le travail de l'usine, sans aucune autre préparation. De bonne heure, je pus établir que la trempe abaisse la dilatabilité de l'invar, et on put penser que le refroidissement à l'air, comparé au refroidissement au four, produisait déjà une action de même sens.

Des tiges à l'état naturel furent alors remises au four et refroidies à l'air, ou laissées dans le four pour suivre son refroidissement ; enfin, pour examiner si le recuit produit des changements permanents, des tiges recuites furent réchauffées au four et refroidies à l'air.

Au contraire de ces traitements, on examina à nouveau l'effet des trempes, sur des échantillons de dimensions transversales comprises entre 24 mm et 1,65 mm. Les résultats de ces mesures sont condensés dans le tableau suivant, où $\Delta\alpha$ représente le changement de la dilatation, comptée à partir de l'invar naturel.

Traitement.	$\Delta\alpha$.
Tige recuite à 900° et refroidie au four	+0,65. 10 ⁻⁶
Tige recuite à 900° et refroidie à l'air	+0,26 »
La même réchauffée et refroidie à l'air	0,00 »
Barre de 24 ^{mm} trempée	-0,42 »
Tige de 12 ^{mm} trempée.	-0,46 »
Tige de 8 ^{mm} trempée	-0,49 »
Fil de 1 ^{mm} , 65 trempé	-0,53 »

Ainsi, entre une tige réchauffée et refroidie aussi lentement que le permettent des opérations industrielles et un fil refroidi avec toute la vitesse possible, le changement de la dilatabilité est de $1,18 \cdot 10^{-6}$. La vitesse du refoiissement est si efficace qu'on peut en suivre l'effet en connexion avec les dimensions transversales des échantillons trempés.

Actions mécaniques de fabrication. — Ces actions ont comporté essentiellement un forgeage, un étirage ou un laminage à froid, et toutes ces actions se sont montrées propres à abaisser la dilatabilité de l'invar, même sur des barres de forte section. Le laminage a été effectué en vue de l'obtention de rubans servant aux mesures géodésiques; l'étude de ce traitement n'a pas été systématisée, mais on a pu se convaincre qu'il provoquait des abaissements de la dilatabilité à peu près équivalents à ceux d'étirages produisant les mêmes allongements. Les expériences principales ont été faites sur des fils, obtenus par le laminage à chaud jusqu'à 5 mm, suivi d'étirages interrompus par les recuits ou les trempes destinés à adoucir le fil et à permettre ainsi de poursuivre l'opération sans crainte de rupture.

Le diamètre du dernier recuit ou de la dernière trempe a toujours été noté, et c'est à partir de ce diamètre qu'a été compté l'allongement, duquel dépend l'écrouissage. Le tableau ci-après résume ces expériences. Comme dans le précédent, $\Delta\alpha$ désigne la variation à partir de l'invar naturel; $\Delta'\alpha$ représente le changement compté en partant du fil recuit;

	Diamètre de départ.	Allongement pour 100.	$\Delta\alpha$.	$\Delta'\alpha$.
Recuit.	1,65.....	0	+0,21.10 ⁻⁶	
	1,80.....	19	-0,38 »	-0,59.10 ⁻⁶
	1,95.....	40	-0,72 »	-0,93 »
	2,09.....	60	-1,15 »	-1,36 »
	2,20.....	78	-1,38 »	-1,59 »
	2,40.....	112	-1,42 »	-1,63 »
Trempe.	1,65.....	0	-0,53 »	-0,74 »
	2,09.....	60	-1,18 »	-1,39 »
	2,20.....	78	-1,53 »	-1,74 »
	2,44.....	116	-1,42 »	-1,63 »
	2,60.....	148	-1,50 »	-1,71 »

Le recuit du fil a produit, comme pour la tige mentionnée au précédent tableau, un relèvement de la dilatabilité. La différence entre les valeurs trouvées s'explique suffisamment par de petits écarts dans la composition ou dans les circonstances du traitement thermique, et notamment la vitesse de refroidissement. A partir de cette valeur de la dilatabilité, on observe, dans les fils recuits avant étirage, un abaissement de α , rapide pour les premiers allongements, avec une tendance marquée à s'approcher d'une limite, qui est à peu près atteinte lorsque la longueur du fil a été doublée.

Pour les fils trempés, l'abaissement total a été plus considérable, en même temps que plus vite atteint. La fin du phénomène est trouble ; peut-être faut-il attribuer les fluctuations des derniers nombres à des variations spontanées de la dilatabilité, qui se produiraient, à la température ambiante, dans des échantillons dont la dilatabilité a été abaissée au maximum. Les nombres portés au premier des tableaux ci-dessus montrent que ces changements spontanés existent ; il est très naturel de penser qu'ils sont beaucoup plus intenses dans les échantillons dont la dilatabilité a été abaissée artificiellement que dans l'invar naturel. On éluciderait cette question en déterminant la dilatation d'un fil aussitôt après son laminage. Mais, au point de vue de l'emploi des fils, elle est de peu d'intérêt ; ces fils ne doivent pas, en effet, servir à des mesures sans avoir été longuement étuvés, et cette opération fait disparaître les petites variations dans l'état des fils qui se produisent spontanément dans la période immédiatement consécutive au tréfilage.

En mettant l'abaissement maximum en regard du relèvement de la dilatabilité provoquée par le recuit suivi d'un refroidissement lent, on voit que l'écart total de la dilatabilité que l'on peut produire dans un même échantillon d'invar atteint $2,18 \cdot 10^{-6}$, c'est-à-dire le double environ de la dilatabilité d'une tige d'invar naturel, issue d'une coulée bien réussie. La dilatabilité la plus basse obtenue jusqu'ici a été $-0,76 \cdot 10^{-6}$, valeur directement trouvée pour un fil ; la valeur corrigée était donc $-0,61 \cdot 10^{-6}$.

Traitements thermiques au laboratoire. — Il était surtout intéressant d'étudier l'action de l'étuvage sur des échantillons dont

la dilatabilité avait été abaissée artificiellement, par trempe ou étirage. L'échantillon trempé était la plus mince des tiges sur lesquelles l'action de la trempe avait été étudiée ; les échantillons écrouis étaient deux fils de la même botte, dont un fut mesuré après des étuvages progressifs à 70°, l'autre après des chauffes à 100°. Pour la tige, le progrès de l'opération était suivi par la mesure des changements de la longueur, et la dilatabilité n'était mesurée que lorsque cette longueur était devenue pratiquement stable ; pour les fils, le démontage exigé chaque fois par l'étuvage aurait rendu la simple mesure de la longueur tout à fait illusoire ; le progrès de l'étuvage a donc été suivi par les changements de la dilatation elle-même.

Dans le tableau résumant ces mesures, $\Delta\alpha$ représente, comme jusqu'ici, le changement de la dilatation compté à partir de la tige naturelle, $\Delta''\alpha$ la variation constatée à partir de la valeur trouvée avant le début de l'étuvage.

	Traitement.	$\Delta\alpha$.	$\Delta''\alpha$.
Tige de 8 ^{mm} tremp.	Avant l'étuvage.	-0,49.10 ⁻⁶	
	Après l'étuvage à 100°.	-0,21 »	+0,28.10 ⁻⁶
	» 150°.	-0,17 »	+0,32 »
	» 200°.	-0,08 »	+0,41 »
	» 250°.	-0,07 »	+0,42 »
Fil écroui.	Avant étuvage	-1,50 »	
	3 heures à 70°	-1,36 »	+0,14 »
	30 »	-1,20 »	+0,30 »
	300 »	-1,02 »	+0,48 »
	1 heure à 100°	-1,18 »	+0,32 »
	10 »	-1,04 »	+0,46 »
	100 »	-0,88 »	+0,62 »
	12 heures à 250°	-0,70 »	+0,80 »

L'étuvage relève rapidement la dilatabilité, abaissée par la trempe ou l'écrouissage. A 100°, on voit disparaître plus de la moitié de l'abaissement produit par la trempe ; à 250°, il n'en reste plus que le septième.

Pour le fil écroui, ainsi que l'on s'en convaint en traçant la courbe des relèvements, l'effet total est sensiblement atteint en 100 heures à 100°, alors qu'après 300 heures à 70°, la courbe est encore ascendante. Après 250°, l'effet de l'écrouissage subsiste pour la moitié environ de sa valeur.

Le nombre correspondant à la fin de l'étuvage à 100° montre que l'étuvage succédant à l'érouissage laisse la dilatabilité vraie du fil à $0,88 \cdot 10^{-6}$ au-dessous de celle de l'échantillon naturel ; sa dilatabilité apparente, mesurée comme il a été dit précédemment, reste donc abaissée de $1,03 \cdot 10^{-6}$. Or ce nombre est sensiblement celui qui représente la dilatabilité initiale de l'invar de très bonne qualité. Partant de cet invar, on peut donc, par tréfilage et étuvage, réaliser sensiblement une dilatabilité nulle, tout en assurant le maximum possible de stabilité.

C'est ainsi que, par un accord intervenu entre la Société de Commeny-Fourchambault et Decazeville et le Bureau international, on a pu constituer, sous la garde du dernier, un stock important de fil d'invar, étuvé et de dilatabilité extrêmement faible. Lorsque, par son analyse, une coulée d'invar semble devoir conduire très près du résultat cherché, on en étudie un échantillon naturel, et l'on trie ainsi les coulées propres à fournir des fils géodésiques de la meilleure qualité. Les bottes de fil, tréfilées suivant un procédé parfaitement uniforme, sont envoyées au Bureau international, où elles sont étuvées, puis conservées pour servir au fur et à mesure des besoins des géodésiens.

L'étuvage est pratiqué au moyen d'une chaudière cylindrique, traversée dans son axe par un tube, soudé aux deux fonds, plans, qui débordent de quelques centimètres la partie cylindrique. La chaudière constitue ainsi une sorte de grosse bobine, sur laquelle on peut enrouler simultanément plus d'un kilomètre de fil. Le tout étant bien enveloppé, la chaudière est remplie d'eau, que l'on maintient en ébullition pendant quatre ou cinq jours ; puis la température est graduellement abaissée pendant une durée de trois mois. La provision de fil est maintenant suffisante pour que le repos à la température ambiante puisse avoir une durée de trois ou quatre ans.

Étude de l'érouissage des fils. — Dans les usines, on détermine, en général, le degré d'érouissage d'un métal soit par des essais de traction, établissant la limite de la déformation permanente, soit par la mesure des empreintes produites par une bille très dure, pressée avec un effort connu contre la sur-

face de l'échantillon (Méthode Brinell). Nous avons employé, M. Benoît et moi, la première méthode en vue de déterminer l'effort longitudinal que pouvaient subir des fils géodésiques sans éprouver de déformations permanentes. Le procédé que nous avons mis en œuvre, et qui permettait de déceler très aisément des déformations de l'ordre du millionième, nous avait montré qu'un invar modérément écroui résiste indéfiniment à une traction de 20 kg, sous le diamètre ordinaire de nos fils, alors qu'un effort de 30 kg produit, au bout de quelques heures, des déformations permanentes de l'ordre du millionième. Le phénomène étudié est complexe, puisqu'on part d'un fil primitivement enroulé, et dont la forme naturelle est celle d'un arc de circonférence. La première rectification produit une extension de la fibre interne et une compression de la fibre externe; puis, la traction augmentant, la fibre externe passe peu à peu en extension, tandis que la déformation va constamment en croissant pour la fibre interne.

Les mesures que nous avons faites exigeaient une assez grande longueur de fil, le montage, à ses extrémités, d'échelles divisées, puis des observations répétées. J'ai employé, plus tard, un procédé simple et très expéditif, consistant à enrouler le fil sur un diamètre déterminé, et à le laisser s'étendre librement. La connaissance du diamètre de forçement et de celui de la libre expansion permet des conclusions intéressantes sur le degré d'écrouissage du fil.

Pour leur transport, les fils géodésiques sont enroulés sur un diamètre qui est généralement de 500 mm. Si leur diamètre *naturel* d'enroulage est supérieur à ce dernier, la fibre interne sera comprimée dans l'enroulage forcé pour le transport et distendue dans l'emploi du fil; on pourra choisir le diamètre naturel de manière à faire intervenir des déformations du même ordre, et à rester ainsi le plus loin possible de la limite de déformation permanente.

L'enroulage est fait en usine de manière à donner au fil un diamètre naturel de 800 mm environ. Dans ces conditions, un fil bien écroui reste toujours très loin de sa première déformation permanente.

Aussi longtemps que la déformation reste élastique, il semble

que l'on puisse appliquer aux fibres extrêmes les formules élémentaires ci-après :

Soient R_1 et R_2 deux rayons d'enroulage, ω_1, ω_2 les angles correspondants pour une longueur l prise sur l'axe du fil, de rayon r ; $\Delta_1 l, \Delta_2 l$ les déformations des fibres extrêmes. On peut écrire :

$$l + \Delta_1 l = (R_1 + r) \omega_1, \quad l + \Delta_2 l = (R_2 + r) \omega_2,$$

d'où

$$\frac{\Delta_1 l - \Delta_2 l}{l} = r \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right).$$

Cette quantité est l'amplitude de la déformation relative des fibres extrêmes.

Partons d'un rayon naturel d'enroulage, pour rectifier le fil ($R_1 = R, R_2 = \infty$), puis appliquons une traction f . La déformation de la fibre interne sera

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{r}{R} + \frac{f}{\pi r^2 E}.$$

Pour un fil du diamètre normal, dont la forme naturelle est celle d'une couronne de 800 mm de diamètre, les déformations extrêmes résultant de ces formules sont les suivantes :

Opération.	Déformations extrêmes.
Enroulage sous 500 ^{mm}	0,0016
Rectification	0,0020
» et traction 10 kg-force	0,0023
» » 20 »	0,0026
.

J'ai cherché à rapprocher ces résultats de ceux de deux séries d'expériences : enroulage et détente spontanée, et rectification sous traction.

Des fils issus d'opérations différentes ont été enroulés sur des diamètres de plus en plus petits, puis abandonnés à eux-mêmes ; on mesurait les deux diamètres, d'enroulage forcé et d'extension libre, et on en déduisait la valeur des déformations extrêmes. Le tableau ci-après donne un exemple de ces expériences, faites sur un fil modérément écroui.

Diamètre d'enroulage. mm	Diamètre de détente. mm	Déformations extrême.
350	820	0,0027
300	770	0,0033
250	760	0,0042
200	497	0,0049
150	330	0,0060
100	190	0,0078

Le résultat est en quelque sorte décevant, en ce qu'il fait apparaître le phénomène comme beaucoup plus compliqué que ne l'indiquerait la théorie élémentaire. Loin d'être constantes, les déformations extrêmes vont en augmentant à mesure que diminue le diamètre d'enroulage; et, si l'on voulait conclure, d'un enroulage sur un faible diamètre, à la possibilité de rectification sous traction d'un fil sans déformation permanente, on obtiendrait des nombres beaucoup trop élevés.

Les déformations extrêmes révélées par les expériences d'enroulage sur un grand diamètre sont supérieures à celles qui correspondent à une rectification sous un effort de 20 kg, mais inférieures aux déformations produites par un effort un peu plus considérable. Ces résultats sont conformes aux expériences qui viennent d'être rapportées, et l'on peut en conclure que les phénomènes se passent bien, dans ce cas, comme le prévoit la théorie élémentaire.

L'enroulage et la détente sous de grands diamètres sont difficiles à réaliser et à observer correctement; j'ai donc préféré, pour reconnaître la qualité des fils, et établir un *critérium relatif d'écrouissage*, enrouler un fil sur un diamètre de 100 mm, puis l'abandonner à lui-même. L'expérience a montré que, s'il s'étend à 180 mm il est juste suffisant; à 200 mm il est bon; à partir de 220 mm, il est excellent. Un fil d'invar carburé à 0,22 pour cent et fortement écroui a atteint 300 mm.

Le durcissement se produit très rapidement. Ainsi, tandis que, pour un fil recuit ou trempé, le diamètre de détente, après un enroulage sur 100 mm a été trouvé compris entre 125 et 130 mm, il atteignait déjà 185 mm après un allongement de 20 pour cent.

L'étuvage à 100° ne modifie pas de façon appréciable le diamètre de détente, et il semble même qu'un étuvage à 200° l'augmente légèrement. S'il est donc vrai que l'érouissage abaisse la dilatation, les deux propriétés ne sont pas nécessairement connexes, puisque l'étuvage peut détruire plus de la moitié de l'action de l'érouissage sur la dilatation, sans le modifier de façon appréciable pour les propriétés élastiques.

Pourtant, sur des échantillons étirés sans un grand souci d'uniformité des traitements, puis soumis au même étuvage, on a relevé une correspondance qui semble assez nette entre les deux propriétés. L'expérience a porté sur six fils de la même coulée prélevés sur des bottes différentes, dont les dilatabilités vraies et les diamètres d'extension après un enroulage sur 100 mm étaient les suivants :

Diamètres.		Dilatabilités.
mm		
193 } 195	{ +0,120.10 ⁻⁶ } +0,081.10 ⁻⁶
198 }		
200 } 203	{ -0,017 » } +0,018 »
207 }		
209 } 211	{ -0,033 » } -0,010 »
213 }		

La marche conjointe des deux propriétés, insuffisamment apparente dans les nombres isolés, est bien évidente dans les moyennes faites deux à deux.

Ainsi, le durcissement de l'alliage, tel qu'il ressort des mesures faites par le procédé indiqué ci-dessus, possède un effet très réel sur la dilatabilité de l'invar ; mais l'érouissage provoque une autre modification, indépendante de la dureté apparente, et que seule la mesure de la dilatabilité permet de constater.

On pourrait penser, par exemple, que les transformations desquelles dépend l'anomalie des aciers au nickel se produisent autour de noyaux, que le recuit agglomère, alors que la trituration mécanique de l'alliage les répartit dans la masse. Les transformations devront être d'autant plus rapides que les noyaux seront en plus grand nombre ; l'action de l'érouissage sur la dilatation est de même nature que celle de la trempe et peut s'y superposer.

Homogénéité de dilatation de l'invar. — Les causes multiples qui agissent sur la dilatation de l'invar conduisent tout naturellement à poser la question de l'homogénéité de dilatation dans une même coulée, soit à l'état naturel, soit après des traitements divers. J'avais déjà, dans une publication antérieure⁽¹⁾, montré par un exemple que, pour des barres à l'état naturel, les résultats de l'expérience sont très rassurants. Les nombreux contrôles qui se sont accumulés dans les récentes années n'ont pas modifié cette conclusion de la première heure. Bien plus, certaines dilatabilités mesurées sur divers échantillons issus d'une même coulée, se sont montrées tellement identiques, que l'on est obligé d'admettre, dans les mesures elles-mêmes, une part d'heureuse chance pour y avoir conduit.

Il s'agissait là de barres d'assez forte section, et telles que, s'il existait un certain degré d'hétérogénéité dans les plus petites parties du métal, on pourrait admettre que ces inégalités étaient fondues dans une homogénéité moyenne, comme il arrive souvent.

La preuve de l'hétérogénéité locale est fournie non seulement par la micrographie, mais aussi par l'étude de certains échantillons en dimensions transversales très réduites, comme les spiraux des montres.

Les fils occupent une situation intermédiaire, et telle que l'on ne pourrait conclure ni à leur homogénéité en partant de celle des barres, ni à leur hétérogénéité, en se fondant sur celle des spiraux. De plus, les traitements qu'ils ont subis ont modifié leur dilatation, et on peut légitimement se demander s'ils possèdent le degré d'uniformité conduisant à une dilatabilité égale pour tous les échantillons.

Les expériences ont été faites sur des fils destinés à la géodésie, et prélevés sur quatorze bottes, prises dans la même coulée, tréfilées par des procédés industriellement identiques, enfin étuvées ensemble sur la chaudière précédemment décrite.

Pour l'étuvage dont il s'agit ici, les fils formaient dix couches successives, comptées de l'intérieur à l'extérieur; la couche n° 1 était en contact direct avec la chaudière.

¹⁾ *Archives*, 4^e pér., t. XV, p. 262; 1903.

Résultats.

Echantillon.	Couche.	α_{20} .	
1.	10	+0,08	10^{-6}
2.	9	0,00	»
3.	8	+0,10	»
4.	8	+0,13	»
5.	7	+0,10	»
6.	7	+0,05	»
7.	6	+0,03	»
8.	5	+0,08	»
9.	4	+0,06	»
10.	4	+0,11	»
11.	3	+0,03	»
12.	3	+0,03	»
13.	2	+0,04	»
14.	1	+0,12	»

$\left. \begin{array}{l} \text{1. à 7.} \\ \text{8. à 10.} \end{array} \right\} 0,07.10^{-6}$
 $\left. \begin{array}{l} \text{11. à 13.} \\ \text{14.} \end{array} \right\} 0,07.10^{-6}$

Les moyennes ont été faites séparément sur les valeurs correspondant aux fils des cinq couches intérieures et des cinq couches extérieures, afin d'examiner la possibilité d'une hétérogénéité d'étuvage, nettement contredite par l'identité des résultats moyens.

Les écarts individuels excèdent certainement les erreurs possibles des mesures, qui mettent ainsi en évidence une très faible hétérogénéité de dilatation ; cependant, les différences sont si petites que, si l'on adopte la valeur moyenne, l'erreur maximum restera sensiblement inférieure au millionième pour une variation de la température de 10 degrés en plus ou en moins de la température de définition. L'écart probable des dilatabilités n'est que de $\pm 0,02 \cdot 10^{-6}$; l'erreur probable pour une variation de 10 degrés dans la température est, par conséquent, de 2 dix-millionièmes seulement.

En résumé, malgré les causes multiples qui agissent sur la dilatabilité de l'invar, on est parvenu, par des opérations bien conduites, à une homogénéité permettant, même pour des mesures très précises, d'admettre l'identité entre l'échantillon que l'on étudie et celui que l'on utilisera.

Cette conclusion est fort importante pour l'usage qui est fait de l'invar, soit dans la constitution du matériel de mesure des

bases géodésiques, soit pour la construction des pendules et l'application, en grandes séries, d'une compensation uniforme, soit enfin pour des problèmes tels que celui de la mesure de la dilatation d'une règle géodésique, opération difficile et coûteuse, en raison des grandes dimensions de la règle (4 ou 5 mètres), et que l'on remplace par l'étude d'une barre de 1 mètre, issue de la même coulée et ayant subi les mêmes traitements. Ce qu'ont montré mes recherches des dernières années, c'est, en effet, que ces traitements peuvent posséder un degré de constance suffisant pour permettre de garantir, dans la plupart des cas, l'identité pratique de leur action.
