

Zeitschrift: Archives des sciences physiques et naturelles
Herausgeber: Société de Physique et d'Histoire Naturelle de Genève
Band: 9 (1927)

Artikel: La cause de l'instabilité des aciers au nickel
Autor: Guillaume, C.-Éd.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-740864>

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: 22.02.2026

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

La cause de l'instabilité des aciers au nickel

PAR

Ch.-Éd. GUILLAUME

(Avec 5 fig.)

Lorsque j'eus, en mai 1896, l'indication d'une anomalie négative de dilatabilité dans les aciers au nickel, ma première idée fut de rechercher le degré de stabilité de ces singuliers alliages. De cette propriété dépendait, en effet, le domaine des applications que l'on pouvait leur assigner, et l'anomalie trouvée devait avoir plus ou moins d'importance pratique suivant le degré de conservation des dimensions représentées par une barre faite en acier au nickel.

Les expériences me conduisirent à faire, dès la première publication¹, les plus expresses réserves concernant les nouveaux résultats. J'avais opéré d'abord sur une barre d'alliage à 30,8 pour 100 Ni, qui présentait une instabilité extrêmement accusée; plus tard, il résulta des mesures faites sur d'autres barres que l'instabilité décroissait à mesure que l'on s'éloignait de la région de passage des alliages de l'état non magnétique à l'état magnétique: ainsi, elle apparaissait fortement diminuée pour l'invar, sur lequel se portait surtout l'attention. Cette relation de l'instabilité avec la teneur en nickel était d'autant plus vraisemblable qu'une théorie de l'anomalie dont, à l'époque, j'ai donné une esquisse² en rendait parfaitement compte.

¹ Recherches sur le nickel et ses alliages, *Archives* (4), 5, p. 254, (1898).

² Les déformations passagères des solides, *Congrès international de Physique*, 1900, t. I, p. 432.

Plus tard, des discontinuités m'apparurent dans la courbe d'instabilité en fonction de la teneur en nickel, et, finalement, elles m'ont conduit à une étude approfondie des causes du phénomène. Elles ont été trouvées dans la présence du carbone, dont on avait jusque-là sous-estimé la fonction.

La teneur en carbone des alliages, assez élevée dans les premiers de ceux qui furent mis à ma disposition par la Société de Commentry-Fourchambault et Decazeville, n'était pas très exactement connue, parce que, dans la période initiale des recherches, où l'on s'attachait seulement aux grandes lignes des phénomènes étudiés, on n'avait pas jugé nécessaire de déterminer les compositions par des analyses très précises; les dosages du début étaient de caractère industriel, et ne permettaient pas des conclusions de détail. C'est seulement lorsque le gros des phénomènes eut été caractérisé, que l'on reprit les analyses et que l'on put arriver à déterminer certaines particularités qui avaient échappé aux premières investigations.

Le critérium d'instabilité.

D'abord, il fallut trouver un critérium de l'instabilité.

Lorsqu'une barre d'acier au nickel de la catégorie de l'invar revient de la température de la forge, elle s'allonge d'une façon continue à température constante; ce mouvement, de plus

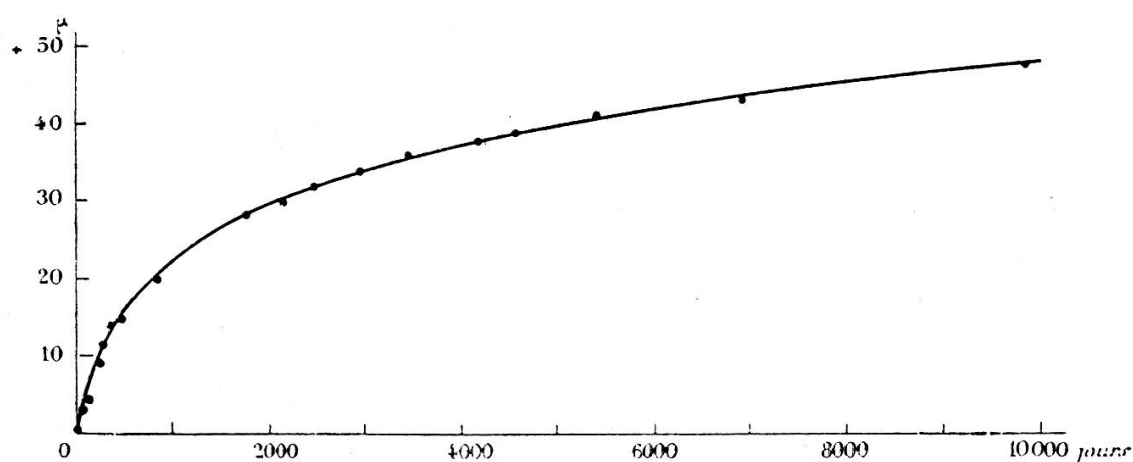


Fig. 1.

Allongement progressif d'une barre d'invar conservée à la température du laboratoire.

en plus faible, a pu être suivi pendant de longues années. L'allongement s'effectue suivant une exponentielle du temps (figure 1): si l'on prend, en effet, comme abscisse le logarithme du temps, l'allongement est représenté par une ligne droite (fig. 2).

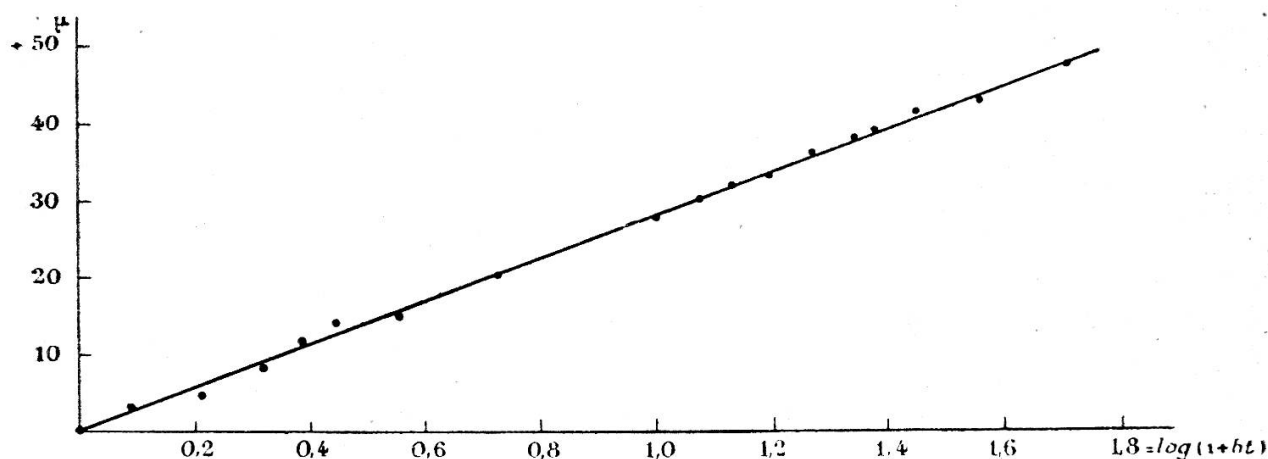


Fig. 2.

Diagramme logarithmique relatif au même phénomène.

La vitesse du mouvement augmente rapidement avec la température, à tel point qu'après 100 heures à 100°, les variations sont à peine perceptibles. Nous trouvons là un moyen très commode de caractériser l'instabilité d'un acier au nickel; il suffit de mesurer une barre à l'état initial, de la réchauffer (en une ou plusieurs fois) à 100°, et de mesurer sa variation. On peut prendre, comme indice numérique d'instabilité l'allongement en microns par mètre qu'éprouve la barre, pendant cette chauffe, qui l'amène à un état à peu près déterminé.

A ce mouvement, se superpose une dépression que l'on peut caractériser comme suit: supposons qu'après avoir étuvé la barre à 100°, on revienne très lentement à la température ordinaire (en six mois par exemple); on trouve alors la barre notablement allongée. Si, maintenant, on la ramène à 100°, elle se raccourcit, revenant, après quelques heures, à la longueur qu'elle avait atteinte lors de sa première chauffe.

On peut déduire de cette expérience un second indice, dont la valeur numérique n'est pas très différente de la précédente. La précision avec laquelle l'instabilité peut être caractérisée est

par conséquent à peu près la même que pour le premier critérium; on choisira donc l'un ou l'autre des procédés, suivant les commodités de l'expérience.

Dans la plupart des cas, les barres, dans l'état où elles se trouvent, sont également impropres à l'application de l'une ou l'autre méthode. A la température ordinaire, les variations des deux ordres se superposent dans un même échantillon, et il faut choisir l'état dans lequel on les amènera.

Par exemple, une barre à l'état initial décrira une courbe telle que OA (fig. 3) tandis que, si elle est restée, en sortant de

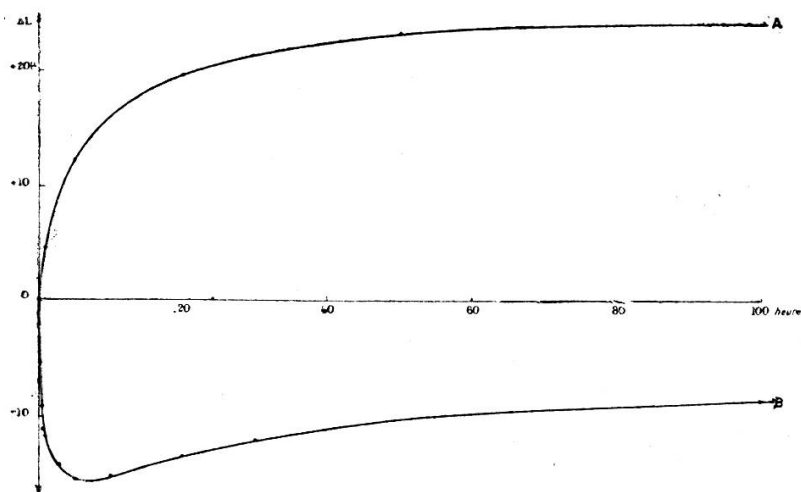


Fig. 3.

Changements de longueur qu'a subis, à 100° , une tige, soit immédiatement après la chauffe au four (courbe OA), soit après un long repos (courbe OB). Les deux courbes ne deviennent superposables qu'après les vingt premières heures de chauffe.

la forge, quelques mois à la température ordinaire, l'exposition à 100° lui fait décrire une courbe telle que OB, dans laquelle on peut voir la superposition des deux ordres de variation. Au début, il se forme une dépression, tandis que, au bout de quelques heures, l'allongement résultant de l'étuvage l'emporte.

En général, il est plus facile, lorsqu'une barre est dans un état mal défini, de la ramener à l'état initial que de chercher à atteindre l'état correspondant à la chauffe suivie d'un refroidissement lent. Afin d'être à même de ramener les barres au premier état, j'ai construit un four formé par un tube de silice chauffé par une spirale que traverse le courant. On peut, au

moyen de cet appareil, ramener en quelques minutes une barre à son état initial. Si ses extrémités ont été protégées de l'oxydation, les expériences peuvent commencer aussitôt.

Action du carbone.

J'ai soumis 76 coulées à la première épreuve. L'indice trouvé est représenté par les courbes de la figure 4 (la plupart des points résument des moyennes obtenues par l'étude de plusieurs coulées de teneurs voisines).

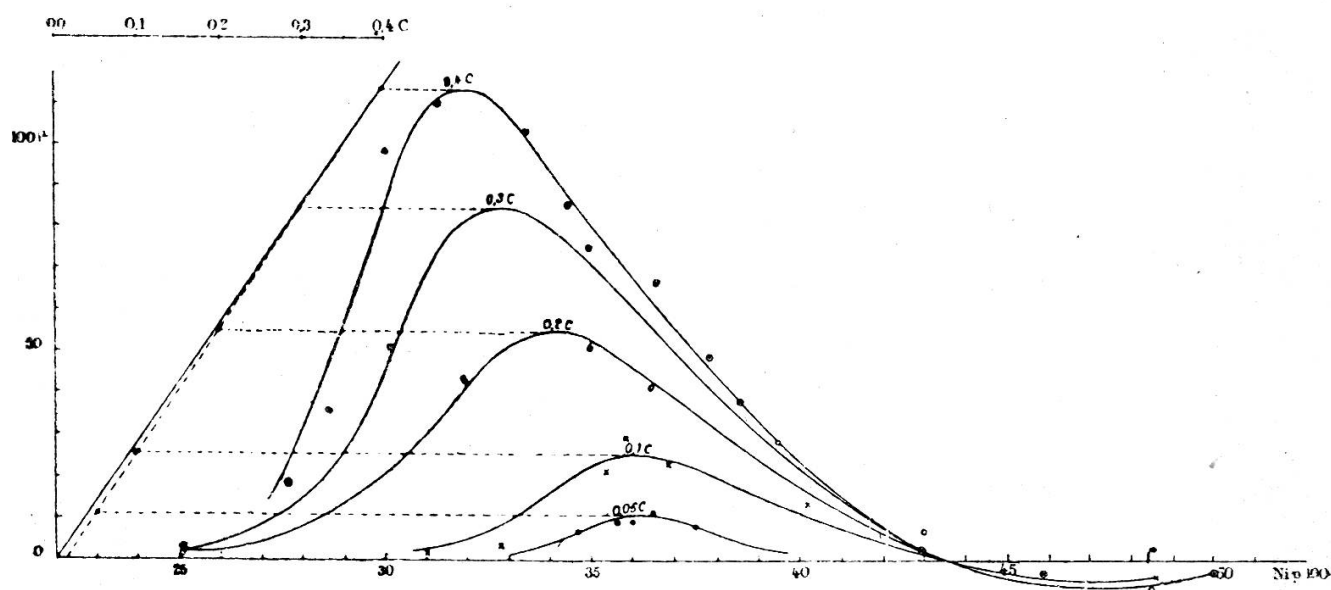


Fig. 4.

Variation, par chauffe à 100°, des aciers au nickel additionnés de proportions variables de carbone (les sommets des courbes sont projetés latéralement, les droites de projection sont recoupées par les ordonnées correspondant au carbone, telles qu'elles sont indiquées au haut de la figure).

Ces courbes nous révèlent d'abord, pour les faibles teneurs en carbone, que le maximum d'instabilité correspond au minimum de dilatabilité, c'est-à-dire au maximum de l'anomalie. Avec les plus fortes teneurs en carbone, le point culminant des courbes se déplace vers la gauche un peu plus vite que ce maximum ¹.

¹ Ch.-Éd. GUILLAUME, Recherches métrologiques sur les aciers au nickel (*Travaux et Mémoires du Bureau international des Poids et Mesures*, t. XVII, p. 87).

En reportant les maxima latéralement, et en les recoupant par des ordonnées correspondant aux teneurs auxquelles chacune des courbes se rapporte, on voit que, au moins en première approximation, l'indice est proportionnel à la teneur de l'alliage en carbone. Le petit écart par rapport à la proportionnalité rigoureuse qui semblerait subsister d'après le diagramme peut s'expliquer par de minuscules erreurs systématiques dans les dosages, ou aussi par le fait qu'il peut exister 1 à 2 dix-millièmes de carbone libre, c'est-à-dire graphitique. On peut affirmer, avec une très grande approximation, que l'instabilité des aciers au nickel est due entièrement à la présence du carbone.

Le deuxième mode de détermination de l'indice conduit identiquement au même résultat.

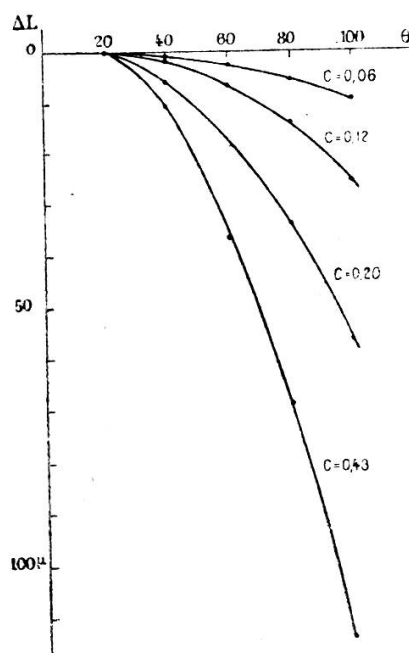


Fig. 5.

Dépression observée sur des tiges d'invar contenant des proportions croissantes de carbone.

Parmi les très nombreux documents utilisés pour arriver à cette conclusion, je reproduirai ici (fig. 5) seulement une série de dépressions déterminées sur des coulées tenant en moyenne 0,06, 0,12, 0,20 et 0,43 p. 100 de carbone, et dont la teneur en nickel est très voisine de 35 p. 100.

Mécanisme de l'action du carbone.

Le problème qui se pose maintenant est celui du mécanisme par lequel le carbone provoque l'instabilité.

Parmi les combinaisons que le fer est susceptible de former avec le carbone, il en est une, particulièrement importante, la cémentite, dont la composition est Fe_3C , et qui a été isolée pour la première fois par M. Wologdine¹; son action marquée sur la dilatation des aciers au carbone, et même des fontes, a été mise en évidence par les expériences de M. Chevenard². J'ai été conduit moi-même à en soupçonner les effets lorsque j'ai cherché à représenter la marche du minimum dans les courbes figurant les dilatabilités des aciers au nickel diversement additionnés.

On sait en effet que les aciers non trempés possèdent une dilatabilité d'autant plus faible qu'ils contiennent une plus forte proportion de carbone; mais, vers 210° , leur courbe de dilatation subit un changement de direction assez brusque, attribuable à la transformation de la cémentite, qui passe alors à l'état non magnétique. Si nous admettons que la cémentite puisse subir, dans les aciers au nickel, des transformations lentes, provoquant des variations de volume de même signe que dans les aciers au carbone, une barre donnée d'acier au nickel devra éprouver, à basse température, un allongement progressif de même origine que le phénomène observé dans les aciers ordinaires, où le refroidissement produit un allongement instantané qui se manifeste comme une atténuation de la dilatabilité.

On ne peut savoir d'avance quelle sera l'allure des transformations que l'on doit observer; mais l'hypothèse prendra une plus grande vraisemblance si l'on parvient, en empêchant, par une addition convenablement choisie, la formation de cémentite dans les aciers au nickel, à obtenir des alliages stables. Nous reviendrons sur cette question, capitale pour l'utilisation que l'on fait de ces aciers dans les mesures de précision.

¹ WOLOGDINE, Sur les propriétés magnétiques de quelques composés de fer (*C. R.*, 148, p. 776 (1909)).

² P. CHEVENARD, Anomalie de la cémentite dans les aciers au carbone recuits, trempés et demi-trempés (*C. R.*, 164, p. 1005 (1917)).

En s'en tenant à l'indication générale que l'on déduit du diagramme, on conclura que l'on peut, connaissant approximativement la composition d'un alliage pas très éloigné du maximum, déterminer avec précision, par des mesures de longueur, la proportion de carbone qu'il contient. Ce procédé s'applique particulièrement bien à l'invar, à la seule condition que l'on soit outillé pour mesurer, à quelques microns près, les changements qu'éprouve une tige de cet alliage. Au moins puis-je dire que, depuis que la relation entre l'instabilité et la teneur en carbone a été établie, j'ai souvent rectifié des dosages de coulées analysées avec la précision industrielle; les vérifications minutieuses faites à Imphy ont toujours donné raison aux déductions tirées de la mesure des longueurs.

On peut préciser dans l'énoncé suivant le résultat essentiel déduit des données qui viennent d'être exposées: le quotient de l'indice d'instabilité maximum par changements progressifs, exprimé en microns par mètre, par la teneur en carbone évaluée en dix-millièmes, est approximativement égal à 2,9.

Dans la suite, nous adopterons ce coefficient pour la recherche des actions produites par le manganèse, le chrome et le cuivre.

Action du manganèse et du cuivre.

Il a été fait de nombreuses expériences pour déterminer l'instabilité des aciers au nickel additionnés de manganèse, alors que, ignorant encore l'action du carbone, on ne possédait pas un guide suffisant pour cette recherche. Lorsque l'action prépondérante du carbone eut été mise hors de doute, il devint aisé de caractériser celle du manganèse.

J'ai opéré sur trois séries d'alliages, contenant environ 2, 5 et 8 pour 100 Mn. Les recherches ont été conduites de manière à fournir des résultats ressortant au premier critérium. Le procédé le plus simple est alors de comparer le quotient de l'indice par la teneur en carbone pour les diverses teneurs en manganèse.

Dans le cas des trois groupes d'alliages mentionnés, ce quotient maximum a pris les valeurs 2,7, 1,9 et 1,6.

Considérons ce dernier nombre. Le rapport du quotient dans les alliages considérés et dans l'invar est 0,55. Par l'addition de



manganèse indiquée, la dilatabilité est relevée jusqu'à $7,6 \cdot 10^{-6}$; l'anomalie est ainsi réduite à $9,8 \cdot 10^{-6}$. Celle de l'invar est égale à $17 \cdot 10^{-6}$. Le rapport de ces deux nombres est sensiblement égal à celui des quotients d'instabilité. On peut donc dire que l'instabilité est diluée, sans que le manganèse exerce aucune action spécifique.

Dans le cas du cuivre, les expériences ont porté sur une seule série d'alliages peu carburés; ils ont conduit à un résultat tout à fait du même ordre.

Action du chrome.

Si l'on ajoute du chrome aux alliages, le phénomène change.

J'ai opéré d'abord sur dix alliages qui tenaient en moyenne 35,9 pour 100 Ni, 0,087 C, et 0,95 Cr. Le quotient de l'indice par la teneur en carbone se trouva réduit à 1,11, au lieu de la valeur 2,90 qu'il possède dans les alliages dépourvus de chrome. La présence de ce dernier annule donc la fraction $\frac{2,90 - 1,11}{2,90} = 0,617$ de l'action du carbone; $0,617 \times 0,087 = 0,0537$ pour 100 exprime donc la quantité de carbone inactif. Le rapport du chrome à celui du carbone combiné est $\frac{0,95}{0,0537} = 17,7$. La combinaison pour laquelle on obtient le rapport le plus voisin est Cr^4C , qui, pour 0,95 de chrome, conduirait à $\text{C} = 0,0550$.

La petite fraction excédente, qui est égale à 0,0013 C, ne sort pas des limites de l'incertitude possible sur l'ensemble des données que nous avons utilisées. Toutefois, on peut parfaitement concevoir qu'un peu de chrome reste libre, dont la proportion, résultant du calcul, ne serait en moyenne que de 0,045 pour 100, soit moins d'un vingtième du chrome contenu dans l'alliage. Quelle que soit l'hypothèse que l'on fasse au sujet de ce petit résidu, on peut admettre que l'action spécifique du chrome tient à l'existence du constituant nommé, toujours présent dans les aciers au chrome.

En somme, pour stabiliser les aciers au nickel, il faut, comme il a été dit précédemment, empêcher la formation de cémentite, en combinant le carbone avec un corps ayant pour lui une plus forte affinité que le fer: tels encore le tungstène ou le vanadium.

J'ai opéré aussi sur des coulées tenant environ 5 et 10 pour 100 de chrome. Ces dernières ont révélé une grande stabilité, malgré des teneurs en carbone qui ont atteint 0,58 p. 100. Toutefois, les aciers en question se sont montrés légèrement grenus, tandis que les surfaces des aciers au nickel ordinaires prennent un admirable poli et permettent des tracés irréprochables. Dans les aciers chromés, il a pu se produire les erreurs de $0^{\mu},3$ ou $0^{\mu},4$ dans la mesure des longueurs; la stabilité ne peut être garantie que dans les limites d'un demi-millionième environ; elle est néanmoins très probable.

Applications.

Depuis qu'ont été achevées les études dont il vient d'être donné une rapide esquisse, on s'est efforcé, pour l'invar destiné à la construction des étalons de précision, d'abaisser autant que possible la teneur en carbone; et la première épreuve à laquelle sont soumis les échantillons des coulées nouvelles est maintenant la détermination de leur indice d'instabilité. Il n'est pas rare que, dans les coulées d'invar non additionné, celui-ci soit abaissé jusqu'à 5^{μ} , en même temps que la dilatabilité de l'alliage à l'état naturel est voisine du millionième ou lui est même inférieure.

Des essais ont été faits en vue d'obtenir des alliages stabilisés par l'addition d'un métal avide de carbone; toutefois, jusqu'à présent, ils se sont butés à la difficulté d'obtenir, dans ce cas, des alliages très peu carburés; le métal additionnel en apporte généralement avec lui, de telle sorte qu'en voulant annuler l'effet d'une très faible proportion de carbone, on en introduit une plus grande quantité.

Des méthodes particulières mises en œuvre pour réaliser des fontes remplissant ces deux conditions, sont actuellement en cours.

Des résultats intéressants ont déjà été obtenus dans cette direction. Je citerai l'exemple d'une coulée tenant 35,8 pour 100 Ni, 0,04 C et 0,46 Cr, qui a donné comme indice d'instabilité $3^{\mu},4$, et comme quotient 0,9.

La dilatabilité de cette coulée, qui était, avant tout traitement,

égale à $1,293.10^{-6}$, est devenue, après une chauffe prolongée à 100° , $1,303.10^{-6}$, soit une variation à peine perceptible de $0,01.10^{-6}$ ¹.

Une tige de cette coulée, trempée et allongée de moitié par étirage, possédait une dilatabilité égale à $0,090.10^{-6}$. Après un étuvage destiné à la stabiliser à la suite des déformations mécaniques qu'elles avait subies, sa dilatabilité est remontée à $0,474.10^{-6}$.

L'étude de cette coulée a été faite surtout en vue de son application à la mesure des bases géodésiques.

On sait qu'aujourd'hui de telles mesures sont faites au moyen de fils tendus, auxquels on cherche à conférer par avance une dilatabilité aussi faible que possible. Dans l'emploi de l'invar ordinaire, on amène en général la dilatabilité des fils à être comprise entre $\pm 0,1.10^{-6}$; mais on pourrait faire un léger sacrifice sur la dilatation, si la stabilité était accrue dans une forte proportion ².

Pour l'application dont il est question ici, il est important que l'alliage possède une limite élastique assez élevée, afin qu'il ne subisse pas de déformations permanentes dans le transport où les fils sont enroulés sur des tambours, et sur le terrain où ils sont rectifiés. Pour que cette condition soit remplie, il faut que l'alliage tienne un certain minimum de durcissants, qui lui impose certaines conditions difficilement conciliables: dilatation comprise entre $\pm 0,1.10^{-6}$, stabilité si possible parfaite et limite élastique assez élevée.

Le programme technique est bien défini, et il est déjà résolu remarquablement. On arrivera, probablement dans un temps prochain, à des solutions encore plus voisines de la perfection.

¹ On peut comparer cette variation à celle qui a été mentionnée dans mon mémoire: Les applications des aciers au nickel (*Archives* (4), 15, p. 249 (1903)) et qui était environ sept fois plus forte.

² En réalité, la dilatabilité de la coulée en question aurait pu être abaissée encore de $0,3.10^{-6}$ par un étirage plus poussé; en outre, comme les fils sont employés sous une tension de 10 kg, leur dilatabilité est, de plus, réduite de $0,15.10^{-6}$, du fait que leur coefficient thermoélastique est positif et égal à $+ 0,00046$.