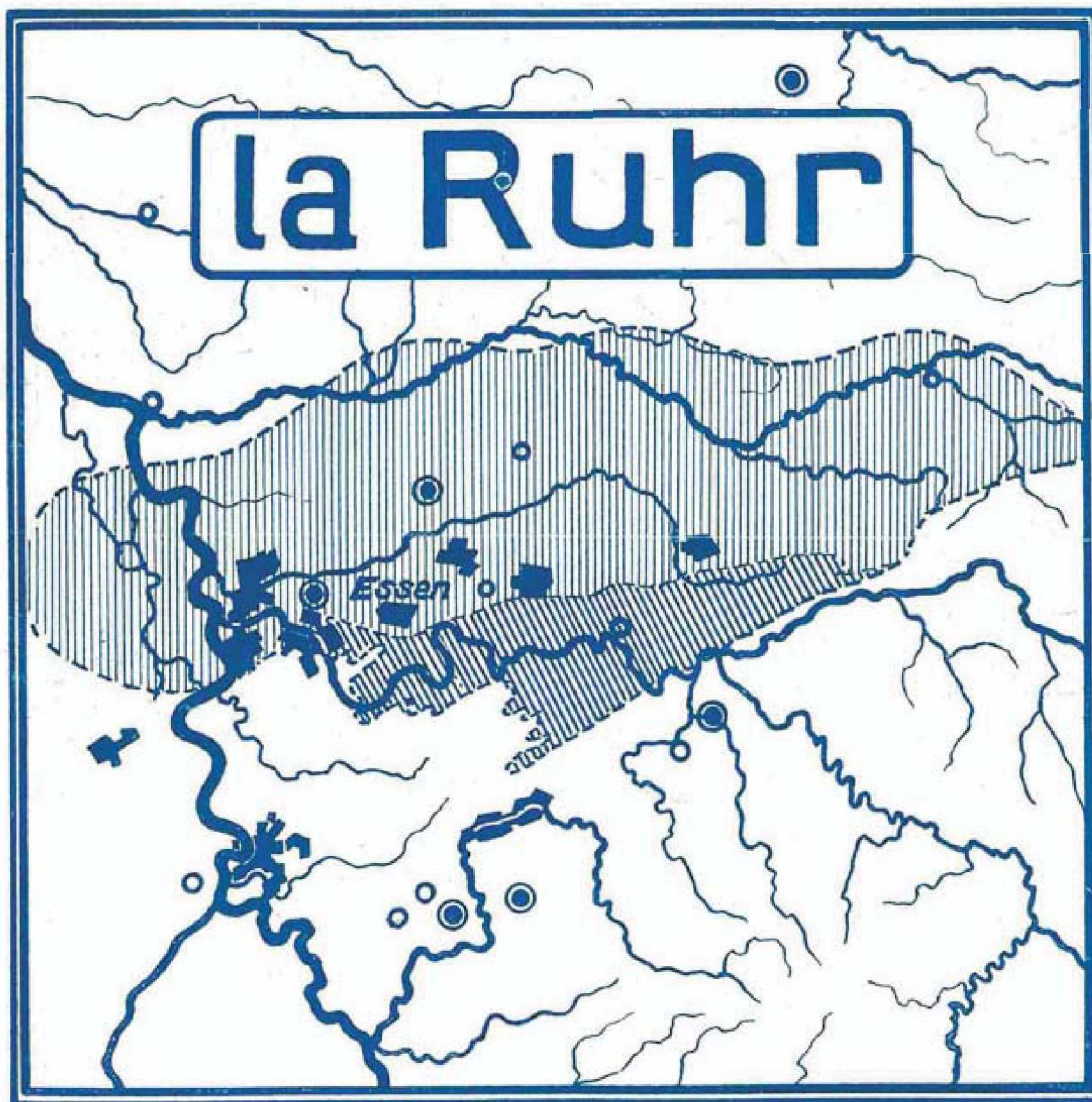


LA NATURE

REVUE DES
ET DE LEURS
AL'ART ET A



SCIENCES
APPLICATIONS
L'INDUSTRIE



SOMMAIRE

Le bassin houiller de la Ruhr : Ph. S.
La climatologie comparée des années 1921 et 1922 : Joseph Lévine.
Les roses de Jéricho : Émile Gadeceau.
L'Invar et l'Élinvar : Ch.-Ed. Guillaume. — Chronique. — Académie des Sciences : Paul B.
Les maisons qui marchent : M. Bousquet.

SUPPLEMENT : Informations : Un nouveau poste radiotéléphonique. — Le poste de Nice, etc. — Science appliquée : T. S. F. — Automobilisme, etc. — Variétés. — Boîte aux lettres. — Bibliographie.

MASSON ET C^{ie}, Éditeurs.
120, boulevard Saint-Germain, Paris.

LE NUMÉRO : 1 franc.



ULTIMHEAT[®]
UNIVERSITY MUSEUM



L'INVAR ET L'ÉLINVAR

Recherches nouvelles sur l'Invar. — L'invar est, comme le savent nos lecteurs, un alliage de fer et de nickel, à 36 pour 100 environ de ce dernier, qui jouit de la singulière propriété de n'éprouver, par la chaleur, qu'une très faible dilatation. Mais cette indication ne suffit pas à la connaissance complète de l'invar; il faut savoir quelle est, sur ses propriétés, l'action des corps étrangers, et quelle est aussi l'influence des traitements thermiques ou mécaniques que peut subir l'alliage. J'ai consacré à ces questions complexes de longues recherches, que je vais très brièvement résumer.

Action d'un troisième constituant. — Le carbone et le manganèse sont, l'un inévitable, l'autre indispensable pour rendre le métal sain et facile à forger. Les quantités considérées comme normales sont 0,4 pour 100 pour le manganèse et 0,1 pour 100 pour le carbone; mais on s'écarte, en pratique, de ces proportions, que l'on ne peut pas réaliser rigoureusement et qu'on a, de plus, intérêt à réduire ou à augmenter, lorsqu'on veut conférer à l'alliage certaines propriétés particulières.

Des métaux divers peuvent, en outre, intervenir dans l'alliage pour lui assurer des qualités jugées utiles; tels sont le chrome, le tungstène, le cuivre, etc., qui élèvent sa limite élastique, ou le rendent plus ductile.

Le diagramme (fig. 1) donne une idée nette de leur action sur la dilatabilité. La courbe de base correspond aux alliages contenant le manganèse et le carbone normal, et que l'on pourrait nommer les alliages-types; les autres renferment la proportion de nickel marquée par l'abscisse, et pour le manganèse, le chrome, le cuivre et le carbone, la teneur indiquée sur les courbes. Ce sont les limites pratiquement atteintes; au delà, les alliages deviennent d'un traitement difficile.

On voit que toutes les additions élèvent la dilatabilité, et l'on en conclut, par extrapolation, que celle d'un alliage de fer et de nickel seuls serait, au minimum, sensiblement nulle.

Bien entendu, l'influence des additions ne varie pas proportionnellement à celle-ci; le coefficient s'atténue à mesure qu'augmente la teneur en corps

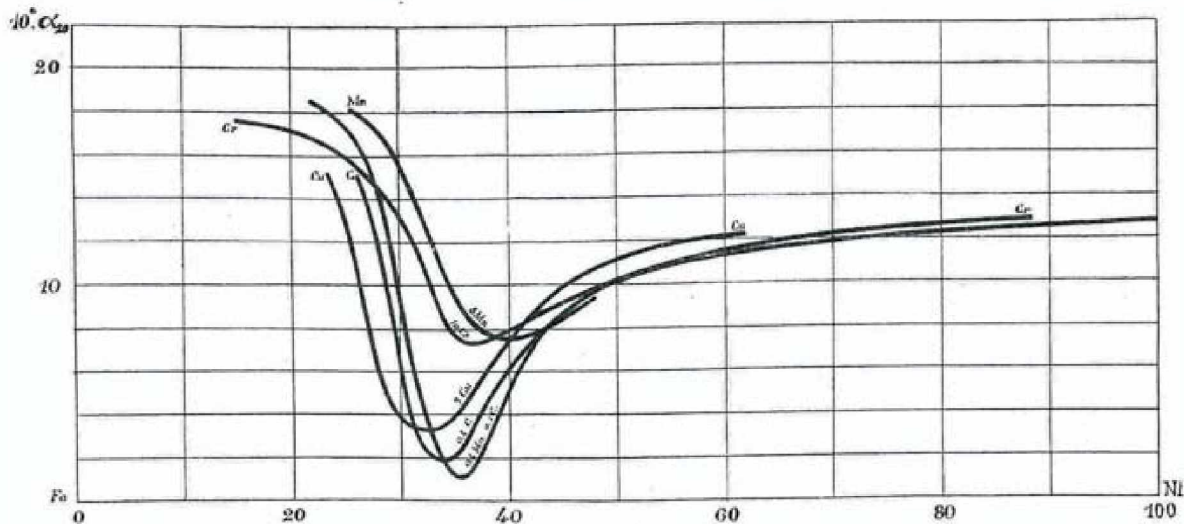


Fig. 1. — Influence de la présence de nickel, de manganèse, de chrome, de cuivre, de carbone sur la dilatabilité des aciers Invar.

(Les courbes indiquent, en abscisses : les teneurs de métal étranger ; en ordonnée : le coefficient de dilatation.)

étrangers. Possédant l'analyse complète d'un alliage donné et connaissant, pour chaque teneur, les coefficients de chacun des composants, on peut aujourd'hui calculer sa dilatabilité avec une grande précision.

Dès qu'on s'éloigne du minimum, chaque valeur de la dilatabilité peut être obtenue par des combinaisons diverses, et, parmi les compositions entre lesquelles on a le choix, on s'arrêtera à celle qui réalise le plus complètement les propriétés que l'on veut obtenir.

Action des traitements. — Dans ce qui précède, on a toujours supposé que l'alliage était naturel, c'est-à-dire forgé à chaud et refroidi à l'air. Mais, chose singulière, dans les aciers au nickel, le traite-

ment subi par l'alliage possède une action notable sur la dilatabilité. Si on l'a refroidi lentement dans le four, elle est plus forte; s'il est trempé, elle est moindre; s'il est soumis à un écrouissage, elle s'abaisse encore, de telle sorte que la dilatabilité de l'invar, qui est normalement de $1^{\circ}10^{-6}$, peut différer de $1,7^{\circ}10^{-6}$, si un échantillon donné est soit refroidi au four, soit trempé et écroui. On peut ainsi amener, par étirage, de l'invar bien réussi à posséder une dilatabilité négative; mais cette valeur est instable, car, il suffit de réchauffer l'alliage, par exemple à 100° , pour le voir devenir moins anormal, et, au bout d'une centaine d'heures, prendre une dilatabilité limite, de $0,6^{\circ}10^{-6}$ plus forte que la valeur artificiellement abaissée.

Ainsi, chose singulière, un échantillon d'invar étant donné, on est maître de sa dilatabilité dans des limites étendues, et celle-ci, une fois fixée, conserve sa valeur. C'est une particularité précieuse de ce remarquable alliage.

Variations progressives. — Dès le début de mes recherches sur l'invar, j'avais signalé la variation progressive qu'éprouve cet alliage, et qui consiste en un allongement spontané, qui va en s'atténuant, mais que des mesures précises et suffisamment espacées permettent encore de déceler après plus de vingt ans.

J'avais cru que ce changement était inhérent à l'invar, et même j'avais établi une théorie démontrant qu'il en était nécessairement ainsi; non point une théorie philosophique d'après laquelle la nature compense toujours ses bienfaits par quelque maléfice, mais une théorie physico-chimique des transformations, de laquelle résultait la démonstration même de ce changement.

Heureusement, comme je m'en suis convaincu plus tard, cette théorie était fautive. Dans ces dernières années, j'ai trouvé que le carbone est seul responsable des changements progressifs de l'invar, à tel point que, si on pouvait en débarrasser com-

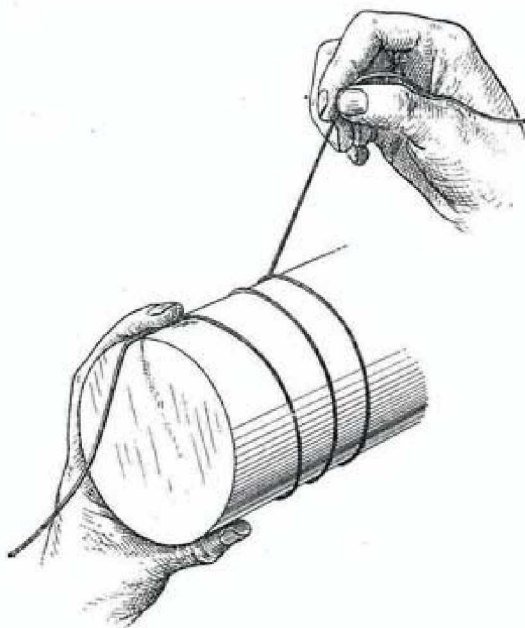


Fig. 2. — Expérience permettant d'apprécier l'élasticité d'un fil géodésique.

plètement l'alliage, on aurait de l'invar absolument stable. Mais le fer est tellement avide de carbone qu'on ne peut pas l'en libérer entièrement, et il en est de même de ses alliages où il intervient comme un constituant essentiel. Ayant réduit le carbone au minimum possible, il faut alors ajouter à l'alliage un peu de chrome, qui, formant avec ses derniers restes, une combinaison stable, annule son effet nocif. La diminution du carbone abaisse la dilatabilité, l'addition du chrome la relève; on obtiendra donc l'invar stable avec une dilatabilité différant peu de celle de l'invar normal. Dans la pratique, et comme on ne dose pas toujours exactement les composants, on consentira, cependant, soit un petit reste d'instabilité, soit une dilatabilité appréciable.

Fils géodésiques. — Aujourd'hui, toutes les mesures de bases géodésiques sont faites au moyen de fils d'invar librement suspendus. Pour préparer ces fils, on choisit une coulée qui, à l'état naturel, possède une dilatabilité voisine de 1 millionième, puis on la soumet à l'étirage, et, pour finir, on l'étuve, opération qui consiste à la chauffer à 100°, température que l'on maintient pendant plusieurs jours, puis qu'on fait décroître de manière à atteindre la température ordinaire au bout de trois mois environ. On amène ainsi sûrement la dilatabilité à une valeur telle que, si un fil fait avec une semblable coulée est employé à l'air libre, on peut commettre sur sa température une erreur de 5 degrés, sans qu'il en résulte, pour sa longueur, une valeur erronée de 1 millionième; mais, la plupart du temps, on arrive à la moitié de cette limite, de telle sorte que la mesure de la température devient presque superflue.

Il est essentiel aussi que les fils géodésiques possèdent une élasticité élevée. Ils sont, en effet, enroulés pour leur transport sur un cercle d'un diamètre de 50 centimètres et, pour leur usage, ils sont tendus par un effort de 10 kilogrammes. Or, il faut que ces deux opérations se fassent sans aucune déformation permanente, c'est-à-dire à l'intérieur de la limite élastique.

On peut déterminer très simplement cette limite en obligeant un fil, de 1 mm. 65, qui est le diamètre normal des fils géodésiques, à s'enrouler sur un cylindre de 10 centimètres et en le laissant reprendre sa forme naturelle (fig. 2). S'il s'étend en une circonférence de 20 cm. il est bon; à partir de 22 ou 25 cm. il est excellent. Avec un invar très carburé, par exemple à 0,4 ou 0,5 pour 100, on arrive à un diamètre d'expansion de 29 ou 50 cm.; mais un fil possédant cette composition aurait une dilatabilité notable et, de plus, posséderait une instabilité marquée. Il y a, au contraire, intérêt, comme nous l'avons vu, à éliminer le carbone autant que possible. Alors, pour donner à l'alliage une élasticité suffisante, on l'additionne de chrome qui, comme nous l'avons vu, relève la limite élastique en enlevant les dernières traces d'instabilité.

L'Élinvar. — L'élinvar est un mot nouveau qui

désigne un alliage à élasticité invariable. Cette propriété est aussi fort importante. Diapasons pour la mesure des intervalles de temps, suspensions monofilaires, et par-dessus tout spiraux de montres, gagneraient beaucoup à être faits en un alliage conservant la même élasticité à toutes les températures auxquelles l'instrument peut être amené.

Dans les métaux ordinaires, le coefficient de variation du module d'élasticité ou *coefficient thermo-élastique* est de l'ordre de 1/5000 à 1/5000. Ce coefficient est une fonction des dilatations, et une statistique, faite sur les métaux et alliages normaux, a montré qu'il est 20 à 25 fois plus grand que ces dernières.

Dans les montres, c'est le changement d'élasticité du spiral qui est responsable de la plus grande partie des variations de la marche par l'effet de la température, à tel point que, si les dilatations étaient seules en jeu, on aurait sans doute découvert leur action seulement à une époque récente. Mais il y a plus de cent cinquante ans que l'on connaît cette action, et le balancier compensateur, inventé par Pierre Le Roy et perfectionné par Arnold, puis par Earnshaw, est l'organe qui, par ses changements, est chargé d'annuler ceux du spiral.

Il y a environ vingt-cinq ans, un horloger fort distingué, Paul Perret, ayant tiré un spiral d'un morceau d'invar que je lui avais envoyé, constata que la montre qui en était munie avançait au chaud. Il me proposa d'associer nos efforts, et c'est ainsi que nous arrivâmes à une première solution du problème de la compensation par le spiral.

Reprenons la question à son origine. Les aciers au nickel présentent, au point de vue de l'élasticité, une anomalie tout aussi curieuse que celle de leur dilatation. Si l'on porte en abscisses la température, en ordonnées le module d'élasticité, on obtient une courbe telle que A (fig. 5), et l'on voit qu'un acier au nickel déterminé, loin de s'affaiblir constamment à mesure que la température s'élève, comme le font les autres métaux, traverse une région de complète anomalie, où le module se relève; l'anomalie franchie, il s'abaisse de nouveau. Nous avons donc deux points où la variation du module est nulle; ce sont le minimum et le maximum de la courbe.

Si, maintenant, nous prenons pour abscisse la teneur en nickel et pour ordonnée le coefficient thermo-élastique à 20°, nous obtenons une courbe telle que B (fig. 4), qui montre l'anomalie sous une autre forme. Pour toutes les teneurs entre 28 et 45 pour 100, l'ordonnée de la courbe est positive, et, dans cette région, l'alliage se raidit lorsqu'on le chauffe; le maximum de l'anomalie a lieu pour l'invar; si l'on fléchit une barre de ce métal par un poids déterminé, on la voit se redresser un peu quand on élève sa température.

Les deux points où la courbe coupe l'axe des abscisses, et qui correspondent au maximum et au minimum de la courbe A, représentent un élinvar.



mais un élinvar incomplet; en effet, l'élasticité de ces deux alliages est invariable seulement dans un intervalle de température infiniment petit, des deux côtés duquel elle se relève ou s'abaisse. De plus, l'alliage est extrêmement sensible aux variations des teneurs, puisque la courbe B coupe l'axe des abscisses sous une forte inclinaison.

Malgré les défauts de ce premier élinvar, il peut rendre des services fort importants; ils sont nettement mis en lumière par le fait qu'on a construit près de 50 millions de montres qui doivent leur compensation approximative à ce qu'elles sont munies d'un spiral de cet alliage.

Dans ces spiraux, l'erreur secondaire est considérable; comme le module d'élasticité passe par un maximum (le minimum n'a pas été utilisé pour des raisons de limite élastique), les montres avancent d'abord lorsque la température s'élève, puis retardent ensuite; le maximum est assez brusque, et, en supposant le spiral exactement ajusté sur un intervalle de 50 degrés, c'est-à-dire en admettant que la marche de la montre soit la même à 50° qu'à 0°, elle sera de 20 à 25 secondes en avance à 15°. Le gain est cependant énorme sur le spiral d'acier, qui donnerait, dans le même intervalle, une variation de marche de 5 à 6 minutes par jour.

Je crus pendant longtemps que l'erreur secondaire du nouveau spiral ne pourrait pas être réduite, et qu'on avait tiré des aciers au nickel tout ce qu'ils pouvaient donner pour le réglage. En 1912 cependant, m'apparut le vague espoir d'une solution complète. J'étais alors occupé aux recherches sur l'action d'un troisième constituant, et, me fondant sur une analogie, je vis nettement comment on trouverait l'élinvar absolu.

En rapprochant la courbe qui représente l'anomalie d'élasticité de celle qui figure la dilatabilité des alliages types (fig. 1, 3 et 4), nous remarquons qu'elles sont approximativement symétriques l'une de l'autre. D'autre part, nous savons que les addi-

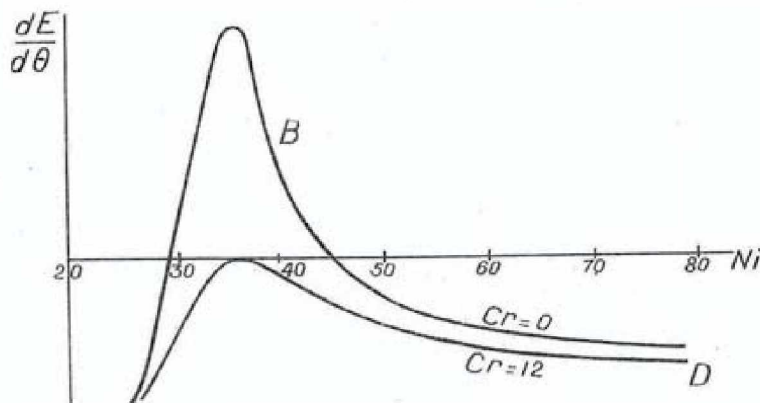


Fig. 4. — Valeur à 20° du coefficient thermo-élastique d'un acier au nickel en fonction de sa teneur en nickel.

Courbe B. On voit également ici une région d'anomalie, dans laquelle ce coefficient est positif.

La courbe D, tangente à l'axe des abscisses et pour laquelle cette anomalie est supprimée correspond à l'alliage contenant une proportion d'additions équivalente à 12 pour 100 de chrome.

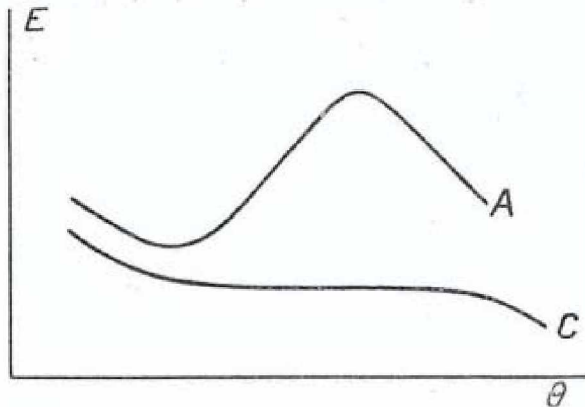


Fig. 3. — Valeur du module d'élasticité dans un même acier au nickel en fonction de la température.

Courbe A. On voit que dans une certaine région, le module d'élasticité, au lieu de diminuer, se relève avec la température.

La courbe C pour laquelle cette anomalie est supprimée correspond à un alliage contenant une proportion d'addition équivalente à 12 pour 100 de chrome.

tions combleront peu à peu le fossé que présentent les anomalies de dilatation, et il était naturel de penser qu'il en serait de même pour l'anomalie d'élasticité.

Cette idée ayant mûri, je demandai à la Société de Commentry-Fourchambault et Decazeville, qui m'avait toujours soutenu dans ces recherches avec une largeur de vues à laquelle je ne puis assez rendre hommage, de me fournir des alliages chromés destinés à mettre en évidence les propriétés prévues, et à en fixer la valeur numérique. Les expériences aussitôt commencées avec la collaboration de la Société des Fabriques de Spiraux réunies, furent bientôt interrompues par la guerre, et n'ont permis des conclusions certaines qu'en 1919. J'avais tracé alors une courbe des élasticités en fonction du nickel telle que D (fig. 4), qui était tangente à l'axe des abscisses; on avait donc un alliage qui, tout en possédant un coefficient thermo-élastique nul, laissait une certaine marge pour les teneurs, et, fait qui est une conséquence du premier, le module d'élasticité montrait un palier entre deux branches descendantes (courbe C, fig. 5). On avait donc un élinvar absolu, dans lequel le coefficient thermo-élastique nul était figuré par un point d'inflexion.

Des recherches faites par M. P. Chevenard, aux Aciéries d'Imphy, avec des alliages de fer, de nickel et de chrome aussi purs que possible, ont montré que l'on obtient ce résultat avec une addition de 12 pour 100 de chrome. Mais, dans la pratique, il est avantageux de recourir à une autre solution; en effet, toutes les additions agissant dans le même sens, on gagne à les combiner de telle sorte que les alliages réalisent autant que possible l'ensemble

des propriétés cherchées : facilité relative de travail, limite élastique élevée, permanence dans le cours du temps, etc. Ainsi a été franchie la dernière étape dans ce problème difficile de la compensation par la réalisation de l'élinvar parfait, et l'on peut dire qu'une ère nouvelle vient de s'ouvrir pour le réglage des montres; désormais, le spiral compensateur s'applique à la très bonne montre.

Jusqu'ici, pour simplifier l'exposé, il n'a pas été tenu compte des effets de la dilatation; les variations d'élasticité du spiral étant de beaucoup la cause la plus importante des changements de marche aux diverses températures, on a supposé qu'elles agissaient seules. En fait, c'est à un balancier donné, par exemple en laiton, que l'on doit chercher à appliquer l'élinvar. Mais, comme les réalisations métallurgiques ne se font pas avec une rigueur absolue, les diverses coulées d'élinvar exigent, pour assurer la compensation, des balanciers de dilatabilité un peu différente. On a, du laiton à l'invar, une marge assez large pour trouver toujours un balancier qui s'adapte le mieux possible à une coulée d'élinvar, et que l'on déterminera par l'essai de la coulée; ce balancier s'appliquant à quelque cent mille spiraux, le coût de cet essai est insignifiant. Nous sommes ainsi en possession d'une montre compensée, par la seule association du spiral avec un balancier approprié.

Mais on n'est pas arrivé ainsi à une perfection rigoureuse; on est seulement assuré du dixième de seconde par degré et par jour, centième de l'erreur à laquelle conduisait le spiral d'acier. Le petit reste est causé par les inévitables défauts d'homogénéité de la coulée, et, si l'on veut gagner à coup sûr ce dernier résidu de l'action de la température, il faut que la montre possède un organe permettant une légère retouche.

M. Paul Ditisheim y est parvenu à l'aide d'un balancier mixte, à la fois monométallique et bimétallique. Il se compose, pour la majeure partie, d'un volant d'un seul métal, sur lequel sont fixées deux petites lames bimétalliques dont on peut régler l'action à volonté.

Ici, une question se pose : qu'a-t-on gagné à supprimer le balancier compensateur, puisqu'il reparait sous une autre forme? La réponse est facile. Ce n'est pas tant au fait de la nécessité d'une compen-

sation qu'il faut attribuer les difficultés du réglage qu'à la grandeur de l'action demandée au balancier.

En effet, lorsque l'action des lames bimétalliques est réduite au centième, comme cela arrive dans l'emploi du spiral d'élinvar, tous les inconvénients disparaissent. Les lames qui formaient la totalité du balancier compensateur, et qu'il fallait mettre en équilibre après les avoir coupées, exigeaient un long et minutieux travail dans lequel résidait la majeure partie de l'habileté du réglage. Dans le nouveau balancier, l'équilibre est obtenu automatiquement, et il ne s'agit plus que d'une petite perturbation, dont on vient à bout après quelques retouches. Une montre étant finie, le réglage ne prend guère qu'une quinzaine de jours au lieu des mois qu'il exigeait auparavant.

Des montres, munies du spiral d'élinvar et du balancier qui vient d'être décrit, ont subi victorieusement les épreuves des observatoires.

Conclusions. — L'invar et l'élinvar ont permis des solutions que l'on eût rangées, il y a un quart de siècle, dans le domaine de la fantaisie.

La découverte et la mise au point de ces alliages ont eu une autre action qu'on ne permettra de mentionner. Pour satisfaire aux exigences de la métallurgie de précision, les Acieries d'Imphy ont été obligées de perfectionner sans cesse leurs méthodes; ainsi, pour mettre en évidence l'action du carbone sur l'instabilité de l'invar, il fallait fixer la proportion de celui-ci à $1/10\,000^e$ près. Mais le personnel, rompu à ces opérations, est devenu capable d'aborder bien d'autres problèmes. L'élinvar, d'une réalisation difficile, exigeait, pour son forgeage, une technique spéciale. De proche en proche, on est arrivé à élever la température à laquelle les métaux fluent, et, lorsque M. Georges Claude voulut faire la synthèse de l'ammoniaque dans des tubes qui, à 600^o , résistaient à une pression de mille atmosphères, on n'eut qu'à pousser encore plus loin les résultats pour lesquels on possédait une base de départ. L'obtention de pareils tubes eût passé aussi, il y a peu d'années, pour un problème métallurgique insoluble.

Ch.-Ed. GUILLAUME.
Correspondant de l'Institut.



ULTIMHEAT®
UNIVERSITY MUSEUM