

De la métrologie à la métallurgie de précision

Charles-Édouard Guillaume, prix Nobel de physique 1920

Philippe Lebrun^(a) (Philippe.Lebrun@cern.ch) et Hubert Schaff^(b)

(a) Président de l'Institut scientifique européen (ESI-Archamps)
Ancien chef du département Technologie des accélérateurs du CERN

(b) Ancien directeur Partenariat et Innovation de Aubert et Duval
Ancien président de la SF2M (Société Française de Métallurgie et de Matériaux)

Dans un précédent numéro de *Reflets de la physique*, un article de J.E. Wesfreid (n°65, pp. 30-33) décrivait les recherches aérodynamiques de Gustave Eiffel. Suite à cet article, avec Hubert Schaaf (ancien président de la SF2M), j'ai interrogé les lecteurs sur le nom du lauréat Nobel qui a effectué la mesure de la hauteur de la Tour. La riche et unique réponse à la question que j'avais posée a été donnée par Philippe Lebrun, physicien des accélérateurs du CERN.

Ces deux chercheurs (qui ne se connaissaient pas auparavant) nous présentent, dans une rubrique d'histoire des sciences, l'ensemble des activités de recherche appliquée du métallurgiste Charles-Édouard Guillaume (prix Nobel de physique 1920), insuffisamment reconnu aujourd'hui. Le centième anniversaire de la mort d'Eiffel en 2023 fournira d'autres occasions d'aborder la métallurgie.

Étienne Guyon

On connaît bien le premier prix Nobel de physique attribué à des chercheurs d'un laboratoire français, celui d'Henri Becquerel, Pierre Curie et Marie Sklodowska-Curie, en 1903. On sait moins que le deuxième récipiendaire a été en 1920, Charles-Édouard Guillaume — bien avant Jean Perrin (1926) et Louis de Broglie (1929) — *en reconnaissance du service rendu aux mesures de précision en physique par sa découverte des anomalies des alliages fer-nickel*. Outre son importance pratique, en particulier en métrologie et en horlogerie, cette découverte a marqué le début de la métallurgie de précision et le développement d'une nouvelle forme de coopération entre science et industrie. À un siècle de distance, il vaut la peine de rappeler ces travaux et d'évoquer le parcours de l'homme de science qui les a réalisés.

Issu d'une famille d'horlogers du Jura suisse, Charles-Édouard Guillaume naît le 15 février 1861 à Fleurier, dans le Val-de-Travers, où l'on peut encore voir sa maison natale. Après des études au Collège de Neuchâtel puis à l'École Polytechnique Fédérale de Zürich, il entre à 22 ans au Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) sur le conseil d'Adolphe Hirsch, principal bâtisseur de la Convention du Mètre, le traité international signé par dix-sept États qui a fondé le BIPM



© Jacques Boyer / Roger Viollet

1. Charles-Édouard Guillaume à son bureau du BIPM en 1920.

en 1875. Les missions de cette jeune organisation étaient alors de fabriquer les prototypes internationaux du mètre et du kilogramme, d'élaborer et de distribuer les étalons nationaux, et de veiller à l'adoption généralisée du système métrique [1]. Guillaume y fera une carrière de cinquante-trois ans, gravissant les échelons jusqu'au poste de directeur qu'il occupe entre 1915 et 1936 (fig. 1) ; il en restera directeur honoraire jusqu'à son décès le 13 mai 1938.

Guillaume aura aussi de nombreuses autres fonctions, *inter alia* correspondant de l'Académie des sciences, président de la Société Française de Physique (en 1913), président du Conseil de l'Institut International du Froid (de 1924 à son décès). Il s'intéressera à des questions

scientifiques diverses : on peut citer, par exemple, son livre *Les rayons X et la photographie à travers les corps opaques* publié en 1896 (un an après la découverte de Roentgen) ou, la même année, son estimation de la température de l'Univers (5 à 6 K) avant Eddington et Nernst, et *a fortiori* avant les estimations basées sur l'expansion de l'Univers.

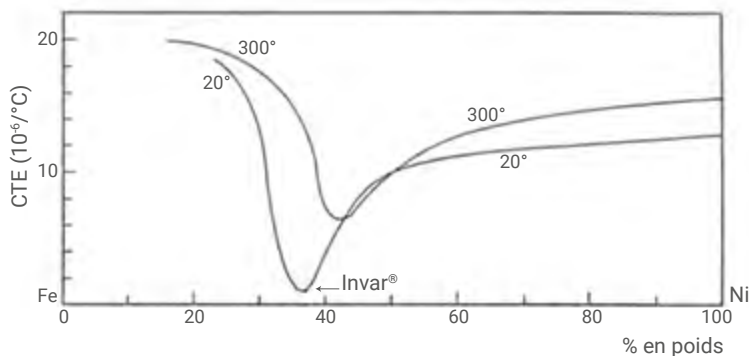
Au BIPM, ses premiers travaux portent sur la calibration des thermomètres utilisés pour la compensation de dilatation des étalons de longueur. Le coût élevé de ces étalons, constitués de platine iridiée pour sa dureté, sa stabilité et sa résistance aux agents chimiques, était un frein à leur réplification comme étalons secondaires. Guillaume se met donc, dès 1891, à la recherche de solutions alternatives.

Sérendipité et systématique

En 1895, à la demande de la Section technique de l'artillerie, le BIPM étudie un acier contenant 22 % de nickel et 3 % de chrome et découvre qu'il est plus dilatable que ses composants — violant ainsi la « loi des mélanges » — et non magnétique, double anomalie qui n'est pas sans rappeler les observations d'Hopkinson faites quelques années plus tôt. Un an plus tard, Guillaume ne manque pas d'étudier la dilatabilité d'un acier à 30 % de nickel, reçu au BIPM en vue de la construction de poids de précision : elle est, cette fois, plus faible que celles de ses composants, soit environ un tiers de celle du platine [2]. « *J'eus alors une des plus grandes émotions de ma vie. Traversant la cour au galop, j'annonçai cette découverte à mon directeur J.R. Benoît... "j'ai un sujet de recherche qui va m'occuper pour dix ans". Dans cette évaluation, j'avais commis une erreur de 200 % ; c'est trente ans que je lui ai consacrés.* » [3]

« *Maintenant c'était fini pour le rôle du hasard ; une étude s'imposait ; elle était pleine de promesses ; mais pour que ces promesses deviennent réalité, il fallait encore un gros effort métallurgique et métrologique.* » [3] Or, la réduction du budget du BIPM depuis 1889 ne permettait pas d'y allouer les crédits nécessaires. Les aciers au nickel étudiés

>>>

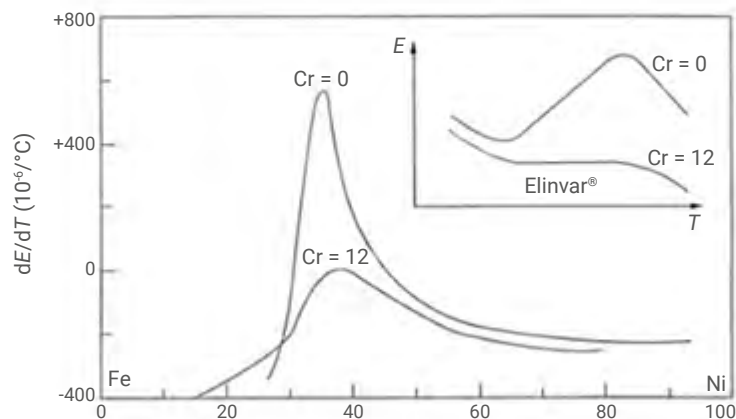


2. Coefficients de dilatation thermique des alliages Fe-Ni à 20°C et à 300°C en fonction de la teneur en nickel.

>>>

au BIPM ayant été produits à l'usine d'Imphy (Nièvre) de la Société de Commentry-Fourchambault & Decazeville, Guillaume prend contact avec son directeur général Henri Fayol, qui lui accorde sa confiance et l'assure de sa coopération. En 1896, Imphy fournit dix-sept échantillons de compositions précisément connues, avec des teneurs en nickel variant de 5 % à 44 % : l'alliage à 36 % de nickel présente un minimum de dilatation, un dixième environ de celle du platine [4]. Avec des éléments d'addition et des traitements thermiques appropriés, on peut même l'annuler : c'est l'Invar® (fig. 2).

Guillaume continue à explorer systématiquement les propriétés des alliages fer-nickel, dont six-cents échantillons de diverses nuances seront fournis par Imphy [2]. Il en résultera *inter alia* le Platinite, un alliage à 48 % de nickel, qui permet des scellements au verre. Guillaume s'intéresse aussi à leur anomalie d'élasticité, et met au point en 1920 un alliage ternaire de 34 % de nickel et 12 % de chrome, l'Elinvar®, qui présente un module élastique constant entre - 50 °C et + 100 °C (fig. 3) [5], condition nécessaire pour fabriquer des ressorts de montre insensibles aux variations de température.



Dépendance en fonction de la teneur en nickel du coefficient de variation thermique dE/dT du module d'Young des alliages Fe-Ni et Fe-Ni-12%Cr. En encart : variation en fonction de la température du module d'Young des alliages Fe-34%Ni à 0 et 12 % de chrome.

Des applications révolutionnaires

La géodésie par triangulation a besoin d'une ou plusieurs bases rectilignes de longueur connue, en pratique de l'ordre de la dizaine de kilomètres. Ces bases étaient traditionnellement mesurées en reportant bout à bout un grand nombre de fois une règle étalon de 4 m, processus fastidieux jusqu'à ce qu'Edvard Jäderin, géomètre suédois, le remplace par un fil d'acier sous tension d'une longueur de 24 m, dont la

dilatation thermique devait être compensée [6]. Guillaume lui substitue un fil d'Invar® attaché à un fléau lesté par des poids, instrument qui équipe avec succès en 1899 l'expédition de Jäderin pour mesurer l'arc de méridien au Spitzberg. En mars 1906, la courte période de disponibilité du tunnel du Simplon entre son percement et le début de son exploitation ferroviaire est mise à profit par les géomètres suisses pour y mesurer une base de plus de 20 km à l'aide des appareils à fil d'Invar® de Guillaume : l'écart des mesures aller et retour entre Brigue et Iselle n'est que de 22 mm [7]. Cette méthode a été par la suite largement utilisée, y compris pour la topométrie et l'alignement des grands accélérateurs de particules. En 1913, Guillaume tend un fil d'Invar® de 116 m entre le deuxième étage de la Tour Eiffel et le sol pour en enregistrer les déformations sous l'effet des variations de température (et des coups de vent !). « *La Tour se présente ainsi comme un gigantesque thermomètre, le plus grand du monde, vraisemblablement.* » [8]

Depuis, l'Invar® a trouvé de nombreuses applications, au laboratoire comme dans l'industrie, chaque fois que la dilatation devait être limitée ou contrôlée : bilames thermostatiques, cales de compensation pour assurer le maintien des assemblages cryogéniques, *shadow-masks* pour tubes cathodiques de télévision couleur et avec la mise au point de nuances soudables, réalisation de cuves de méthaniers et de tuyauteries cryogéniques sans soufflets de compensation.

➔ L'EFFET INVAR

L'effet Invar, forte réduction voire annulation de la dilatabilité thermique, s'observe dans plusieurs catégories d'alliages présentant un ordre ferromagnétique et une forte magnétostriction positive spontanée en volume. Cette magnétostriction vient compenser les variations naturelles de volume dues à l'anharmonicité des vibrations du réseau cristallin sous l'effet de la température (loi de Grüneisen).

L'Invar $Fe_{64}Ni_{36}$ est un alliage de deux éléments de transition 3d très voisins, en solution dans une structure cubique à faces centrées. En abaissant la température depuis le point de Curie de 550 K, les atomes de fer et de nickel adoptent une configuration ferromagnétique. La magnétostriction spontanée qui en résulte compense graduellement la contraction du réseau. Au-dessus de la température de Curie T_c , l'ordre ferromagnétique disparaît et le matériau se dilate normalement.

L'effet Invar a fait l'objet de nombreuses études expérimentales (diffraction des rayons X sous pression, spectrométrie Mössbauer...) et théoriques (calculs de structure électronique), mais son origine précise est encore controversée [a, b]. Dans une première interprétation, les atomes de fer existent dans deux états de *spin* différents – un état de *spin* élevé de plus grand volume, et un état de *spin* plus faible, de plus petit volume et d'énergie légèrement plus élevée – dont les proportions changent avec la température. D'autres interprétations font appel à des structures ferromagnétiques non colinéaires, ou à de fortes variations avec la distance interatomique de l'intégrale d'échange entre moments magnétiques.

[a] K. Lagarec *et al.*, *J. Mag. Mag. Mat.* **236** (2001) 107-130.

[b] L. Nataf *et al.*, *Phys. Rev. B* **74** (2006) 184422.

Le fonctionnement des montres est perturbé par les variations de température qui affectent le moment d'inertie du balancier, ainsi que la longueur et le module élastique du ressort spiral. La compensation thermique de ces effets est un problème qui a occupé les physiciens depuis Huygens [9], et Guillaume, fils et petit-fils d'horloger, s'y est évidemment attelé. Tout d'abord en concevant dès 1899 un balancier à inertie constante, constitué d'un bilame associant au laiton un acier à 44 % de nickel : le « balancier Guillaume ». Ce dernier corrige ainsi l'« erreur secondaire » des montres et chronomètres de marine. Dans les cinq ans qui suivront, cette invention équipera la quasi-totalité des montres. Après 1920, les montres à balancier monométallique seront équipées de ressorts spiraux en Elinvar®. Les découvertes de Guillaume ont ainsi, en deux décennies, amélioré la précision des montres de quelques minutes à quelques secondes par jour.

Entre science et industrie

En décembre 1920, Guillaume conclut son discours de réception du prix Nobel en expliquant les facteurs qui lui ont permis de réussir ses recherches. Il insiste sur l'accueil qui lui a été réservé à Imphy en 1896, alors qu'il était tout jeune ingénieur fraîchement arrivé au BIPM. Sans contrat et sans budget, Henri Fayol, directeur général, a accepté de lancer immédiatement l'élaboration d'une série de coulées d'essais d'alliages fer-nickel, « *non sans que les administrateurs s'imaginent qu'ils seraient récompensés par quoi que ce soit d'autre que la satisfaction d'avoir prêté une assistance efficace à une recherche scientifique d'exploration.* » [2]

L'enthousiasme de Guillaume à explorer l'inconnu de façon systématique a été immédiatement partagé par Fayol, et ils ont inventé ensemble cette nouvelle forme de coopération, appelée bien plus tard « recherche conceptive » [10]. Pour Fayol, les programmes de recherche faisaient partie des paris à prendre sur l'avenir par l'état-major, au même titre que les autres inconnues de toute nature auxquelles l'entreprise aurait à faire face.

C'est ce modèle de recherche, basé sur une relation étroite entre science

et industrie, qui l'a conduit en 1911 à recruter Pierre Chevenard pour créer un véritable laboratoire de recherche métallurgique. Un des pionniers de la métallurgie scientifique, connu dans le monde entier, Chevenard a inventé la dilatométrie en tant que technique d'étude des changements de phase, en mettant au point à Imphy dès 1916, le « dilatomètre Chevenard » encore utilisé aujourd'hui. Cela constitue une forme d'aboutissement des premières mesures de dilatation de Guillaume à Sèvres sur les deux échantillons dont on ne comprenait pas le comportement en dilatation et en magnétisme, les changements de phase des aciers alliés étant très mal connus à cette époque. Chevenard a été président de la Société Française de Physique en 1939, et cofondateur de la Société Française de Métallurgie en janvier 1945.

Dans un discours prononcé en juin 1925 lors d'une réception à Paris en l'honneur de Fayol, Guillaume rend à nouveau hommage à leur *coopération exemplaire* et conclut : « *Lorsqu'on prêche pour une union de plus en plus intime entre science et industrie, on croit affirmer seulement une chose : c'est que l'industrie a beaucoup à gagner à s'inspirer des méthodes scientifiques. Mais on oublie de dire que les hommes de science pourraient très utilement s'inspirer des méthodes industrielles !* » [11] Cette extraordinaire connivence entre Guillaume et Fayol a fait d'eux des visionnaires : les aciéries d'Imphy, aujourd'hui APERAM, filiale d'Arcelor-Mittal, existent encore, et les Invar® et les alliages magnétiques font toujours partie de leurs spécialités. ■

“ Outre son importance pratique, la découverte de l'Invar® a marqué le départ de la métallurgie de précision et le développement d'une nouvelle forme de coopération entre science et industrie.”



- 1• L. Julien, « Le système international d'unités redéfini », *Reflète de la physique* **62** (2019) 12-16.
- 2• Ch.-Éd. Guillaume, "Invar and elinvar", Nobel lecture, 11 December 1920.
- 3• Citations de Ch.-Éd. Guillaume par A.C. Déré, F. Duffaut et G. De Liège, « Cent ans de science et d'industrie », dans *Les alliages de fer et de nickel*, Technique et documentation, Paris (1996) 1-23.
- 4• Ch.-Éd. Guillaume, « Sur la dilatation des aciers au nickel », *C.R. Académie des sciences*, **124** (1897) 178.
- 5• Ch.-Éd. Guillaume, « L'anomalie d'élasticité des aciers au nickel : réalisation d'un élinvar et son application à la chronométrie », *C.R. Académie des sciences*, **171** (1920) 83.
- 6• E. Jäderin, *Méthode pour la mensuration des bases géodésiques au moyen de fils métalliques*, Mémoires présentés à l'Académie des sciences de l'Institut de France, **32**, 7 (1902).
- 7• R. Gautier, « La mesure des bases géodésiques et la mesure du tunnel du Simplon en mars 1906 », *Le Globe. Revue genevoise de géographie*, **46** (1907) 138-148.
- 8• Ch.-Éd. Guillaume, *Le premier quart de siècle de la Tour Eiffel*, Société Astronomique de France, Paris (1913) ; Hachette Livre BNF (2016).
- 9• C. Attinger, « De Christian Huygens à Charles-Édouard Guillaume, la compensation thermique des horloges et des montres », *Chronometrophilia* **25** (1988) 42-80.
- 10• P. Le Masson et B. Weil, « Fayol, Guillaume, Chevenard – La science, l'industrie et l'exploration de l'inconnu : logique et gouvernance d'une recherche conceptive », *Entreprises et Histoire*, **83** (2016) 79-107.
- 11• Ch.-Éd. Guillaume, discours prononcé le 7 juin 1925 à Paris, Salle Hoche. Banquet en l'honneur de Henri Fayol.