

Zeitschrift: Archives des sciences physiques et naturelles
Herausgeber: Société de Physique et d'Histoire Naturelle de Genève
Band: 45 (1918)

Artikel: Changements que provoquent dans la dilatabilité des aciers au nickel : les actions thermiques ou mécaniques
Autor: Guillaume, C.-E.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-743008>

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: 07.02.2026

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

CHANGEMENTS

QUE PROVOQUENT DANS LA

DILATABILITÉ DES ACIERS AU NICKEL

LES ACTIONS THERMIQUES OU MÉCANIQUES

PAR

Ch.-Éd. GUILLAUME

(Avec 2 fig.)

L'anomalie des alliages de fer et de nickel dépend, pour son intensité, non seulement de la composition chimique de ces alliages, mais encore des actions thermiques ou mécaniques auxquelles ils ont été soumis. Pour l'invar, qui, de tous les alliages en question, présente l'anomalie maximum, le fait a été surabondamment établi, ainsi que je l'ai exposé dans un mémoire récent¹.

Je vais maintenant montrer, avec moins de détails il est vrai, en quelle mesure les alliages voisins participent à ces changements. Il sera cependant nécessaire de discuter au préalable le sens à la fois physique et métrologique que possède le coefficient β dans la formule de dilatation, arrêtée, comme il est suffisant dans la grande majorité des cas, à son terme du second ordre.

Signification du terme quadratique de la formule de dilatation. Lorsqu'il s'agit de l'invar, un exposé d'ordre général peut

¹ « Nouvelles recherches sur la dilatabilité de l'invar. » *Arch.* 1917, vol. 43, p. 453.

admettre une forme simplifiée. D'un échantillon à l'autre, le coefficient β varie entre des limites assez étroites pour qu'il soit, le plus souvent, impossible d'affirmer que les différences révélées par le calcul des observations correspondent à des réalités, et ne tiennent pas seulement aux petites erreurs inévitables des mesures. En rendant compte de mes recherches relatives à l'invar, j'ai reproduit uniquement les valeurs des dilatations *vraies* à 20°, valeurs qui ressortent sensiblement avec la probabilité maximum des expériences au comparateur ; ainsi, la discussion des nombres expérimentaux était allégée de tous les détails superflus.

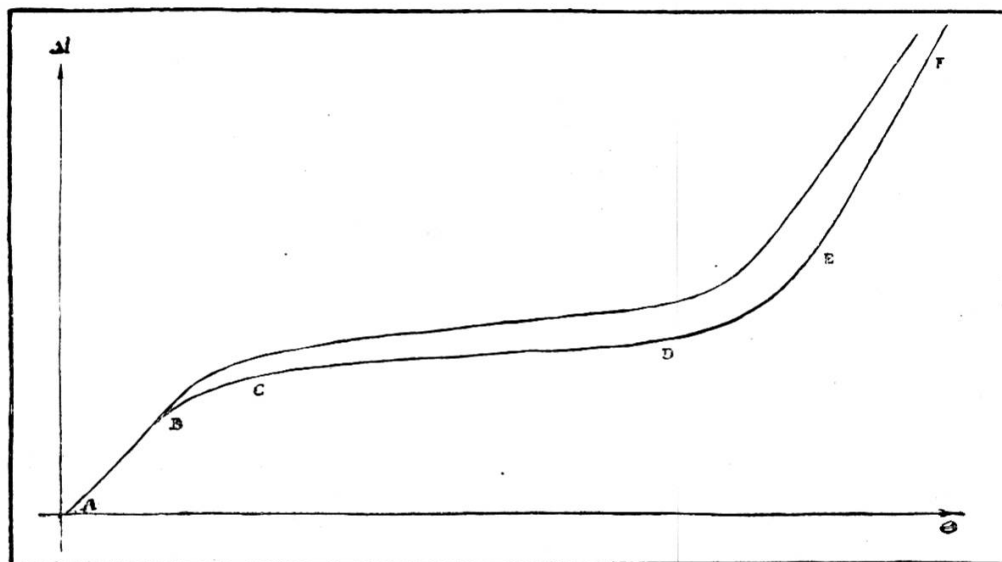


Fig. 1.

Or, le coefficient du terme quadratique, dans l'expression des dilatations, comme de beaucoup d'autres propriétés de la matière, possède une signification très particulière : il indique la plus ou moins grande rapidité du changement de la propriété considérée, et peut, s'il possède une valeur élevée, marquer l'existence d'une transformation.

Dans le cas des aciers au nickel, ce coefficient a un sens précis. Ainsi que je l'ai établi dès mes premières recherches¹, la dilatabilité d'un ferro-nickel est représentée, dans son aspect général, par une courbe analogue à celle de la figure 1 (courbe supé-

¹ *Arch.* 1903, vol. 15, p. 255.

rieure). La première partie AB, sensiblement rectiligne, ou légèrement concave vers le haut (β faiblement positif), marque le phénomène normal; l'incurvation vers le bas, BC (β négatif), indique l'entrée dans l'anomalie; la portion à peu près rectiligne CD qui suit correspond au gros du phénomène; la forte courbure avec concavité supérieure D E (β fortement positif) établit le raccordement avec le deuxième phénomène normal EF, mélange du fer et du nickel à l'état non magnétique. Entre les deux tronçons extrêmes se place la transformation de laquelle dépendent toutes les propriétés anormales des ferromagnétiques.

La dilatabilité vraie, à 20° , des ferro-nickels faiblement mélangés d'additions métallurgiques, est représentée par la courbe A du diagramme fig. 2; le coefficient β suit l'allure marquée par la courbe B. La phase de la plus rapide transformation est indiquée par le maximum de β ; sa valeur est ici vingt ou trente fois plus grande que dans le platine et respectivement six et sept fois plus grande que dans le fer et le nickel, métaux pour lesquels les termes quadratiques sont particulièrement élevés dans les formules représentant leur dilatabilité, comme la plupart de leurs propriétés.

Nous verrons bientôt que, pour un même alliage diversement traité, β peut varier sensiblement. Or, pour pouvoir attribuer aux écarts trouvés leur sens réel, il est nécessaire de nous faire d'abord une idée de la précision avec laquelle ce coefficient est déterminé.

Précision atteinte dans la détermination de β . — Les mesures au comparateur sont, en général, comprises dans l'intervalle de 0° et 38° , limites entre lesquelles on insère un nombre plus ou moins grand de mesures individuelles. Pour les recherches dont il sera rendu compte ci-après, la barre, de 1 mètre, dont je déterminais la dilatation, était comparée, à six températures régulièrement espacées, à une règle de platine iridié, dont la dilatation avait été déterminée directement avec le plus grand soin.

Lorsqu'on opère très près de la température ambiante, la température du bain est, à la fois, bien constante et bien uniforme; la thermométrie est, d'autre part, assez parfaite pour que l'on puisse considérer la température moyenne des barres comparées

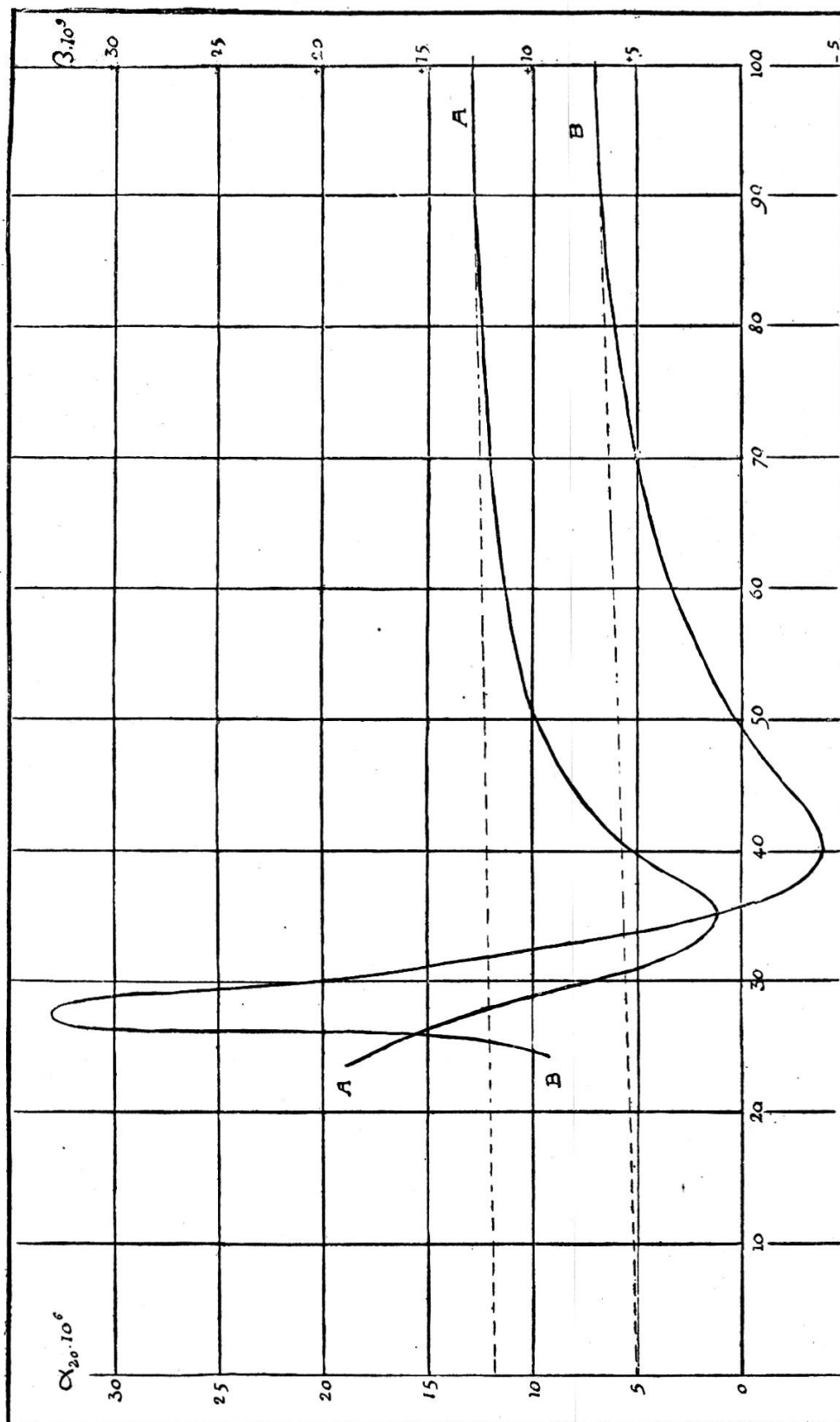


Fig. 2.

comme déterminée sans erreur. C'est, alors, uniquement sur les longueurs que portent les imperfections des mesures, dont on peut fixer la limite, dans des conditions moyennes, comme étant de l'ordre de quatre ou cinq dixièmes de micron pour une série normale.

Mais, si l'on s'éloigne de la température ambiante, les inégalités apparaissent, et les erreurs deviennent sensibles sur les deux variables de l'équation, température et longueur. Aux températures élevées, la buée qui se dépose sur les microscopes, le balancement des traits dû aux courants ascendants, et, comme conséquence, la fatigue de l'observateur, accroissent sensiblement les erreurs des mesures. Vers 38° , des erreurs de l'ordre du micron ne doivent plus être considérées comme impossibles, surtout avec des barres de forte dilatabilité.

Dans un nombre très grand de déterminations reposant chacune sur un nombre restreint de mesures, il se produit sûrement des cas où toutes les erreurs s'ajoutent. On pourra donc imaginer des circonstances telles que la flèche de la courbe de dilatation ressorte des observations avec une erreur de 1^{μ} à $1^{\mu},5$. Dans l'intervalle de 0° à 38° que nous avons supposé, cette quantité entraîne, pour β , une modification de 3 à $4 \cdot 10^{-9}$ et une erreur de cet ordre se montre possible bien que restant très rare. Si donc on constate, entre plusieurs formules de dilatation relatives à un même alliage diversement traité, des écarts de cette importance, on ne pourra pas en conclure avec certitude qu'ils sont réels. Si, au contraire, ils sont doubles, leur réalité ne peut faire aucun doute. Je parle, bien entendu, de mesures faites par un observateur très entraîné.

Reprenant l'aspect métrologique du problème, nous pouvons, maintenant, nous demander, puisque β représente tant d'incertitude, pourquoi ce coefficient est souvent donné, dans les formules de dilatation, avec trois ou quatre chiffres significatifs. La raison en est dans le mécanisme de répartition des valeurs entre les deux coefficients α et β .

Deux systèmes d'observations peu différentes peuvent conduire à des couples de valeurs de α et β dans lesquels ces coefficients, pris isolément, diffèrent de quantités notables; et pourtant, la formule complète conduit, surtout pour un intervalle de tempé-

rature voisin de celui couvert par les mesures, à des résultats presque identiques. Ainsi, pour les applications, les deux formules sont sensiblement équivalentes; mais on ne devra pas chercher, dans les valeurs de α et β considérées séparément, des documents permettant des conclusions relatives à la constitution des corps, si l'on ne connaît pas la limite réelle de la précision avec laquelle ces coefficients, et surtout le second, sont déterminés.

Le calcul de l'erreur probable pourrait dispenser de toute discussion; mais le calcul des erreurs ne conduit à des résultats raisonnables que si le nombre des observations est très grand; il est au contraire dénué de sens lorsque les observations sont en petit nombre; il faut alors s'en remettre à l'expérience du métrologiste pour l'évaluation du degré de certitude des résultats et des conséquences qu'ils entraînent.

ALLIAGES ÉTUDIÉS. RÉSULTATS.

Composition. — Le tableau suivant reproduit, telles qu'elles résultent des analyses faites à Imphy, les compositions des alliages sur lesquels ont porté mes recherches.

Numéros des coulées	Composition des échantillons				
	Ni		Mn	Si	C
	Vrai	Réduit			
133	27,6	27,2	1,2	0,5	0,4
1843	27,7	27,3	1,2	0,4	0,4
3861	31,6	31,7	0,4	0,2	0,2
1186	42,9	42,1	1,8	0,2	0,2
743	43,0	42,8	0,8	0,2	0,2
1265	49,8	49,1	1,6	0,3	0,1
3411	55,8	55,6	0,9	0,3	0,2
502	69,0	68,6	1,1	0,2	0,2

Tous ces alliages contiennent, comme on voit, une très faible proportion de silicium et de carbone, mais plusieurs d'entre eux renferment du manganèse un peu au delà des quantités métallurgiques nécessaires. Or, des recherches portant sur les pro-

priétés magnétiques et sur les dilatations m'ont conduit à établir cette règle approximative : Une unité de manganèse dans un acier au nickel remplace une quantité de fer égale à 1,6, l'excédent sur le total égal à 100 étant porté en déduction sur la proportion de nickel. Cette proposition à laquelle il ne faut pour le moment, attacher d'autre signification que celle d'une notion empirique, sera justifiée dans d'autres publications. On a porté, dans le tableau des compositions, sous le titre « Ni réduit », la quantité de nickel qui assurerait à des alliages contenant uniformément 0,5 Mn, des propriétés sensiblement équivalentes à celles des alliages étudiés. Cette assimilation facilitera plus tard la discussion des résultats.

Ordre des expériences. — Le plan des recherches avait été établi en vue d'examiner, pour chaque coulée, une barre en alliage naturel (laminée à chaud et refroidie à l'air), une barre trempée, une barre réchauffée à 900° et refroidie au four, enfin une barre étirée de 50 p. 100 après trempe.

Il semblait évident que le recuit devait agir, par rapport à l'état naturel, en sens contraire de la trempe. Or, pour plusieurs des tiges recuites à Imphy, les changements furent trouvés de même sens, ce qui m'engagea à soumettre ces dernières à un nouveau recuit. Grâce à la grande obligeance de M. E. Baudin, cette opération a pu être faite dans les fours à porcelaine de la Manufacture nationale de Sèvres. Les barreaux étaient enfermés dans des tubes de fer, que l'on achevait de remplir avec du sable siliceux. La température atteinte par le four dépassait un peu 1000°, et le refroidissement s'effectuait en trois jours. On a trouvé, dans la plupart des cas, les barres incrustées de sable à tel point qu'elles agissaient comme des meules sur les outils d'acier très dur (limes, etc.) employés pour en nettoyer la surface. Le sens des résultats relatifs aux premiers recuits s'est toujours trouvé confirmé et parfois accentué. La concordance étant ainsi établie, plusieurs des barres furent recuites à Sèvres seulement, pour éviter une perte de temps.

Le résultat qui vient d'être énoncé était au moins paradoxal ; j'ai cru pouvoir l'attribuer à une transformation profonde de l'alliage, allant au delà des actions thermiques. Seul le retour à l'état naturel, obtenu par un réchauffement de courte durée

avec refroidissement à l'air, pouvait renseigner sur la partie purement thermique de l'action du recuit. Ce retour a été effectué pour toutes les barres, et il a conduit à des résultats qui ont montré une suite logique du recuit à la trempe.

Résultats. — Les deux tableaux qui suivent condensent les données acquises au cours de ce travail ; on y a joint, pour compléter l'exposé, ceux qui se rapportent à l'invar, et dont la justification se trouve dans le mémoire antérieur consacré à cet alliage.

Partant de la dilatabilité vraie à 20° ou du coefficient β à la même température¹, on a inscrit, dans la suite des tableaux, les écarts que présente chacun des coefficients pour les états recuit, trempé et trempé puis étiré. Pour le premier de ces états, les indications « apparent » et « réel » se rapportent, la première aux résultats immédiats des mesures sur les tiges recuites, la seconde aux différences, prises en revenant en arrière, entre l'état naturel après recuit et ce dernier état. Lorsque les tiges ont subi deux recuits successifs, on n'a inscrit au tableau que les résultats du second.

L'examen des résultats inscrits dans les tableaux montre qu'en dépit de quelques irrégularités, ils présentent une suite assez continue pour permettre d'en établir nettement les caractères.

Pour le coefficient α , le phénomène, maximum pour l'invar, s'atténue dans les deux sens. Du côté des hautes teneurs, il tend graduellement vers zéro, en même temps que l'anomalie elle-même ; pour l'alliage de la plus haute teneur, les changements trouvés excèdent de très peu, en effet, l'incertitude des mesures. Vers les basses teneurs, au contraire, le phénomène se renverse dans la même région que l'anomalie.

Ainsi, l'action des traitements se révèle comme intimement liée à l'anomalie ; elle permet de penser que cette action sera inappréciable pour les métaux ou alliages dont la dilatation suit les lois ordinaires.

L'examen de l'action qu'exercent les traitements sur la valeur de β révèle également des changements singuliers.

¹ Il est, en général, superflu d'indiquer la température à laquelle se rapporte le coefficient β , qui conserve la même valeur dans un très large intervalle ; mais, dans le cas des aciers au nickel, en raison de sa rapide variation, cette indication est nécessaire.

VALEURS DU 1^{er} COEFFICIENT

Nos des coulées	Nickel réduit	$10^6 \cdot \alpha_{20}$ naturel	$10^6 \cdot \Delta\alpha$			
			Recuit		Trempe	Trempe-étirage
			Apparent	Réel		
133	27,2	13,77	+ 0,72	— 0,25	+ 0,30	+ 0,04
1843	27,3	11,45	+ 1,35	— 0,21	+ 0,51	+ 0,62
3861	31,7	2,94	+ 0,79	+ 0,32	— 0,19	— 0,46
Invar	35,6	1,20	+ 0,65	+ 0,65	— 0,46	— 1,00
1186	42,1	8,00	— 0,75	+ 0,15	— 0,26	— 1,00
743	42,8	7,35	— 0,16	+ 0,08	— 0,15	— 0,90
1265	49,1	9,89	+ 0,24	+ 0,21	— 0,08	— 0,38
3411	55,6	11,11	+ 0,04	+ 0,16	— 0,15	— 0,41
502	68,6	12,04	— 0,13	— 0,03	— 0,03	— 0,05

VALEURS DU 2^{me} COEFFICIENT

Nos des coulées	Nickel réduit	$10^6 \beta$ naturel	$10^6 \cdot \Delta\beta$			
			Recuit		Trempe	Trempe-étirage
			Apparent	Réel		
133	27,2	+ 23,8	— 9,3	— 1,3	— 1,6	— 2,8
1843	27,3	+ 34,3	— 7,0	+ 2,2	— 1,0	— 9,9
3861	31,7	+ 12,9	— 2,3	+ 2,0	+ 2,4	+ 3,7
Invar	35,6	0,0	+ 0,4	+ 0,4	+ 0,2	+ 1,2
1186	42,1	— 3,3	— 1,7	+ 1,3	— 1,3	— 3,5
743	42,8	— 3,7	+ 0,3	0,0	+ 2,6	— 3,7
1265	49,1	— 0,8	+ 0,5	— 0,3	— 3,5	— 3,3
3411	55,6	+ 4,4	— 2,3	— 0,8	— 3,6	— 3,4
502	68,6	+ 3,9	— 2,2	— 2,2	— 0,4	+ 1,0

Nous voyons d'abord, pour les deux premiers alliages, ce coefficient notablement abaissé par le recuit. Ce changement, rapproché de celui de α , montre que ces alliages, qui se trouvaient, à l'état naturel, dans la région de la plus rapide transformation, en sont sortis vers le haut, c'est-à-dire par un déplacement de cette région vers des températures plus basses. Ce changement est définitif, puisque le retour à l'état naturel se produit avec le maintien du nouveau β . Dans la suite, les changements sont faibles, et la plupart n'excèdent guère l'incertitude possible des observations.

La trempe exerce, sur la valeur de β , une action de peu d'importance, et chacun des résultats, pris isolément, pourrait être considéré comme dépassant à peine la limite d'incertitude des mesures; mais la continuité, à peine troublée, de la suite des nombres, conduit à penser que l'action est ondulatoire; faiblement négative aux basses teneurs, positive aux teneurs moyennes, puis négative, enfin nulle lorsque l'anomalie disparaît.

La même observation s'applique aux nombres relatifs à l'état trempé-étiré; mais ici, les changements sont beaucoup plus considérables¹.

L'ensemble des résultats trouvés pour α et β permet, dans le cas des alliages écrouis, où ils sont particulièrement nets et de grande amplitude, de tracer, en s'aidant de la règle des états correspondants, l'allure de la dilatation pour un même alliage, à l'état naturel et à l'état écroui, ou tout au moins de marquer les différences dans l'allure des dilatations pour ces deux états.

Nous avons analysé, au début de cette note, les caractères des divers tronçons de la courbe ABCDEF (fig. 1, courbe supérieure), correspondant à l'état naturel. A ses débuts, la courbe relative à l'état écroui est tangente à la première, et même osculatrice, puisque les deux coefficients possèdent les mêmes valeurs; on se trouve ici, en effet, aux confins de l'anomalie de dilatation en un point que marque l'alliage n° 502. Puis β diminue et tend

¹ Le dernier des résultats pourrait aussi bien, au sens métrologique, être interprété comme étant égal à zéro. Il suffirait, en effet, pour cela, de modifier, pour l'alliage naturel ou l'échantillon tréfilé, la flèche de la courbe de $0^u,3$.

vers les valeurs plus fortement négatives (segment BC, courbe inférieure); la dilatation à l'état écroui est caractérisée à la fois par une valeur plus basse de α et β ; la courbe s'écarte vers le bas, avec une concavité plus accentuée, ce qui amène, pour la région de l'invar, à des dilatabilités négatives, représentées par la première partie du segment CD. Ensuite, β se relève, de façon à ramener la courbe des dilatations vers des valeurs positives; enfin la différence redevient négative, ce qui est l'indice d'une moindre courbure de la région DE. Le dernier segment EF est plus incliné dans la courbe inférieure, puisque α est plus fort à l'état écroui qu'à l'état naturel. On voit ainsi que les changements trouvés pour α et β s'accordent pour permettre de dessiner, sans rencontrer une seule contradiction, la courbe générale des dilatations.

L'étude des changements qu'éprouve la dilatation de l'invar par l'effet de traitements thermiques ou mécaniques divers a été le point de départ d'applications intéressantes, notamment pour l'obtention des fils destinés à la mesure des bases géodésiques; on vient de voir comment les changements trouvés pour cet alliage s'insèrent, ainsi que sa dilatabilité à l'état naturel, dans l'ensemble des phénomènes qui constituent l'anomalie des aciers au nickel.
