HENRI FAYOL, CHARLES-ÉDOUARD GUILLAUME ET PIERRE CHEVENARD : UN INDUSTRIEL, UN PHYSICIEN ET UN INGÉNIEUR À L'ORIGINE D'UNE NOUVELLE MÉTALLURGIE

Céline FELLAG ARIOUET et François DUFFAUT

Résumé

La célébration en 2020 du centenaire de l'attribution du Prix Nobel de Physique à Charles-Édouard Guillaume est l'occasion d'examiner comment et dans quel contexte est née cette métallurgie nouvelle qui perdure aujourd'hui.

Au-delà d'un rappel de cette « success story », nous cherchons à analyser le rôle et la trajectoire de chacun des trois acteurs - Henri Fayol, Charles-Édouard Guillaume et Pierre Chevenard - ainsi que leurs communautés de vues et les liens qu'une collaboration étroite sur une longue période a développé entre eux, bien au-delà d'une simple relation de travail.

Après une première partie donnant une vue d'ensemble de la période allant de la prise de fonction de Fayol à la direction de Commentry-Fourchambault en 1888 à l'élection de Chevenard à l'Académie des sciences en 1946, la deuxième partie se focalise sur plusieurs thèmes pertinents permettant de mieux cerner les trois acteurs et leurs interactions. Le premier, « Leur collaboration étroite sur une longue période », décrit la relation établie et entretenue par Fayol et Guillaume et qui s'est poursuivie avec Chevenard. Le second, « Leur pratique originale et volontaire de la relation entre science et industrie » montre comment cette collaboration s'inscrit dans un questionnement contemporain tout en étant très innovante par de nombreux aspects. Les trois thèmes suivants : « Leur conception de la recherche et de sa place dans l'entreprise », « Leur volonté d'organiser les résultats de l'expérience en doctrine » et « Leur création commune de la métallurgie de précision », montrent leur proximité en termes de méthode de travail et comment leurs méthodes respectives ont nourri des inspirations réciproques. Les deux derniers, « Leur souci de transmettre et de former » et « Leurs relations d'estime et d'amitié », restituent une dimension humaine et plus personnelle, en décrivant leur volonté de communiquer et comment l'œuvre commune a tissé entre eux des relations fortes d'estime et d'amitié.

Les sources examinées et l'analyse effectuée montrent qu'en conduisant ensemble cette œuvre commune, Fayol, Guillaume et Chevenard, qui appartiennent à trois générations successives, ont affirmé et développé entre eux une communauté de vues et des relations personnelles allant au-delà de simples relations professionnelles : estime et amitié entre Fayol et Guillaume, amitié et affection entre Guillaume et Chevenard. Dans une sorte de cercle vertueux, leurs relations professionnelles et privées ont nourri et stimulé leurs recherches, enrichi leurs méthodes et dynamisé leurs travaux respectifs.

L'impact des résultats qu'ils ont obtenus, la diffusion de leur recherche au sein de multiples réseaux, mais sans doute tout autant une vision commune de leur mission et du rôle de la science et de l'industrie, les ont conduits à dépasser le cadre de leurs fonctions et du domaine de la métrologie ou de la métallurgie. Fayol, Guillaume et Chevenard sont ainsi les concepteurs de méthodes nouvelles qui ont transformé durablement les pratiques et ont, de ce fait, eu un rayonnement considérable.

Introduction

La célébration en 2020 du centenaire du Prix Nobel de Physique attribué à Charles-Édouard Guillaume (1861-1938) « en reconnaissance des services qu›il a rendus aux mesures de précision en physique par sa découverte des anomalies dans les alliages d›acier au nickel »[1] est l'occasion de revenir sur ces découvertes qui ont conduit à l'émergence d'une nouvelle classe d'alliages métalliques et à une nouvelle façon de faire de la métallurgie. Ces travaux ont permis aux Aciéries d'Imphy (Nièvre), usine relativement modeste de la société Commentry-Fourchambault et Decazeville, d'affirmer sa spécificité et de prendre un nouveau départ au tournant du XX^{e} siècle. L'accueil immédiatement favorable d'Henri Fayol (1841-1925) à la demande d'échantillons de Guillaume en 1896 est bien connu[2]. Il en est de même de l'entretien au cours duquel Fayol fixe seize ans plus tard sa mission à Pierre Chevenard (1888-1960), dont le nom restera associé aux appareils de laboratoire qu'il a conçus et à l'invention de la métallurgie de précision en tant que méthode pour innover[3].

Henri Fayol

Né le 29 juillet 1841 à Istanbul. École des Mines de Saint-Étienne. Directeur de la mine de Commentry. Inventeur de la théorie des deltas (formation de la houille). Directeur général de Commentry-Fourchambault et Decazeville de 1888 à 1918. Auteur, en 1916, de « L'administration industrielle et générale », un traité de gestion qui a fait date et est revisité régulièrement pour sa modernité.

Charles-Édouard Guillaume

Né le 15 février 1861 à Fleurier dans le Haut Jura suisse. École polytechnique fédérale de Zurich. Bureau international des poids et mesures de 1883 à 1936, nommé sous-directeur en 1901, et directeur à partir de 1915. Découvreur de l'invar en 1896. Inventeur d'alliages aux multiples applications, il a notamment permis l'amélioration de la précision des instruments dédiés à la mesure du temps. Lauréat du Prix Nobel de Physique en 1920.

Pierre Chevenard

Né le 31 décembre 1888 à Thizy. École des Mines de Saint-Étienne. Commentry-Fourchambault et Decazeville de 1911 à 1959. Chef du service des recherches d'Imphy puis, en 1935, Directeur scientifique de la société. Professeur de métallurgie à l'École des Mines de Saint-Étienne. Membre de l'Institut en 1946.

1 « In recognition of the service he has rendered to precision measurements in Physics by his discovery of anomalies in nickel steel alloys ». Fondation Nobel.

2 Cet épisode a été raconté par Charles-Édouard Guillaume à de nombreuses reprises, voir en particulier le discours de Guillaume prononcé dimanche 7 juin 1925 à Paris, salle Hoche, reproduit dans les Annales de l'Ecole des Mines http://www.annales.org/site/archives/x/ceguillaume.html ou encore la Conférence donnée à l'occasion du Prix Nobel. GUILLAUME, Charles-Édouard. *L'invar et l'élinvar : Conférence Nobel. L'anomalie des aciers au nickel*. Stockholm, Imprimerie Royale P.A. Norstedt & Fils, 1922.

3 Raconté par Chevenard, par exemple dans le livre dit « du centenaire », Office de propagande générale, Paris 1954 p. 232.

Revisiter cette « success story » à l'origine d'une métallurgie alors entièrement nouvelle et qui perdure aujourd'hui, en la resituant dans le contexte qui a favorisé son émergence, permet à la fois de mieux comprendre le rôle et la trajectoire de chacun des trois acteurs[4], mais également d'analyser leurs communautés de vues et les liens que la collaboration étroite sur une longue période a permis de développer entre eux, bien au-delà d'une simple relation de travail.

Après une première partie donnant une vue d'ensemble de la période allant de la prise de fonction de Fayol à la direction de Commentry-Fourchambault en 1888 à l'élection de Chevenard à l'Académie des sciences en 1946, la deuxième partie se focalisera sur plusieurs thèmes pertinents permettant de mieux cerner ces trois acteurs et leurs interactions. Le premier, « Leur collaboration étroite sur une longue période », décrit la relation établie et entretenue par Fayol et Guillaume et qui s'est poursuivie avec Chevenard. Le second, « Leur pratique originale et volontaire de la relation entre science et industrie » montre comment cette collaboration s'inscrit dans un questionnement contemporain tout en étant très innovante par de nombreux aspects. Les trois thèmes suivants : « Leur conception de la recherche et de sa place dans l'entreprise », « Leur volonté d'organiser les résultats de l'expérience en doctrine » et « Leur création commune de la métallurgie de précision », montrent leur proximité en termes de méthode de travail et comment leurs méthodes respectives ont nourri des inspirations réciproques. Les deux derniers, « Leur souci de transmettre et de former » et « Leurs relations d'estime et d'amitié », restituent une dimension humaine et plus personnelle en décrivant leur volonté de communiquer et comment l'œuvre commune a tissé entre eux des relations fortes d'estime et d'amitié.

I) VUE D'ENSEMBLE DE LA PÉRIODE

Les années qui précèdent la prise de fonctions, en 1888, de Fayol comme directeur général de Commentry-Fourchambault ont vu l'expansion du chemin de fer et l'éclatante victoire de l'acier Bessemer pour la fabrication des rails. Les métallurgistes cherchent à maîtriser l'effet des traitements thermiques et explorent, en commençant par le manganèse et le chrome, l'effet de différentes additions sur le compromis résistance / ductilité de l'acier. En 1876, Jules Garnier (1839-1904) dépose un brevet pour l'exploitation industrielle du nickel calédonien et fonde en 1880, avec John Higginson et Henry Marbeau, la société Le Nickel. La société filiale, le Ferro-Nickel, élabore au creuset des alliages de fer et de nickel, puis les fait fabriquer au four à sole à Montataire. Ces essais sont poursuivis aux aciéries d'Imphy en 1887 où des lingots à 25% de nickel sont coulés et transformés sous différentes formes : tôles, barres et pièces forgées.

En 1885, Floris Osmond (1849-1912) et Jean Werth (1855-1928), qui travaillent au laboratoire du Creusot[5], publient un mémoire[6] qui a fait date sur la théorie cellulaire des propriétés de l'acier. Les auteurs observent le caractère granulaire de l'acier et interprètent les effets des traitements thermiques par la modification de la façon dont le carbone est associé au fer. Confirmant la récente théorie de l'existence de variétés allotropiques du fer, ils sont très proches de décrire avec exactitude la mise en solution du carbone par chauffage « au-dessus du point *a* défini par Tchernoff [7] ». La transformation allotropique est observée en même temps par Henri Le Chatelier (1850-1936) et par John Hopkinson en Angleterre sur des aciers à 25 % de nickel.

Gaston Louis Hartmann (1851-1922) est alors capitaine à la Fonderie de Bourges et, à ce titre, contrôleur des fabrications que Le Creusot livre aux armées. Il a ainsi l'occasion d'apprécier Werth et s'en souvient lorsque, en poste à la Section technique de l'artillerie[8], il souhaite obtenir un alliage pour blindage à très grande capacité de déformation et présentant une dureté suffisante sans fragilité au froid. Werth, alors directeur des usines de Fourchambault et d'Imphy, confie le programme d'élaborations à l'ingénieur principal d'Imphy, Jacques Adenot (1862-1924). Ce programme conduit rapidement à la mise au point de l'alliage NC4 (22 à 23 % de nickel et 2 à

4 Ils sont sommairement présentés dans l'encadré.

5 Werth y travaille depuis 1879, avant d'être recruté par Fayol en 1891.

6 F. OSMOND, J. WERTH, Ann. Mines, VIII (1885), p. 5.

7 Les études de Tchernoff sur la trempe l'ont conduit à affirmer l'existence des variétés allotropiques du fer : D. TCHERNOFF, « The structure of steel » traduction anglaise de l'article original en russe de 1868, Engineering, 7 juillet 1876, XXII, p. 11.

8 Quand il sollicite ainsi Werth, Hartmann a déjà mis au point le comparateur-enregistreur automatique qui fait de lui un spécialiste reconnu de la mesure. Il deviendra Directeur adjoint puis Directeur de l'Atelier de Puteaux et jouera un rôle éminent dans les mesures pour l'industrie en étant, à partir de 1899, membre du Bureau National de Poids et Mesures, membre du Conseil de l'Observatoire de Meudon, membre du Conseil d'administration du Conservatoire National des Arts et Métiers et Président de la Commission technique de cet établissement.

3 % de chrome) qui fait l'objet d'essais satisfaisants en 1894 à Puteaux et en 1895 à l'établissement de la Marine à Guérigny[9]. Cet alliage, qui est en outre amagnétique et peu oxydable, est utilisé pour la réfection du matériel de l'Artillerie[10].

Le 20 mai 1875, la Convention du mètre est signée à Paris par les représentants de dix-sept nations. Ce traité est l'acte fondateur du Bureau international des poids et mesures (BIPM) qui s'établit au Pavillon de Breteuil. Le BIPM a pour première mission de fabriquer les nouveaux prototypes internationaux du mètre et du kilogramme et les prototypes nationaux pour ses États Membres. En 1889, les nouveaux étalons internationaux sont sanctionnés, c'est-à-dire validés à l'occasion de la première réunion de la Conférence générale des poids et mesures (CGPM)[11]. L'une des principales missions du BIPM dans les années qui suivent sa création est donc de réaliser des étalons de longueur pour ses États membres, mais également d'étudier les règles géodésiques utilisées dans les expéditions scientifiques et militaires. En 1891, Charles-Édouard Guillaume (1861-1938), engagé en 1883 au Bureau dirigé alors par le physicien français Justin Mirande René Benoît (1844-1922), est chargé de mener des recherches pour identifier un nouveau matériau répondant aux exigences métrologiques et moins coûteux que le platine iridié. Parmi les qualités requises figurent une dilatabilité modérée, pour limiter l'incertitude sur la longueur, elle-même entraînée par celle relative à la température, et l'aptitude à un très beau poli, pour permettre la gravure précise de traits très fins. Cette recherche du matériau idéal se déroule dans un contexte d'amélioration des appareils de mesure pour lequel le BIPM collabore étroitement avec le Service technique de l'Artillerie où Hartmann[12] a mis au point un comparateur de précision.

Durant l'hiver 1891-1892, Guillaume mène une première série de mesures et entreprend d'étudier systématiquement les propriétés de tous les alliages qu'il a l'occasion d'avoir entre les mains. Ayant constaté que le nickel pur aurait les qualités requises s'il était possible de s'en procurer sous forme de barres totalement exemptes de fissures, Guillaume pense à une solution alliage de nickel. Il se trouve justement que Benoît se voit remettre par Hartmann[13] un échantillon de NC4 de bonne forgeabilité. Cet alliage non magnétique s'avère présenter une dilatabilité voisine de celle du laiton, donc supérieure à celle attendue d'un fer-nickel. Cette double anomalie est remarquée par Benoît et Guillaume qui savent que la transformation au froid vers un état magnétique d'un alliage à 25 % de nickel a été observée par Hopkinson. Comme l'anomalie ne présente pas d'intérêt pour les activités menées par le Bureau international, aucune étude complémentaire n'est menée. Peu après, début 1896, Guillaume a l'opportunité de mesurer la dilatabilité d'une nouvelle barre d'acier à 30 % de nickel et la trouve cette fois inférieure d'un tiers à celle du platine. Ce nouvel écart (et de sens contraire) à la loi des mélanges lui fait soupçonner la présence, dans le diagramme fer-nickel d'une anomalie de grande ampleur.

Guillaume obtient l'autorisation de son directeur pour explorer cette piste mais avec la nécessité de trouver lui-même le financement nécessaire pour ces recherches. Guillaume se tourne naturellement vers le fabricant des alliages, la société Commentry-Fourchambault et Decazeville[14] et trouve chez Fayol une oreille attentive. Werth venant juste de quitter CFD pour Denain, c'est Louis Dumas (1850-1928)[15], chef depuis 1893 du Service métallurgique de CFD[16], qui fait réaliser par Imphy les échantillons demandés. La fabrication et la mesure de 17 alliages de teneurs en nickel échelonnées conduit très rapidement à la découverte de l'alliage Fe-36 % Ni quasi-indilatable.

L'année 1896 constitue un tournant dans la carrière de Guillaume qui s'engage alors sur plusieurs fronts.

9 A. ABRAHAM : « Étude de certains aciers spéciaux », *Annales des Mines*, 1898, tome XIV, p. 225 à 347.

10 F. DUFFAUT : « Henri Fayol promoteur de l'innovation produits », in M. BERTILORENZI, N. DUBRUC et J-PH. PASSAQUI (dir.), *Henri Fayol, les multiples facettes d'un manager*, Paris, Presses des Mines, 2019, p. 73 à 90.

11 Le BIPM fonctionne sous la direction d'un Comité international des poids et mesures (CIPM) composé alors de quatorze membres et sous l'autorité de la Conférence générale des poids et mesures, son organe plénier. La CGPM réunit tous les quatre à six ans les représentants des États et adopte le programme de travail du BIPM et sa dotation.

12 Sur Gaston-Louis Hartmann, voir M. SCHIAVON, Itinéraires de la précision, Géodésiens, artilleurs, savants et fabricants d'instruments en France, 1870-1930, Nancy, Presses Universitaires de Lorraine, 2013.

13 Ceci est rapporté par Louis DUMAS dans l'introduction de son livre : Recherches sur les aciers au nickel à hautes teneurs, (Extrait des Annales des Mines Avril, Mai, Juin, 1902) Dunod 1902. Dumas indique que Hartmann est alors « chef de l'atelier de précision de la section technique à Saint Thomas d'Aquin ».

14 Commentry-Fourchambault est devenue Commentry-Fourchambault et Decazeville après l'achat de Decazeville en 1892. La société est désormais désignée CFD.

15 Louis Dumas a été recruté par Fayol en 1892. Il était jusque-là directeur de l'usine de Commentry de Châtillon-Commentry.

16 C'est-à-dire Directeur de la branche métallurgie de CFD.

Le premier concerne précisément les applications qui ont un lien direct avec la mission du BIPM et vise donc à mettre ce nouvel alliage immédiatement au service des mesures de longueurs[17]. L'invar permet ainsi, dans les années qui suivent sa découverte, une véritable révolution pour le monde de la géodésie. D'abord utilisé sous forme de règles, il est rapidement associé à un nouvel instrument mis au point par l'ingénieur suédois Edvard Jäderin (1852-1923) et amélioré par la suite par les frères Carpentier et le BIPM. L'utilisation de l'invar entraîne en quelques années une complète transformation des pratiques pour les mesures sur le terrain[18]. L'invar est utilisé sous forme de fils[19] pour la première fois en 1899 à l'occasion de la mesure de l'arc du méridien au Spitzberg. Cette campagne marque le début d'une phase de tests pour ce nouvel alliage. C'est à partir de la campagne de mesures aux extrémités du tunnel du Simplon en Suisse en 1905[20] que l'utilisation des fils d'invar se généralise pour les mesures géodésiques jusqu'à ce que le laser transforme à nouveau les pratiques dans les années 1980.

Parallèlement à cela, Guillaume se lance dans des développements importants pour faire bénéficier l'industrie horlogère du canton de Neuchâtel, sa région natale, de ses découvertes. Ainsi, ce n'est pas un hasard si c'est Marc Thury (1822-1905)[21], professeur à l'Université de Genève et l'un des fondateurs de la Société genevoise d'Instruments de Physique qui présente le 14 mai 1897, devant la Société d'horlogerie de Genève, un pendule compensateur mis au point avec l'horloger Paul Perret et fabriqué à partir :

> *« d'un alliage d'acier et de nickel expérimenté au Bureau international des poids et mesures. M. Thury appelle cet alliage : alliage Guillaume, alliage de Sèvres ou alliage invar*[22]*. Le pendule réalisé avec ce nouvel alliage est très prometteur avec une dilatation 5 fois et demie plus faible que celle du bois, 11 fois moindre que celle du verre, 13 fois et demie plus petite que celle du fer ou de l'acier »*[23].

C'est donc en Suisse que le nouvel alliage, nommé invar comme invariable, est immédiatement adopté par Guillaume. Un premier brevet est déposé en France sous le numéro 255.097. La marque ne sera déposée par CFD qu'en 1907. Ces deux champs d'application représentent un travail de recherche au long cours et occuperont Guillaume pour le reste de sa carrière.

Le deuxième front, qui éclaire le premier, consiste à décrire et comprendre les spécificités de la métallurgie des fer-nickel. Enfin, un troisième fait de lui l'inventeur d'alliages répondant à des besoins précis.

L'ensemble de ces travaux visant la compréhension des phénomènes et l'invention d'alliages a la particularité de s'appuyer exclusivement sur la collaboration avec CFD, dans le cadre d'une convention signée en 1900. Une première collaboration s'engage avec Dumas[24] jusqu'à son départ de la société et la publication de son livre en 1902[25].

17 L'ensemble de cette question et celle du vieillissement de l'invar sont très bien exposées par Éric LAMBRET dans son mémoire de D.E.A. Cent ans d'Invar.

18 C. FELLAG ARIOUET. « Charles-Édouard Guillaume, l'étalon et l'invar », dans SCHIAVON. M., ROLLET L. (dir.), *Le Bureau des longitudes au prisme de ses procès-verbaux*, Nancy, Presses universitaires de Nancy – Éditions universitaires de Lorraine (Collection « Histoire des institutions scientifiques »), 2021, p. 167-199

19 La fabrication des fils géodésiques fait l'objet de l'annexe 1.

20 C. FELLAG ARIOUET, « Charles-Édouard Guillaume au Bureau international des poids et mesures », présentation donnée à l'occasion du Symposium célébrant le centenaire de l'attribution du prix Nobel de physique à Charles-Édouard Guillaume, disponible en ligne https://www.bipm.org/fr/committees/ot/bipm-ws/wg/symposium-guillaume/2020-10-17

21 Marc Thury (1822-1905), professeur à l'Université de Genève, a fondé en 1860 avec Auguste De la Rive en Suisse, un petit atelier à Plainpalais. Ils ont pour objectif de fabriquer des instruments d'optique et de physique capables de concurrencer les ateliers de Londres, Paris ou Berlin. Cet « Atelier de Genève » est rapidement appelé à fournir des instruments de précision notamment pour la mécanique, la météorologie et la métrologie. En 1862, l'Atelier prend le nom de « Société genevoise pour la construction d'instruments de physique » connue depuis sous le nom de Société genevoise d'Instruments de Physique. La création du BIPM est l'occasion pour la Société genevoise d'Instruments de Physique d'affirmer sa spécificité en mettant au point des comparateurs et en effectuant des séries de mesure de précision pour les règles géodésiques. De même que les Frères Brunner ou les Ateliers Carpentier, la Société genevoise d'Instruments de Physique fait partie des partenaires privilégiés du Bureau international.

22 Dans le présent article, « invar » est écrit sans majuscule (sauf dans certaines citations) en conformité avec l'usage de Guillaume et Chevenard dans leurs écrits ; de même pour « élinvar ». Les autres alliages de CFD Imphy, tels que Durinval ou Phynox sont écrits avec une majuscule.

23 « Le Cosmos », Revue des sciences et de leurs applications, 46e année, 1897, Tome 37.

24 En 1907, Guillaume nomme Baros et conseille pour la fabrication d'étalons de poids, l'alliage Ni-10 % Cr créé par Dumas. (ANMT 59 AQ 0647 – 0653). Chevenard le choisit pour constituer l'étalon de son dilatomètre différentiel, puis le fera évoluer en Pyros par un ajout de tungstène ou de molybdène.

25 Dumas y expose un partage du travail entre Guillaume qui explore les propriétés physiques pendant qu'il se consacre aux propriétés mécaniques plus classiques pour le métallurgiste.

Guillaume et Dumas[26] observent que le diagramme fer-nickel se divise en deux zones de comportements très différents avec cependant un recouvrement entre 25 et 35 % de nickel. Au refroidissement depuis 900°C, on observe, pour les teneurs en nickel inférieures, que l'apparition du ferromagnétisme s'accompagne d'une transformation allotropique. Pour les teneurs en nickel supérieures, l'apparition du ferromagnétisme se produit sans transformation allotropique. Alors que les premiers présentent à la chauffe une hystérésis[27] (croissante avec la teneur en nickel) et sont donc dits « irréversibles », les seconds n'en présentent pas et sont dits « réversibles ». Dans la zone de recouvrement, il est possible d'obtenir au refroidissement d'abord la transformation réversible puis, à très basse température, la transformation irréversible. Les alliages réversibles ne peuvent être durcis que par écrouissage.

Si le perfectionnement de l'invar va encore exiger de longs travaux que Guillaume conduira jusqu'en 1935, la découverte de l'anomalie lui permet de très rapidement définir deux alliages répondant à des problèmes concrets : la platinite et le NMHG[28]. Les ferronickels titrant entre 36 et 60 % de nickel présentent une dilatabilité qui évolue de façon monotone de quasi nulle à celle du nickel. Une teneur de 42 % permet d'obtenir une dilatabilité égale à celle de la pâte de verre qui ferme le bulbe des ampoules électriques. Remplaçant le très coûteux platine, le fil de « platinite » est produit par Imphy en quantités notables à partir de 1899. L'intensité du ferromagnétisme des ferronickels réversibles diminue progressivement lorsque la température s'élève à partir de l'ambiante, pour disparaître à ce qui sera nommé le point de Curie. Il en résulte qu'on peut réaliser, avec une pièce d'alliage de composition bien choisie, une dérivation du champ magnétique dont la valeur diminue lorsque la température s'élève, de telle sorte que le champ principal se renforce et compense la dérive négative de l'aimant. C'est ce que réalise le « NMHG pour shunt magnétique ».

Le départ de Dumas prive la collaboration de son « pilier » côté CFD. Les remerciements que Guillaume adresse à Pierre Girin (1866-1926) indiquent que celui-ci a pris, au moins en partie, le relais[29]. Après quelques années de flottement, Georges Piélin (1875-1952), directeur des Aciéries d'Imphy depuis 1907, convainc Fayol qu'au-delà d'un simple laboratoire, il est nécessaire d'instituer un service chargé de « condenser les recherches auxquelles nous obligent les fabrications spéciales qui sont notre raison d'être, pour que ces recherches soient menées rapidement à bonne fin[30] ».

Ce sera chose faite en octobre 1911 avec la mutation à Imphy du jeune Pierre Chevenard (1888-1960) qui, sorti major de l'École des Mines de Saint-Étienne, vient d'être recruté comme « secrétaire technique[31] » à Decazeville. Les débuts de Chevenard sont très prometteurs et Girin propose à Fayol de créer un nouveau poste d'ingénieur chargé des études métallurgiques à l'usine d'Imphy[32]. En acceptant, Fayol oriente de façon décisive la carrière de Chevenard vers la recherche. En janvier 1912, a lieu l'entretien avec Fayol, maintes fois raconté, qui définit la charte de son activité. Chevenard est chargé de travailler à surmonter les difficultés qui retardent les fabrications ; résoudre les problèmes adressés par la clientèle ; tirer parti des idées nouvelles et des faits nouveaux observés dans l'entreprise ou venus de l'extérieur ; et, en suivant la trace de Guillaume, « scruter les alliages sidérurgiques spéciaux afin d'en découvrir et d'en exploiter les propriétés exceptionnelles ». On constate que, si Chevenard souligne la dernière phrase en citant Fayol mot pour mot, cette mission exploratoire dont il est attendu des résultats concrets vient après l'énoncé d'objectifs plus quotidiens. Chevenard va assumer la totalité de la mission confiée et mener de front la création d'un ensemble d'appareils originaux permettant la mesure d'un très grand nombre de propriétés et la résolution de problèmes posés, tant par les ateliers en étudiant les traitements thermiques, que par les industries clientes en mettant au point des alliages *ad hoc*.

26 Guillaume signale que d'autres physiciens ont fait les mêmes observations.

27 L'hystérésis est la propriété d'un corps dont l'évolution ne suit pas le même chemin selon que la cause de cette évolution augmente ou diminue.

28 Les lettres H et G se réfèrent au mercure des contacts des compteurs et galvanomètres de l'époque ; le M au nom de leur concepteur E. Meylan. La signification du N est incertaine, peut-être tout simplement Nickel.

29 Après avoir été en poste à Imphy, à Decazeville et à Fourchambault, Girin a succédé en 1903 à Dumas comme chef du Service métallurgique. C'est également en 1903 que Jacques Adenot, qui avait mené les essais conduisant au NC4, quitte Imphy pour une carrière de constructeur d'usines en Russie.

30 Piélin cité par Chevenard dans le livre dit « du centenaire » p.231.

31 Sorte « d'homme à tout faire » du directeur, une excellente introduction pour un jeune ingénieur.

32 Discours prononcé par Georges Chaudron à l'occasion de la remise à Chevenard de son épée d'académicien, dossier biographique de Pierre Chevenard, Archives de l'Académie des sciences.

Peu après cette nomination, Girin invite Chevenard à Paris et le présente à des acteurs de premier plan du milieu scientifique et industriel : Guillaume bien entendu mais également Léon Guillet[33] (1873-1946), Albert Portevin[34] (1880-1962), Célérier et Mahler. Comme le souligne Georges Chaudron dans son discours, ces rencontres permettent de rompre l'isolement de Chevenard à Imphy et d'enrichir ses travaux par les connaissances et les réflexions de physiciens expérimentés :

> *« En résumé, vous avez commencé à travailler à Imphy seul, sans maître, pour vous enseigner les techniques ou les choisir. Toutefois des savants eurent, par des conversations plus ou moins espacées, des correspondances surtout, une influence certaine sur vos débuts. Ce fut le métrologiste Ch.-Ed. Guillaume. Ce furent le grand chimiste Henry Le Chatelier, les physiciens Pierre Weiss et Ch.-E. Guye, les métallographes Léon Guillet et Louis Grenet. »*

Le jeune Chevenard peut ainsi bientôt bénéficier des conseils de Léon Guillet et de son maître Henry Le Chatelier[35]. Introduit par Guillaume, mais aussi par Fayol, il va pouvoir dialoguer avec des inventeurs industriels tels que Maurice Leblanc[36] (1857-1923) et Georges Claude[37] (1870-1960).

Chevenard va, comme le lui a demandé Fayol, suivre la trace de Guillaume pour, à la fois approfondir ses recherches en ce qui concerne l'anomalie, et s'en écarter pour s'intéresser à des propriétés éloignées des préoccupations de Guillaume mais qui présentent un intérêt pour l'activité de l'usine d'Imphy. En 1914, il publie dans la *Revue de Métallurgie*, « après avoir reçu l'approbation de Charles-Édouard Guillaume », l'ensemble de ses résultats sur la dilatabilité des fer-nickel.

Dès sa prise de fonction, Chevenard est confronté à des problèmes industriels non résolus par les alliages disponibles. C'est en particulier le cas des turbines à vapeur mises hors d'usage par une corrosion fissurante affectant leurs ailettes en NC4. La solution est trouvée empiriquement dès 1919 avec l'ATV (Alliage pour Turbines Vapeur) à teneur en chrome considérablement augmentée. La compréhension du phénomène ne viendra que beaucoup plus tard[38] : en utilisant son thermomagnétomètre enregistreur, Chevenard constate, dans le métal des ailettes corrodées, un étalement du point de Curie que, grâce à sa connaissance de la variation du point de Curie en fonction de la teneur en chrome, il interprète comme la conséquence d'une variation locale de la teneur en chrome. Il en conclut que la formation et la croissance des carbures intergranulaires entraînent l'abaissement local de la teneur en chrome en dessous de la teneur minimale nécessaire pour assurer la résistance à la corrosion. Il donne ainsi une base scientifique à la composition de l'ATV.

L'exemple de l'ATV n'est pas isolé. Le brevet de l'ATG, Alliage pour Turbines à Gaz utilisé pour les tubes de synthèse de l'ammoniac, est déposé dès 1917 et l'AMF (Alliage pour Machines Frigorifiques) est utilisé dès 1922 pour les soupapes des détendeurs du procédé Georges Claude. Pour ce dernier alliage, Chevenard note « Monsieur Charles-Édouard Guillaume consulté ».

En 1919, Chevenard publie la description de son bientôt célèbre dilatomètre différentiel enregistreur[39]. Les principes qui régiront par la suite l'ensemble de ses instruments y sont présents : choisir de mesurer des grandeurs à la fois révélatrices des transformations de l'alliage et pertinentes pour les applications ; amplifier mais d'abord discriminer : augmenter le pouvoir séparateur par une mesure différentielle ; enregistrer le phénomène pour permettre, par un travail sur les courbes, la détection précise des températures auxquelles se produisent les « accidents » qui doivent être interprétés ; protéger les instruments contre les perturbations extérieures (vibrations, température, champs magnétiques, sautes de courant). Chevenard consacrera plus du tiers de la centaine de publications dont il est l'auteur à la description de ses

33 Métallurgiste, ingénieur de l'Ecole centrale des arts et manufactures en 1897, professeur à l'École Centrale de Paris, membre de l'Institut. En 1899, il est engagé par le Marquis de Dion pour fonder un laboratoire où il mène des recherches scientifiques sur les aciers.

34 Métallurgiste chez De Dion-Bouton avec Léon Guillet auquel il succède à Centrale, membre de l'Institut.

35 Henry Le Chatelier a dirigé la thèse soutenue par Léon Guillet en 1902. Léon GUILLET publie en 1923, *Les méthodes d'étude des alliages métalliques*, Paris, Dunod.

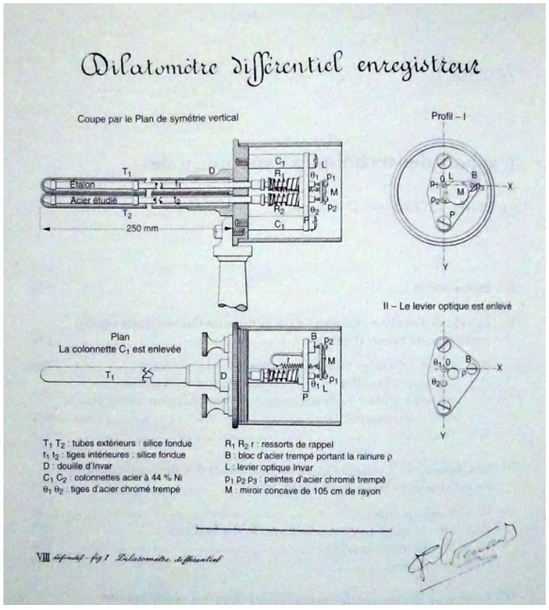
36 Inventeur et industriel. Membre de l'Institut en 1918. Actif en électrotechnique et hydraulique.

37 Inventeur et industriel (l'Air Liquide), élu à l'Institut en 1924, radié en 1944 pour son soutien actif à la collaboration.

38 P. CHEVENARD : « La corrosion fissurante des ferronickels dans la vapeur et les métaux d'ailettage pour turbines ». *Rev. Aciers Spéciaux, Métaux et Alliages*, octobre 1934.

39 Son fameux trépied optique permet l'enregistrement photographique de la différence entre la longueur de l'échantillon et celle de l'étalon, en fonction de la température donnée elle-même par la longueur de l'étalon.

appareils de laboratoire[40]. Cette activité de concepteur et constructeur d'instruments en fait un des grands ingénieurs de la mesure, lui, dont le maître Guillaume affirme que « rien n'est plus fécond en science que le gain d'une décimale[41] ».



Dilatomètre différentiel enregistreur

Au BIPM, au cours des vingt premières années du XX^e siècle, Guillaume multiplie les mesures et analyses pour décrire finement l'anomalie de dilatation. Il étudie le comportement de l'invar conservé au Bureau international pour comprendre et décrire ses variations. Il quantifie l'effet de la teneur en éléments secondaires. Il parvient ainsi à comprendre que la légère instabilité de l'invar constatée sur une période de 25 ans est due non pas, comme il le pense initialement, à une propriété intrinsèque de l'alliage mais à la présence de carbone qu'il peut corriger par l'addition de chrome, de tungstène ou de vanadium[42]. C'est notamment l'étude du rôle des additions qui lui permet d'apporter des améliorations déterminantes aux instruments destinés à l'horlogerie, une occasion de renouer avec la tradition familiale.

Guillaume collabore de 1897 à 1904 avec Paul Perret (1855-1904), un horloger et habile régleur de La Chaux-de-Fonds[43], puis avec la société des Fabriques de Spiraux Réunies. Perret a d'abord l'initiative et constate qu'un mouvement équipé d'un spiral[44] en invar « avance au chaud ». Guillaume trace la courbe du coefficient thermique du module d'élasticité en fonction de la teneur en nickel[45] et propose un premier spiral « auto-compensateur » en alliage à 45 % de nickel. La quasi-perfection est obtenue au cours du quart de siècle qui suit avec l'alliage élinvar, breveté en 1919, qui combine une dilution[46] de l'anomalie par un ajout de chrome et un durcissement par le carbone et le tungstène[47].

En 1920, un an après que Fayol a pris sa retraite de CFD, Guillaume est lauréat du prix Nobel de physique. Son discours de réception résume l'ensemble des recherches conduites et des résultats obtenus depuis la découverte de l'anomalie. Un développement important est logiquement consacré aux progrès spectaculaires réalisés en géodésie grâce à l'utilisation de fils en invar. Dans son discours, Guillaume cite à quatre reprises les travaux de Chevenard qui ont poursuivi et précisé les siens. Dans sa conclusion, il expose que la réussite de ses travaux a été permise par la « collaboration constante d'une usine et d'un laboratoire ». Pour satisfaire la précision demandée dans la composition des alliages, l'aciérie a été obligée d'affiner ses méthodes d'élaboration et d'analyse, donnant ainsi naissance « à une sorte de métallurgie de précision ». C'est la première fois que le terme de « métallurgie de précision » apparaît dans une communication officielle. Le mot « précision » fait partie intégrante de la terminologie propre à la métrologie de la fin du XIX^e siècle à la première moitié du XX^e siècle. La quête de la précision apparaît comme un marqueur important. Le mot précision laissera ensuite place à celui d'exactitude et à la notion actuelle d'incertitude.

40 F. DUFFAUT : « Pierre Chevenard, concepteur et constructeur d'appareils de laboratoire », *Marteau Pilon*, tome XIV, 2002, p. 61 à 68.

41 C-E. GUILLAUME, « Esquisse de ma vie », *L'Université de Paris*, 1922, p. 18.

42 Le dépôt du brevet correspondant est annoncé dans le rapport annuel de l'usine d'Imphy pour l'exercice 1919/20 (ANMT 59 AQ 0647 - 0653).

43 Cette collaboration est évoquée par Fayol au Conseil d'Administration de CFD du 16 juillet 1897. (ANMT 59 AQ 0010).

44 Il s'agit du ressort spiral de l'ensemble « balancier-spiral » qui est l'organe réglant d'un mouvement de montre.

45 Chevenard tracera cette courbe de façon plus fine en utilisant un pendule de torsion. C'est le module de flexion qui joue dans le spiral.

46 L'addition de chrome diminue l'intensité de l'anomalie et la répartit sur un plus grand domaine de température.

47 L'annexe 2 expose plus complètement les apports de Guillaume à l'horlogerie.

Faisant écho à cette phrase, Chevenard reprend cette expression dans son article « Méthodes de Recherche et de Contrôle dans la Métallurgie de Précision », publié en septembre 1923 dans les Mémoires et Comptes Rendus des Travaux de la Société des Ingénieurs Civils de France[48]. Il y énonce les quatre étapes de la mise au point d'un nouvel alliage : phase de recherche utilisant les connaissances acquises pour orienter les essais ; synthèse et choix de l'analyse et des traitements ; organisation de la fabrication courante ; contrôle du produit. Il présente ensuite une partie de la panoplie d'instruments de mesure qui équipe son laboratoire, en insistant sur leurs qualités essentielles : sensibilité[49], fidélité (dans le temps), rapidité et faible coût. Chevenard consacre la dernière partie de son article aux propriétés mécaniques aux températures élevées. Après avoir évoqué l'intérêt de l'alliage AFD à faible amortissement[50] pour les ressorts travaillant à chaud, il présente les mesures de viscosité qui ont permis de mettre au point le durcissement par le chrome et le tungstène de l'alliage BTG[51] pour le procédé Georges Claude de synthèse de l'ammoniac qui supporte une exposition à 600 °C sous une pression de 1 000 atmosphères.

Il est intéressant de noter qu'un article paru en 1924 dans La Nature a pour titre « La métallurgie de précision ». L'article signé H. Vigneron[52] revient sur les appareils présentés par les Aciéries d'Imphy à l'exposition de physique qui s'est tenue au Palais de la Découverte pour célébrer le cinquantenaire de la Société française de physique. Ce texte reprend le terme de « métallurgie de précision » dans son titre, sans toutefois le définir ou l'expliquer[53]. C'est d'ailleurs dans La Nature, revue à laquelle Guillaume collabore très régulièrement depuis 1887, que Chevenard a publié en 1919 un article en deux parties intitulé « Un laboratoire sidérurgique moderne, le laboratoire des aciéries d'Imphy »[54].

En 1925, lors d'une cérémonie en l'honneur de Fayol[55], qui décède peu de temps après, Guillaume fait son éloge sur un ton déférent et amical à la fois. Il témoigne des qualités dont Fayol a fait preuve envers lui : rapidité de décision, largeur de vues, bienveillance. Même si Fayol avait l'intuition que l'époque allait voir se développer des technologies radicalement nouvelles ayant besoin de matériaux encore inconnus, sa décision de fournir gracieusement les échantillons demandés relevait d'abord de son intérêt pour la science. Évoquant les brillantes réalisations qui en ont découlé, Guillaume souligne que « la collaboration d'une usine métallurgique et d'un laboratoire voué à la précision a pu apporter un progrès inespéré aux branches les plus diverses de la science et de l'industrie ». Il expose son admiration pour l'apport magistral en matière d'organisation et suggère que sa longue et confiante fréquentation de Fayol l'a amené, lui l'homme de science qui peut se satisfaire de faire avancer la connaissance, à s'inspirer de la démarche de l'industriel dont l'action n'a de sens que si elle atteint le but final.

Les ferronickels « réversibles », et les alliages fer-nickel-chrome à leur suite, ne prennent pas la trempe. Le caractère de ressort des spiraux en élinvar ne peut donc être obtenu que par un très important travail à froid conduisant inévitablement à une très grande fragilité, qui rend la fabrication délicate et favorise la rupture en service. Inspiré par l'exemple du duralumin, alliage mis au point en Allemagne en 1909, Chevenard pense possible le durcissement des fer-nickel-chrome par la formation contrôlée au sein de l'alliage de particules invisibles d'un composé nickel-aluminium[56]. Une petite variation de volume étant associée à` cette formation[57], c'est par des mesures fines de dilatométrie que Chevenard ajuste l'ajout d'aluminium et met sous contrôle le processus de formation des particules. Il définit ainsi le Durinval qui facilite la fabrication des spiraux et diminue leur fragilité. Cette invention va avoir

48 Séance présidée par Léon Guillet.

49 Intérêt déjà signalé de la mesure différentielle.

50 L'amortissement est l'énergie dissipée en chaleur pendant la déformation. Il est mesuré par le décrément et augmente rapidement quand on entre dans le domaine viscoélastique. AFD signifie alliage à faible décrément.

51 BTG indique une variante de l'ATG, alliage pour turbine à gaz, supportant une température plus élevée que l'ATV.

52 H. VIGNERON, « La métallurgie de précision », *La Nature*, n°2605 - 8 Mars 1924.

53 H. VIGNERON, « La métallurgie de précision », *La Nature*, n° 2596, 5 janvier 1924, p.163-165

54 P. CHEVENARD, « Un laboratoire sidérurgique moderne, le laboratoire des Aciéries d'Imphy », *La Nature*, n° 2382, 1919, p. 330-334.

55 Le banquet du 7 juin 1925 est organisé par l'Amicale des anciens élèves de l'École des mines de Saint-Étienne en l'honneur de Fayol et de son condisciple, le grand métallurgiste Alexandre Pourcel (1841-1934). Guillaume est à la table de Fayol, à une place assez proche de Fayol qui a comme voisins immédiats un jésuite, des officiers et Alfred Massé, ancien député puis sénateur de la Nièvre. Voir à ce sujet P. PEYRE, « Les engagements de Fayol », M. BERTILORENZI, N. DUBRUC et J-Ph. PASSAQUI (dir.), *Henri Fayol, les multiples facettes d'un manager*, Paris, Presses des Mines, 2019, p. 265-292.

56 Chevenard a choisi l'aluminium après avoir essayé divers éléments.

57 Chevenard a publié avec Guillet en 1923 une étude par dilatométrie du durcissement d'un alliage d'aluminium par de petites additions de magnésium et de silicium.

des conséquences allant très au-delà de l'industrie horlogère[58]. Chevenard constate en effet que, contrairement au durcissement par trempe, celui mis au point sur le Durinval se maintient à température élevée et peut ainsi s'ajouter au durcissement par le tungstène mis en œuvre dans le BTG[59]. Il l'applique donc rapidement aux alliages pour soupapes de moteur. Plus généralement, ce type de durcissement est à la base de tous les alliages modernes pour travail à haute température, dans les moteurs d'avion en particulier. Les brevets pris par Chevenard sur ce thème au début des années 1930 permettront à Imphy de produire sans redevance les alliages pour moteurs d'avion mis au point en Grande-Bretagne et aux États-Unis pendant la Seconde Guerre mondiale.

C'est en 1938, année du décès de Guillaume, que Chevenard propose une définition plus aboutie de la métallurgie de précision[60]. Il commence par citer son ami Albert Portevin :

> *« Le temps vient où, de même que l'architecte ou l'ingénieur établissent le projet d'un ouvrage d'art ou d'une machine ayant un but et des qualités déterminées, le métallographe projettera la construction d'un alliage ayant des propriétés déterminées. Il choisira des atomes dans le tableau périodique des éléments pour en constituer des phases de propriétés particulières, qu'il assemblera ensuite en proportions définies, pour enfin, par des traitements mécaniques et thermiques judicieux, les organiser en édifices de particules ou de grains de forme, grosseur et répartition appropriées ».*

Puis, estimant que si ce stade n'est pas atteint, on ne peut cependant plus se contenter de l'empirisme, Chevenard énonce :

> *« J'appellerai métallurgie de précision la préparation des alliages dotés d'un ensemble donné a priori de propriétés physiques, mécaniques ou chimiques, et dont l'élaboration doit être très précise, en raison du nombre des conditions à satisfaire et de l'étroitesse du domaine où chacune des propriétés atteint le degré voulu ».*

Traduisons en langage actuel : Chevenard part de la compréhension fine du besoin du client (ou de la chaîne client), en déduit le « panier de propriétés » nécessaire pour obtenir cette « valeur d'usage » attendue et, grâce à toute la connaissance antérieure dûment capitalisée et organisée - il parle de « doctrine » - circonscrit le domaine (composition chimique et traitement thermique) dans lequel la solution sera trouvée après un nombre limité d'essais. Une fois cette solution de compromis, y compris économique, identifiée, il s'agira bien d'industrie car, n'ayant pas été obtenue par hasard, elle sera reproductible à coup sûr. On voit qu'il s'agit là d'une méthode de travail de portée générale, qui prône l'abandon de la recherche empirique en faveur d'une démarche basée sur l'organisation des acquis antérieurs par un effort théorique, donnant ainsi un sens opératoire à l'alliance entre le technicien et le savant.

Le 4 février 1946, Chevenard est élu membre de la division des applications de la science à l'industrie de l'Académie française. C'est sa deuxième tentative pour entrer à l'Académie des sciences. Par un concours de circonstance, il y occupe le siège laissé vacant par la radiation de Georges Claude (1870-1960) en raison de ses positions clairement affichées en faveur de la collaboration. Son épée[61] lui est remise par Louis de Broglie[62] (1892-1987) et c'est Georges Chaudron (1891-1976) qui évoque son œuvre. Dans son discours de remerciement, Chevenard rend hommage à Guillaume en ces termes :

58 L'impact en horlogerie sera d'ailleurs très limité. Quand le Durinval est mis au point, les Spiraux Réunies adoptent exclusivement le Nivarox et Les Spiraux Français restent à l'élinvar. Le Durinval ne sera utilisé que par un « outsider », Timex, qui fabrique ses propres spiraux.

59 Le durcissement d'un alliage métallique peut être obtenu par trempe (quand c'est possible), par écrouissage (travail à froid), par solution solide (introduction de gros atomes comme le tungstène qui distordent le réseau cristallin), et enfin par durcissement structural (formation d'un nuage de petits grains d'une deuxième phase, généralement constituée d'intermétalliques). Les deux premiers disparaissent au-dessus d'environ 500 °C.

60 P. CHEVENARD, « La métallurgie de précision », *La Technique Moderne*, XXX, n° 7, 1er avril 1938.

61 Parmi les symboles figurés sur la coquille de cette épée figurent, à côté du dilatomètre (trépied optique et diagramme), une roue de turbine et un ressort spiral, montrant l'importance attachée par Chevenard aux trois principales inventions évoquées ci-dessus.

62 Louis de Broglie est alors membre du Comité international des poids et mesures où il a succédé à Charles Fabry, directeur de l'Institut d'Optique après son décès en 1945. Fabry soutient dès le 12 novembre 1944 la candidature de Chevenard à l'Académie, voir dossier biographique de Pierre Chevenard, Archives de l'Académie des sciences, notes manuscrites de Charles Fabry.

« Le contact fut même particulièrement heureux avec ChÉd. Guillaume, directeur du Bureau international des poids et mesures, découvreur de l'invar et de l'élinvar, initiateur de la métallurgie très spéciale. Il fut pour moi un guide clairvoyant, un conseiller plein de finesse et de cœur, pour tout dire, un bon maître[63] *».*

Le 5 janvier 1951, Chevenard prononce, à la Société des Ingénieurs Civils de France qu'il préside, un discours intitulé : « La précision en métallurgie et la métallurgie de précision ». Il y brosse d'abord une rapide histoire de la métallurgie montrant sa transformation progressive et relativement récente de savoir-faire en science. Quand il en vient à exposer la méthode et les résultats de la métallurgie de précision, il écrit :

« Qu'il soit permis à l'auteur de ces lignes d'affirmer quelle fut sa chance d'être appelé à coopérer à l'œuvre de ChÉd. Guillaume, à l'étendre et à la poursuivre, et d'exprimer sa gratitude envers ce Maître, envers H. Fayol et envers la Société de Commentry-Fourchambault et Decazeville ».

En 1954, la société Commentry-Fourchambault et Decazeville prend le nom de Société Métallurgique d'Imphy. La même année[64], elle fait ériger, dans le jardin de la mairie d'Imphy, un buste de Guillaume dont le socle porte les inscriptions suivantes : Sur la face avant : « Charles-Édouard Guillaume, 1861-1938, créateur de l'INVAR (1896) et initiateur de la métallurgie de précision en collaboration avec les Aciéries d'Imphy, Prix Nobel 1920 ».

Buste de Charles-Édouard Guillaume, à Imphy

Sur la face arrière : « Monument inauguré le 26 juin 1954 par Pierre Chevenard, de l'Institut, qui a étendu l'œuvre de Ch-Éd. Guillaume et contribué au progrès des alliages sidérurgiques spéciaux ». Ces deux inscriptions expriment bien la filiation entre les travaux et les apports des deux hommes. Dans l'allocution qu'il prononce ce jour-là, Chevenard rappelle le rôle de Fayol en ces termes : « H. Fayol, en vrai grand chef, saisit d'emblée la fécondité de la voie ouverte par Guillaume et, pour l'aider à l'explorer, il met à sa disposition les vastes ressources d'Imphy ». C'est donc de façon très pertinente que les inscriptions sur le socle du buste, probablement rédigées par Chevenard, et l'allocution prononcée par ce dernier, associent, chacun à sa place, Fayol, Guillaume et Chevenard dans une même œuvre.

63 Quand il communique la notice de ses travaux pour solliciter son élection, Chevenard écrit : « M'inspirant des conseils et des exemples de mon maître Ch-Éd. Guillaume ». De même, dans le livre dit du centenaire, Chevenard écrit à propos de Guillaume : « Qu'il soit permis à l'auteur de ces lignes, l'un des fervents continuateurs de son œuvre, d'affirmer sa profonde gratitude envers son inoubliable Maître ».

64 C'est également l'année de parution du livre dit « livre du centenaire » publié par la SMI.

II) Analyse des facteurs ayant contribué à l'émergence et au développement de cette nouvelle métallurgie

Les vies de Fayol, Guillaume et Chevenard sont échelonnées dans le temps sur trois générations. Fayol s'intéresse aux premiers travaux du jeune Chevenard[65], lui définit sa mission et veille à ce qu'il ait les moyens de la réaliser. C'est cependant deux à deux, Fayol / Guillaume d'une part, Guillaume / Chevenard d'autre part, que s'instaurent des relations intenses et continues, donnant ainsi à Guillaume un rôle pivot. Dans chacun des deux binômes, le plus âgé est en position de mentor du plus jeune. L'influence de Fayol sur Guillaume ne se borne pas à lui apporter les moyens techniques de CFD. C'est à son contact que Guillaume conforte sa façon de conduire sa recherche sans s'écarter du chemin qui conduit au but concret qu'il vise. Guillaume est un guide bienveillant pour Chevenard, orphelin de père à trois ans, qui trouve en lui un père spirituel.

Fayol et Chevenard sortent tous deux de l'Ecole des Mines de Saint-Étienne et sont représentatifs de son enseignement combinant culture scientifique et préparation à la direction de mines ou d'usines. Guillaume a une formation scientifique plus théorique mais, avec ses origines familiales et la pratique de l'horlogerie, il a également développé un goût prononcé pour les applications. Il est bien armé pour assumer son rôle de pivot car la métrologie est utile au physicien comme à l'industriel. Guillaume a été, au moment de la création du laboratoire d'Essais, au cœur du questionnement sur ce qu'est une mesure de précision et sur les liens entre laboratoire, mesure et industrie, notamment autour du débat sur la normalisation des mesures industrielles.

Fayol, Guillaume et Chevenard ont également en commun d'avoir passé la totalité de leur vie professionnelle dans la même entreprise ou organisation, se consacrant chacun à une mission qui sous-tend l'ensemble de leur carrière.

Avant de décrire les modes de pensée et d'action communs à Fayol, Guillaume et Chevenard et la qualité de leurs relations personnelles, il convient d'exposer comment Fayol et Guillaume ont établi et entretenu une collaboration d'une durée exceptionnelle entre un physicien et une société industrielle ; collaboration qui continue bien après la retraite de Fayol et Guillaume. Le paragraphe suivant montre comment tous trois participent à l'esprit d'une époque où le développement d'industries nouvelles s'appuie sur la collaboration entre savants et industriels qui partagent une mystique commune de la Précision.

Leur collaboration étroite sur une longue période

La mise au point des alliages que CFD met à son catalogue rend nécessaire l'établissement, entre Guillaume et CFD, d'une première convention signée en 1900[66]. Elle formalise les conditions de la collaboration entre le savant suisse et l'entreprise ; la convention prévoit le « concours technique » de Guillaume en échange d'une redevance annuelle. Elle établit un partage du bilan « bénéfices moins dépenses engagées » en cas de développement de nouveaux alliages brevetés. Cette convention est renouvelée le 15 décembre 1917[67] (avec une entrée en vigueur au 1er janvier 1917). À cette occasion, Guillaume, qui est depuis deux ans directeur du BIPM, fait ajouter, le concernant, la mention « agissant en son nom personnel », afin de dissocier son activité de conseil auprès de CFD, de ses fonctions au BIPM. Il prévoit également, comme pour la précédente convention, qu'en cas de décès, celle-ci expirera d'elle-même à la fin de la période en cours ou à la fin de l'année suivant le décès si la période en cours s'étend au-delà. L'accord reprend les termes de la convention initiale et est divisée en deux parties : la première partie concerne les conditions relatives à la vente des alliages et aciers spéciaux qui n'ont pas fait l'objet d'un brevet d'invention ou dont le brevet est désormais tombé dans le domaine public. La deuxième partie concerne les alliages ou aciers spéciaux pour lesquels un brevet est en cours.

Pour les alliages qui rentrent dans le cadre de la première partie de l'accord, soit onze alliages dont l'invar, la platinite, le dilver, l'AMF et l'ADR[68],

65 Chevenard naît l'année où Fayol devient Directeur général.

66 Au Conseil d'Administration de CFD du 15 mars 1900, Fayol évoque, à propos des lampes à incandescence et du verre armé, le partage des bénéfices convenu pour la platinite : 40 % pour Guillaume, 60 % pour CFD. (ANMT 59 AQ 0010).

67 Document CEG.21, Archives du MIH, la Chaux-de-Fonds

68 Dilver pour « dilatation du verre » (nom toujours utilisé

auxquels s'ajoutent les aciers spéciaux et alliages pour lesquels Guillaume aura contribué au développement mais qui n'auront pas fait l'objet d'un brevet d'invention, le physicien reçoit en échange de son « concours technique » une redevance de 5 % des nouveaux encaissés des ventes représentant une somme annuelle qui ne peut être inférieure à 4 000 francs ou supérieure à 10 000 francs. Une somme de 1 000 francs est versée à la fin de chaque trimestre permettant à Guillaume d'engager des frais si nécessaire et le reste des sommes dues sont versées en fin d'année.

La deuxième partie de l'accord est plus compliquée. Elle prévoit les termes de la collaboration dans le cadre de nouvelles inventions susceptibles de faire l'objet d'une prise de brevet. Le développement d'une invention engendrant des frais et un potentiel déficit lors de la première année d'exploitation, la convention prévoit des modalités de rétributions différentes et trois cas possibles. Premier cas, Guillaume et la société sont d'accord sur la nécessité de breveter le nouvel alliage ou acier ; dans ce cas, la société prend les brevets à son nom uniquement afin de supporter la totalité des dépenses à engager pour la mise au point, la prise et l'entretien des brevets, la promotion de l'invention. Les sommes engagées ainsi que les bénéfices commerciaux qui résulteront de la commercialisation seront déposés sur un compte spécial. Les bénéfices commerciaux (résultant de la différence entre prix de vente et prix de revient) majorés de 20 % représenteront la part de l'usine. Le solde du compte actif ou passif sera réparti dans la proportion deux tiers pour la société et un tiers pour Guillaume à la fin de chaque année. Le deuxième cas prévoit que Guillaume seul souhaite faire breveter l'invention : il fera lui-même les dépenses relatives au brevet d'invention. Il confiera à la société à l'exclusion de tout autre la fabrication et les ventes pour la France. Les prix de vente, qui devront prévoir une marge rémunératrice, seront fixés par le physicien. Les conditions de versement des bénéfices sont identiques au premier cas, sauf que le solde du compte spécial actif ou passif sera réparti dans la proportion d'un tiers pour la société et deux tiers pour Guillaume à la fin de chaque année. Le troisième cas prévoit que seule la Société CFD souhaite déposer un brevet. Les conditions sont identiques au deuxième cas, la société étant substituée à Guillaume sauf pour ce qui concerne la fabrication, les ventes et la comptabilité qui restent attachées à la société.

Les engagements sont dans tous les cas liés à la durée du brevet. Il est prévu également la possibilité qu'un des contractants abandonne l'entretien d'un brevet et la possibilité de vendre un brevet à l'étranger. Pour les brevets, deux cas sont possibles : soit Guillaume prend le brevet et CFD procède à la fabrication et la vente ou la société prend seule le brevet.

Les échanges autour de la signature de part et d'autre de cette convention montrent les relations cordiales et de confiance entre les deux parties. Les engagements de Guillaume sont très brièvement évoqués et les modifications qu'il apporte au projet de texte sont relativement limités. La convention prévue pour cinq ans est reconduite le 31 décembre 1921 puis le 31 décembre 1926. Entre 1926 et 1932, la Convention n'est pas explicitement reconduite mais la poursuite de la collaboration et des versements montre qu'il existe entre Guillaume et CFD une relation de mutuelle confiance. Une dernière version de la convention entre en vigueur le 31 décembre 1932 et est prolongée jusqu'à fin 1935[69].

pour les alliages soudables au verre), AMF pour « alliage pour machine frigorifique », ADR pour « alliage à dilatation réduite ».

69 La Convention de 1915 et les suivantes sont conservées dans le fonds Guillaume au MIH.

Alliage Exercice -->	1919/20	1920/21	1921/22	1922/23	1923/24	1924/25	1925/26
INVAR	1.581	1.594	1.929	2.565	1.888	2.204	3.370
Dilver	496	1.370	323	719	169	209	186
Platinite et Platinor	569	535	393	480	485	180	88
Stellite	77	27	12	7	6	0,5	1,5
All pour Chronométrie	115	296	11	24	126	472	465
All pour compteur d'électricité	192	151	167	403	394	881	1.174
Etiral, CC, CR	1.080	7.130	2.650	2.920	6.165	18.415	11.007
N 58 et AMF	280	46	91	429	2.908	1.497	723
ATV	483	3.570	2.852	6.700	9.931	60.304	98.949
ATG - BTG	1.075	3.951	5.319	14.930	89.535	72.484	71.828
ARC et Nicral	713	1.996	3.440	4.240	4.065	4.016	5.231
Fils pour thermocouples	8	7	6	24	136	319	88
Baros et Ruptine	-	4	19	12	5	45	29
RNC	10.007	6.301	3.335	4.486	7.058	8.480	13.778
Total (kg)	**16.676**	**26.978**	**20.547**	**37.939**	**122.971**	**169.506,5**	**206.917,5**

Quantités produites d'alliages spéciaux inventés par Guillaume ou Chevenard (ANMT 59 AQ 0657 – 0653). Elles restent modestes devant les milliers de tonnes d'aciers ordinaires et spéciaux produites par les Aciéries d'Imphy mais apportent des bénéfices substantiels

La collaboration entre Guillaume et CFD est d'une forme assez inédite. Il est peu fréquent qu'une société commerciale s'attache la collaboration d'un physicien sur une aussi longue période. Les fonctions de Guillaume au sein du BIPM constituent de même une forme inédite de collaboration avec le milieu industriel qui est rendue possible par le fait qu'elle arrive à une période où la marge de manœuvre d'un directeur d'une organisation internationale est encore suffisamment importante pour lui permettre de sortir du cadre de ses fonctions. Notons que les collaborations industrielles de Guillaume ne se limitent pas à CFD. Guillaume fait partie du conseil d'administration de l'Air Liquide pendant de nombreuses années. Il est également conseiller scientifique auprès de la Société des Fabriques de Spiraux Réunies et des Fabriques suisses de balanciers[70]. Guillaume a des intérêts financiers et commerciaux dans plusieurs entreprises. Cela est aussi rendu possible car le développement de ces activités apporte de nombreux bénéfices au BIPM et bénéficie d'un heureux concours de circonstances. En effet, si l'horlogerie et la chronométrie constituent un domaine où Guillaume s'investit à titre personnel, ces travaux revêtent une importance particulière pour Adolphe Hirsch, le Secrétaire du CIPM, acteur central et influent, qui est également directeur de l'Observatoire de Neuchâtel[71]. L'un des buts de cet observatoire fondé en 1858 est de faire reconnaître le savoir-faire horloger de la région de Neuchâtel. Hirsch encourage Guillaume à poursuivre ses recherches dans cette direction en parallèle des développements qui intéressent la métrologie et fait tous les efforts possibles pour l'encourager à continuer sa carrière au BIPM. L'invar est ainsi une « success story » pour le BIPM lui-même car il lui permet de se donner un rôle incontournable au sein des acteurs de la géodésie en assurant lui-même les phases finales de la fabrication et de la garantie des fils géodésiques[72].

La collaboration avec CFD se poursuit avec Albert Pérard (1880-1960) engagé en 1905 au BIPM et qui succède à Guillaume en 1936 à la direction du BIPM. Les lettres échangées avec Chevenard[73] montrent des échanges menés sur un ton très amical entre deux personnes qui se sont côtoyées à maintes occasions et sur divers sujets d'intérêt pour le Bureau. Chevenard y évoque la mise au point, enfin obtenue, de l'invar stable dans le temps[74]. Il reviendra sur ce point dans son allocution de 1954 pour l'inauguration du buste de Guillaume.

70 Voir Annales françaises de chronométrie, 1922, article paru à l'occasion de la mort de Charles-Édouard Guillaume et le fonds Guillaume au Musée international de l'horlogerie à la Chaux-de-Fonds en Suisse.

71 Sur la fondation de l'Observatoire : Conférence de Rossella Baldi, « Les origines de l'Observatoire de Neuchâtel », enregistrée au Club 44, le 19 février 2019. https://soundcloud.com/club-44/les-origines-de-lobservatoire-de-neuchatel-rossella-baldi. Un projet d'étude est en cours sur « L'Observatoire cantonal de Neuchâtel (1858-1948) : cultures de la précision, économie de la qualité et « merchandisation » de l'heure », sous la direction de Gianenrico Bernasconi à l'Université de Neuchâtel.

72 Voir l'annexe 1 déjà citée.

73 Entre 1936 et 1941.

74 Guillaume avait mis en évidence le rôle du carbone. L'évolution des techniques d'élaboration a permis de fortement réduire la teneur en carbone et de bloquer sa quantité résiduelle par un petit ajout de molybdène ou de titane.

Leur pratique originale et volontaire de la relation entre science et industrie

Le rapport entre science et industrie est en France une question brûlante qui agite les premières années du XX[e] siècle, tout particulièrement au moment notamment de la création du Laboratoire d'essais[75]. Dans les pays voisins, la question semble avoir été tranchée depuis plusieurs années, comme en Allemagne avec la fondation en 1887 du Physikalisch-Technische Reichsanstalt (PTR) à Charlottenburg sur l'initiative de Werner von Siemens, et de Hermann von Helmholtz ou, plus tard, en Angleterre avec la création du National Physical Laboratory en 1901. Ces laboratoires nationaux de métrologie qui voient le jour entre le dernier quart du XIX[e] siècle et le début du XX[e] siècle ont créé des passerelles entre les savants et les industriels. Ils sont organisés selon un programme défini pour répondre à la fois aux besoins de la science, en particulier de la métrologie scientifique, et à ceux de l'industrie, en fournissant une gamme de services dont la certification. La PTR est même citée comme l'exemple à suivre lors du Congrès international de physique réuni sous les auspices de la Société Française de Physique à Paris en 1900 à l'occasion de l'Exposition Universelle. Henri Pellat (1850-1909), professeur à la Faculté des sciences de l'Université de Paris déclare dans son intervention consacrée aux laboratoires nationaux physico-techniques :

> *« L'Industrie fait de plus en plus appel à la Science, non seulement pour ses découvertes, mais aussi pour la rigueur de ses procédés de mesure : elle a besoin de s'appuyer sur les données précises sorties des laboratoires. [...] Les immenses avantages que les laboratoires physico-techniques procurent aux pays qui en sont pourvus, l'essor remarquable qu'ils ont donné à leur industrie, montrent combien il serait important de ne pas retarder davantage leur création dans les pays qui, comme la France, n'en possèdent pas encore. »*[76]

Le BIPM est amené à prendre position entre les protagonistes dans le débat qui se joue autour de la création du Laboratoire d'essais où les opinions divergent sur la mission et le fonctionnement du Laboratoire. Guillaume suit avec intérêt l'évolution de la situation d'autant plus qu'avec ses travaux sur les ferronickels, il peut faire le lien entre d'une part les exigences du laboratoire scientifique de physique théorique et expérimentale dédié à la mesure de précision et d'autre part les besoins, contraintes techniques et opérationnelles inhérentes à la fabrication industrielle.

Directeur de la mine de Commentry de 1866 à 1888, Fayol cherche à en évaluer les réserves. C'est dans ce but qu'il élabore sa « théorie des deltas[77] » qui modélise la formation des gisements de houille. En marge de l'exploitation minière, il organise une chaîne, depuis l'ouvrier mineur jusqu'au savant, le célèbre paléontologue Charles Brongniart en particulier, pour la collecte et l'étude systématique de plus de 700 fossiles d'insectes. Un grand nombre de ces échantillons sont toujours précieusement conservés à Paris, dans les collections du Muséum national d'Histoire naturelle[78]. Dans la notice sur ses travaux scientifiques et techniques, Fayol écrit avec une légitime fierté : « J'ai proclamé l'indispensable nécessité pour l'industriel d'organiser et de réussir la collaboration de la Science avec le monde des affaires[79] ». C'est donc un industriel convaincu de la fécondité d'un dialogue actif entre science et industrie qui reçoit Guillaume en 1896.

75 Voir en particulier M. SCHIAVON, Itinéraires de la précision, chapitre IV, « La création du Laboratoire d'essais (1890-1901) et Le Cnam et la Métrologie nationale depuis les Trente Glorieuses, *Cahiers d'histoire du CNAM*, Vol.3, 2013, voir en particulier « Du Système métrique au Laboratoire d'essais : le Cnam et la Métrologie nationale », Claudine FONTANON et Loïc PETITGIRARD (p.13-38)

76 H. PELLAT, « Les laboratoires nationaux physico-techniques » in Ch.-É. GUILLAUME et L. POINCARÉ, Rapports présentés au Congrès international de physique de 1900, réuni à Paris en 1900 sous les auspices de la Société française, Tome 1, Questions générales, métrologie, physique mécanique, physique moléculaire, Gauthier-Villars, 1900, p. 101 à 108.

77 H. FAYOL : « Résumé de la théorie des deltas ». *Bulletin de la Société Géologique de France*, 1888, p. 968 – 980.

78 Sylvain CHARBONNIER : « Le temps des collections. Henri Fayol et le Museum national d'Histoire naturelle », M. BERTILORENZI, N. DUBRUC et J-PH. PASSAQUI (dir.), *Henri Fayol, les multiples facettes d'un manager*, Paris, Presses des Mines, 2019.

79 Cité par Chevenard dans son allocution pour le centenaire de Fayol, Revue de l'Industrie Minérale, 1942.

En permettant à Chevenard de poursuivre une activité d'enseignement au sein de l'École des Mines de Saint-Étienne puis à l'École des Mines de Paris et de publier régulièrement les résultats de ses travaux, Fayol contribue à la renommée des recherches de Chevenard dans le monde des savants comme dans celui des industriels. La renommée du laboratoire de recherche d'Imphy contribue largement à orienter de nouveaux clients vers cette usine. Elle est renforcée par la très large diffusion des instruments conçus par Chevenard. Tout cela justifie l'appréciation de Léon Guillet : « Pierre Chevenard a consacré sa carrière à réaliser l'Union de la Science et de l'Industrie. »[80]

Guillaume est, comme Fayol, un personnage complexe qui s'engage dans de multiples directions et développe un réseau important constitué de personnalités d'horizons divers. Dès son arrivée au BIPM, son travail autour des prototypes nationaux et internationaux et des étalons géodésiques lui permet de côtoyer non seulement des physiciens mais également de nombreux acteurs de terrain, des officiers géodésiens, des membres du Conservatoire des arts et métiers. Il assiste à la création des grands laboratoires nationaux de métrologie et au développement du Laboratoire d'Essais en France. Il est ainsi au cœur du questionnement autour de ce qu'est une mesure de précision pour le savant ou l'industriel et comment la mettre en œuvre.

Guillaume est un homme de réseaux. Avec ses engagements académiques, ses travaux en direction de l'horlogerie, sa participation à de multiples initiatives internationales, et sa mission au BIPM, il est en contact avec de nombreux acteurs de la scène politique, diplomatique, militaire, scientifique et industrielle nationale et internationale, sans oublier les fabricants d'instruments de précision comme la Société Genevoise Carpentier ou encore les Frères Brunner. Il bénéficie d'une tribune propice à la diffusion de ses travaux et d'un important réseau avec de multiples connexions dont il fait profiter régulièrement la Société CFD. Les archives du BIPM fournissent de nombreux exemples : Guillaume met en contact l'industriel avec la société l'Air Liquide pour les essais à très basses températures et son dirigeant Georges Claude[81] qu'il invite à venir rencontrer Chevenard à Imphy en 1920[82] :

> *« J'ai écrit à M. CLAUDE qu'il ferait bien d'aller à Imphy. Il est très désirable qu'il vous y rencontre. Je pense qu'il a téléphoné à Imphy pour savoir quand on pourrait le recevoir. Il est à Montereau (Yonne) ; son adresse est Villa MONTEREAU. Vous pourriez lui écrire pour lui donner les dates où vous serez à Imphy. La question du métal A.T.G. est de toute première importance. »*

En 1904, Guillaume met également en relation Henri Fayol avec des dirigeants des chemins de fer suisses pour la commercialisation d'alliages spéciaux dont une partie est adaptable au chemin de fer par l'intermédiaire de son ami M. Spoerri[83]. Il sert d'intermédiaire entre l'industriel et Maurice Leblanc, en 1912, avec Heike Kamerlingh Onnes en 1913, avec le Professeur H.W. Price de l'Université de Toronto[84] ou encore la Coast and Geodetic Survey à Washington qui souhaite fabriquer des tubes en invar à partir de pièces massives que Guillaume suggère de faire fabriquer par Imphy[85]. Il prévoit, pour une délégation chinoise venue visiter le BIPM à la suite de l'adoption par la Chine du Système métrique, une visite des usines d'Imphy[86]. On pourrait ainsi multiplier les exemples. Guillaume est en contact avec des institutions et des personnalités du monde scientifique et politique. Il fréquente très régulièrement le Club Autour du Monde[87] fondé par le banquier et philanthrope français Albert Kahn (1860-1940) et où Guillaume a l'occasion de côtoyer de nombreuses personnalités de la sphère artistique, politique, industrielle ou scientifique. Il y invite de très nombreuses personnalités d'horizons divers. Son fils, André-Charles Guillaume, le résume ainsi :

> *« J'ai connu chez mon père, les deux tiers de ceux qui formèrent l'élite des sciences physiques. »*[88]

80 Rapport de Léon Guillet en date du 28 janvier 1946 sur les travaux de Pierre Chevenard pour le Comité secret. Dossier biographique de Pierre Chevenard, Archives de l'Académie des sciences.

81 Un document préparatoire interne à Commentry-Fourchambault et Decazeville mentionne l'intérêt pour l'entreprise des relations de Guillaume avec Marius Latour et Georges Claude.

82 Lettre de C.-Éd. Guillaume à Pierre Chevenard datée du 3 février 1920, Archives BIPM.

83 Voir lettre C- Éd. Guillaume à Henri Fayol du 24 août 1904, Archives BIPM.

84 Lettre de C- Éd. Guillaume à Henri Fayol, 10 février 1920, Archives BIPM.

85 Lettre 352-353 (1914), Archives BIPM.

86 Lettre référence 373 du 6 mars 1914, Archives BIPM.

87 Archives de la Société Autour du Monde, inventaire aimablement communiqué par le Musée départemental Albert-Kahn, Boulogne-Billancourt.

88 André-Charles Guillaume, citation reproduite dans le cadre de l'exposition Le mètre et la seconde, Archives du Musée international de l'Horlogerie, la-Chaux-de-Fonds, Suisse.

Leur conception de la recherche et de sa place dans l'entreprise

Dans un article publié en 2016 dans *Entreprises et Histoire*[89], Pascal Le Masson et Benoît Weil décrivent comment Fayol, Guillaume et Chevenard ont inventé une forme de recherche « conceptive » en orientant délibérément leurs travaux vers l'exploration de l'inconnu, se distinguant ainsi de la recherche « résolutoire » qui vise à accroitre les connaissances mais sans en changer les fondamentaux. Pour étayer leur propos, ces auteurs mentionnent la priorité donnée par Chevenard à la construction d'appareils de laboratoire permettant de mesurer un très grand nombre de propriétés nouvelles à une époque où l'attention des métallurgistes est centrée sur les propriétés mécaniques[90]. Chevenard est encouragé dans cette voie par Fayol qui pense que les alliages de fer et de nickel constituent une nouvelle classe de matériaux susceptibles de répondre aux besoins encore inexprimés des industries nouvelles et par Guillaume et sa pratique de la mesure. L'objectif est, dans une démarche d'anticipation, de caractériser leurs propriétés et leur potentiel de façon à avoir réuni des premiers éléments de réponse quand un besoin précis se révèlera.

Physicien métrologiste, Guillaume est par essence attaché à l'élaboration et l'amélioration permanente de méthodes qui garantissent la précision et la reproductibilité de la mesure. L'apport de Guillaume dans l'établissement de cette nouvelle métallurgie consiste d'abord à introduire dans le laboratoire de recherche la méthode scientifique, comme le déclare Chevenard en 1923 :

> *« Une des conséquences des travaux [avec Guillaume] fut d'orienter Imphy vers la métallurgie de précision, de familiariser le personnel avec les techniques minutieuses, de créer dans l'usine une ambiance spécifique. »*

Chevenard a vu à Sèvres, dans les laboratoires du BIPM, les instruments et appareils de mesure de précision dont le Bureau a fait l'acquisition auprès de fabricants d'instruments mais qui sont le plus souvent adaptés et retravaillés quand ils ne sont pas directement mis au point au Bureau. C'est le cas de l'appareil à palpeurs conçu par Guillaume lui-même ou l'appareil Jäderin qui va être entièrement repensé et réadapté par le fabricant d'instruments Jules Carpentier (1851-1921) et Guillaume.

En 1916, la mise au point de la première version du dilatomètre différentiel inaugure, pour Chevenard, un domaine pour lequel il deviendra internationalement reconnu ; celui de concepteur d'appareils de mesures thermophysiques. Fayol a la clairvoyance d'en permettre la diffusion[91], si bien qu'en 1946 Léon Guillet pourra écrire : « plus de quinze cents figurent dans les laboratoires de recherches, de contrôle et d'enseignement en France et à l'étranger[92]. » Chevenard conçoit et construit toute une gamme d'appareils comme l'oscillomètre de torsion pour l'étude de la thermoélasticité ou le thermomagnétomètre qui trace les courbes de variation de l'aimantation en fonction de la température. Ces appareils permettent de nouvelles pratiques qui visent à révéler les évolutions structurales. Ses micromachines utilisent des éprouvettes mille fois moins volumineuses que les éprouvettes classiques[93]. Léon Guillet peut écrire : « son nom est passé de l'appareil à la méthode », soulignant ainsi que ces appareils sont les instruments d'une toute nouvelle démarche d'expertise du matériau dont sont issues les éprouvettes.

Le choix de Fayol et Chevenard d'explorer l'inconnu s'explique par la conjonction entre l'émergence de technologies sollicitant les matériaux de façon nouvelle et l'apparition d'une classe d'alliages elle-même nouvelle. C'est cette même nouveauté qui avait suscité la curiosité puis les espoirs de Guillaume, le conduisant à la découverte qui, au-delà de l'invar, a révélé le potentiel en propriétés nouvelles des alliages de fer et de nickel. L'espoir de répondre à un besoin est cependant bien présent dès le début et c'est très rapidement que Guillaume déduit de sa découverte plusieurs alliages que CFD met aussitôt à

89 P. LE MASSON, 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*, Eska, 2016, 83, p.79 à 107.

90 Les propriétés mesurées par ses appareils sont pertinentes pour les applications mais permettent également à Chevenard de proposer des hypothèses sur les évolutions structurales des alliages. Cela est précieux car ces évolutions sont en général invisibles avec les moyens de microscopie de l'époque. Ainsi des mesures a priori éloignées des propriétés mécaniques peuvent servir à expliquer leur évolution.

91 Piélin milite dans ce sens dès 1919 et les ventes commencent en 1922. Trente-sept appareils sont vendus dans l'exercice 1925/26 (ANMT 59 AQ 0647 - 0653). La Société ADAMEL (Atelier d'appareils de mesure et de laboratoire) est créée en 1942 et inaugurée le 10 juin 1943. Curieusement, la création d'une SA ADAMEL, dont le siège est à La Chaux de Fonds, est annoncée au CA de CFD du 18 novembre 1937 (ANMT 59 AQ 0816).

92 Rapport de Léon Guillet en date du 28 janvier 1946 sur les travaux de Pierre Chevenard pour le Comité secret. Dossier biographique de Pierre Chevenard, Archives de l'Académie des sciences.

93 Elles permettent par exemple d'explorer la variation des propriétés mécaniques dans les différentes zones d'un joint soudé.

son catalogue. La démarche d'acquisition de connaissances et celle de réponse à un besoin ne sont donc pas conduites l'une après l'autre mais en parallèle.

La deuxième thèse présentée dans ce même article concerne la place de la recherche dans la gouvernance de l'entreprise. Les auteurs exposent qu'avec Fayol, la recherche est « acteur majeur de l'état-major dans la perspective d'une exploration de l'inconnu » ; les programmes d'action de l'entreprise n'étant plus « seulement guide de la recherche mais aussi résultat de son action ». Cette prise en compte, au niveau de la direction générale, des résultats et du potentiel de la recherche est en effet très importante pour le développement de l'entreprise. Dans le cas de CFD (Société Métallurgique d'Imphy à partir de 1954), l'influence de la recherche sur la direction générale est cependant restée informelle et celle de Chevenard pratiquement limitée aux activités de l'usine d'Imphy[94], au moins jusqu'à ce qu'il soit nommé directeur scientifique résidant à Paris[95]. Il faut ensuite attendre 1967 pour que cette pratique soit réaffirmée par Pierre-Marie Fourt avec le rôle donné à Jean Morlet[96] ; elle est actuellement poursuivie par Aperam Alloys Imphy.

Dans le cas de Guillaume, la question du dialogue entre la recherche et la direction de l'organisme ne se pose pas. La question pertinente est alors de restreindre la recherche pour qu'elle ne s'éloigne pas trop de la mission du Bureau international et des applications pour l'horlogerie. Guillaume est très vigilant sur ce point ; il s'investit dans les recherches relatives à la métrologie et traite bien à part son activité d'ingénieur conseil. Il laisse à Chevenard le soin de compléter ses mesures de dilatabilité en dehors du domaine utile pour le Bureau. À partir de 1920, il lui laisse le rôle d'inventeur d'alliages tout en continuant à lui donner des conseils.

Dans cette relation, chacun apporte à l'autre les méthodes appliquées à son domaine d'activité pour développer une façon inédite de planifier la recherche. Si Chevenard a pu bénéficier des méthodes de la métrologie, il en est de même pour Guillaume qui constate lui-même que les liens tissés avec CFD ont transformé sa façon de faire de la recherche, notamment en se focalisant sur une recherche destinée à aboutir non seulement sur le plan théorique mais également par des applications pratiques tournées, soit vers la société comme la platinite pour les lampes à incandescence, vers une branche de la science comme la géodésie ou encore à destination de l'horlogerie. Guillaume le résume parfaitement en 1925 à l'occasion du discours qu'il prononce en l'honneur d'Henri Fayol à la salle Hoche à Paris :

> *« Lorsqu›on prêche une union de plus en plus intime de la science et de l›industrie, on croit affirmer seulement une chose : c›est que l›industrie a beaucoup à gagner à s›inspirer des méthodes scientifiques. Mais on omet la contrepartie : on oublie de dire que les hommes de science pourraient très utilement s›inspirer des méthodes industrielles.*
>
> *S'il y a, dans l'industrie, dix pas à faire pour mettre au point une question, et que l'on s'arrête après le neuvième, on n'est pas plus avancé qu'au départ, et on a dépensé de l'argent et du temps. Un industriel ne doit donc entreprendre une étude de fabrication qu'avec la ferme volonté de la pousser jusqu'à son achèvement.*
>
> *Un homme de science n'est pas actionné par la même nécessité ; s'il a fait avancer une question, si peu que ce soit, son rôle reste marqué ; un autre reprendra à l'endroit où il a abandonné la course, fera quelques pas, puis à son tour, transmettra le flambeau. Et cette liberté de ne pas aller jusqu'au bout, beaucoup d'hommes de science en profitent pour passer, suivant le cours de leur imagination, d'une question à une autre.*
>
> *Ainsi le travail de l'homme de science a quelque chose qui rappelle parfois le vol du papillon, tandis que le travail industriel doit nécessairement se régler à la manière du vol de l'hirondelle. »*[97]

94 Le centre de recherches est dans l'enceinte de l'usine jusqu'à son installation dans un bâtiment autonome en 1964.

95 Directeur scientifique en 1935, Chevenard conserve un bureau à Imphy jusqu'en 1956.

96 F. DUFFAUT. « Du tandem Henri Fayol - Pierre Chevenard au duo Pierre-Marie Fourt et Jean Morlet, la recherche au cœur de la stratégie de l'entreprise à Imphy », M. BERTILORENZI, J-Ph. PASSAQUI et A-F. GARÇON (dir.), *Entre technique et gestion*, 2014, p. 325-334.

97 Discours de Charles-Édouard Guillaume, prononcé le dimanche 7 juin 1925 à Paris, salle Hoche, reproduit dans les Annales de l'École des Mines : http://www.annales.org/site/archives/x/ceguillaume.html .

Leur volonté commune d'organiser en « doctrine » les résultats de l'expérience

Fayol directeur de la mine de Commentry, puis directeur général de Commentry-Fourchambault transforme ses expériences de terrain en règles de conduite. Les deux règles principales sont d'une part l'unicité et la permanence du commandement et d'autre part l'émission et la circulation rapides d'une information de qualité. L'unicité de commandement s'exprime dans des organigrammes clairs et sa permanence dans le fait qu'en cas d'absence du responsable, la personne qui doit agir à sa place est clairement désignée. Fayol demande à ses collaborateurs des rapports (hebdomadaires, mensuels le 24 du mois et annuels le 15 novembre). Dans certaines périodes critiques, un sujet peut même justifier un rapport quotidien. Un événement grave doit donner lieu à une dépêche succincte dans l'heure, puis à une détaillée dans les trois heures. Aux directeurs d'usine qui se plaignent du temps passé à la rédaction des rapports, il répond que les chiffres leur sont fournis par les comptables et qu'eux doivent se consacrer aux commentaires, aux explications et aux mesures prises ou à prendre[98].

C'est seulement en 1916, à 75 ans et bientôt retiré de la direction de CFD, que Fayol publie son célèbre ouvrage « Administration industrielle et générale[99] » qui expose ses vues sur la gestion des organisations. La doctrine administrative qu'il expose est manifestement une mise en forme systématique des pratiques qui lui ont réussi dans sa carrière de chef d'entreprise. À côté des règles déjà mentionnées, Fayol définit l'architecture souhaitable pour les diverses fonctions de l'entreprise et affirme la singularité de la fonction de direction générale. Il insiste sur la nécessité d'élaborer des plans d'action. Adaptés au fur et à mesure de leur déroulement, ils seront des outils de pilotage à travers les inévitables imprévus.

Marqué par la lecture de Claude Bernard, Fayol affirme appliquer la méthode expérimentale. Son point de départ est toujours l'observation des faits, soit directement par lui-même, soit via les rapports qu'il sollicite. Il les étudie à la lumière de ses nombreuses lectures et en déduit peu à peu les éléments de sa doctrine. Bernard Guy observe cependant que Fayol, s'il part bien de l'observation des faits, ne pratique pas exactement une démarche par formulation d'une hypothèse et confrontation de celle-ci avec les faits. Sa démarche est plus inductive qu'hypothético déductive[100].

Aussi bien pour les mesures de longueurs que pour la mesure du temps, Guillaume fait périodiquement un point d'étape dans des articles spécialisés plus conséquents qui présentent les résultats obtenus. Concernant ses recherches sur les alliages, il consacre plusieurs mémoires aux propriétés des aciers au nickel et à leurs applications pour les mesures des bases, la géodésie, l'horlogerie ou la chronométrie[101]. Sa conférence donnée à l'occasion du Prix Nobel lui permet de faire une synthèse de l'ensemble de ses travaux. Guillaume relit et commente les différents mémoires que Chevenard publie et inversement. Quand il est invité à présenter ses recherches sur les métaux à l'École des Mines de Saint-Étienne, Guillaume prend conseil auprès de Chevenard pour le contenu de son texte et les thèmes abordés.

98 Fayol distingue ainsi la comptabilité et le contrôle de gestion.

99 Fayol annonce quatre parties : Nécessité et possibilité d'un enseignement administratif ; Principes et éléments d'administration ; Observations et expériences personnelles ; Leçons de la guerre. La publication de 1916 ne contient que les deux premières. La troisième sera retrouvée et publiée par Jean-Louis Peaucelle, la quatrième semble être restée à l'état de notes préparatoires.

100 B. GUY : « Henri Fayol et la géologie », M. BERTILORENZI, N. DUBRUC et J-PH. PASSAQUI (dir.), *Henri Fayol, les multiples facettes d'un manager*, Paris, Presses des Mines, 2019.

101 Voir en particulier, C-Éd. GUILLAUME, « Les applications des aciers au nickel avec un appendice sur la théorie des aciers au nickel », Paris, Gauthier-Villars, 1904, C-Éd. GUILLAUME, « Les Applications des aciers au nickel à la chronométrie », J. Phys. Theor. Appl., 1904, 3 (1), p.273-281 ; C-Éd. GUILLAUME, J-R. BENOIT, Les nouveaux appareils pour la mesure rapide des bases géodésiques, Paris, Gauthier-Villars, 1906 ; ou encore C-Éd. GUILAUME, « Recherches métrologiques sur les aciers au nickel », Paris, Gauthier-Villars & Cie, Tome XVII (Travaux et Mémoires du Comité international des poids et mesures), 1927.

En 1923, Chevenard expose sa doctrine en matière d'appareils de mesure[102]. Puis, en 1932, comment doit être organisé un laboratoire de recherche et comment son personnel doit être choisi et formé[103]. Périodiquement, il rassemble ses résultats concernant un même thème dans des articles de synthèse qui constituent les chapitres d'une sorte de « bible[104] » sur les propriétés des alliages de fer et de nickel.

Dans sa démarche de mise au point d'alliages, Chevenard distingue clairement deux niveaux de connaissances : le premier résulte directement de la mesure des propriétés mais le second n'est atteint que lorsque les mécanismes structuraux qui gouvernent les propriétés désirées sont identifiés. Le premier niveau relève encore de la « recette », le second mérite pleinement d'être intégré à la « doctrine » et comme Chevenard le déclare, à l'occasion du centenaire d'Henri Fayol, « seule la doctrine éclaire la recette »[105]. La métallographie de l'époque ne permettant pas de visualiser les évolutions structurales des alliages Fe-Ni-Cr, c'est à partir des « accidents » qu'il observe sur les enregistrements de certaines propriétés, dilatation et magnétisme en particulier, que Chevenard formule des hypothèses de mécanismes. C'est le cas pour l'étalement du point de Curie associé à la croissance des carbures ; c'est également le cas pour la contraction provoquée par la précipitation d'un composé riche en aluminium.

Leur création commune de la « métallurgie de précision »

Guillaume parle de « métallurgie quantitative » quand, effectivement, il quantifie l'effet des éléments d'addition sur la position et l'ampleur de l'anomalie. Pour mener à bien cette quantification, il demande à l'aciériste qui lui fournit les alliages d'étude des teneurs en éléments autres que le fer et le nickel échelonnées et connues avec précision. En réponse, l'aciériste met au point des procédures plus rigoureuses pour respecter les analyses visées et le laboratoire affine ses méthodes d'analyse pour gagner au moins une décimale. Ce gain de précision est rendu nécessaire par le fait que la position et l'intensité de l'anomalie de dilatabilité sont modifiées par de toutes petites variations de composition. C'est ainsi que prend naissance la métallurgie de précision évoquée par Guillaume dans son discours Nobel et la capacité de l'usine d'Imphy d'en respecter les exigences.

Quand, en 1912, Fayol définit sa mission à Chevenard, il appelle de ses vœux une métallurgie nouvelle qui proposera des réponses finement adaptées aux besoins que les industries naissantes ne vont pas manquer de formuler en matière de matériaux.

C'est dans les termes choisis par Guillaume que Chevenard décrit pendant plusieurs années la métallurgie de précision. Le terme de précision est très fortement attaché au champ lexical de la mesure. C'est même le marqueur et la finalité de l'activité du métrologiste. Guillaume, comme nombre de ses contemporains, a l'obsession de la précision ; la recherche de la précision ultime est un marqueur de la fin du XIX^{e} et du premier quart du XX^{e} siècle. Cette obsession de la précision se retrouve dans la fabrication des instruments, la volonté de mesurer des phénomènes en les quantifiant et avec une précision toujours plus fine. Il l'indique en ces termes :

> *« Si l'on examine, en effet, l'origine de toutes les révolutions scientifiques, depuis la découverte de la loi de la chute des corps jusqu'à l'édification de la relativité, on voit qu'elles ont pour point de départ une mesure faite avec toute la précision que leur époque permettait d'atteindre, et je me suis persuadé que rien n'est définitivement plus fécond en science que le gain d'une décimale. »*[106]

C'est seulement en 1938 que Chevenard donne à la métallurgie de précision, comme exposé dans la première partie, le sens d'une méthode pour innover ; méthode qu'il pratique lui-même depuis de longues années. Une fois la cible bien décrite en termes de propriétés que l'alliage doit posséder, le recours à la « bible » évoquée ci-dessus permet de circonscrire le domaine de composition où rechercher la solution par l'élaboration et la mesure d'un nombre réduit d'alliages d'essai. Cette méthode d'application générale peut sembler relever du simple bon sens si

102 P. CHEVENARD, « Méthodes de recherche et de contrôle dans la métallurgie de précision ». *Mémoires et comptes rendus des travaux de la société des ingénieurs civils de France*, juillet – septembre 1923.

103 P. CHEVENARD, « L'installation et l'organisation d'un laboratoire sidérurgique moderne ». *Mémoires et comptes rendus des travaux de la société des ingénieurs civils de France*, 1932, p. 1109 à 1158.

104 Les publications de Chevenard sont rassemblées en trois gros volumes qui sont une des pièces maîtresses de la bibliothèque du Centre de recherches d'Imphy.

105 Allocution de Chevenard dans « Le centenaire d'Henri Fayol », *Revue de l'Industrie Minérale*, Mars-Avril 1942.

106 Archives MIH, la Chaux-de-Fonds, Fonds Charles-Édouard Guillaume document CEG-32.9, C-Éd. GUILLAUME, « Esquisse de ma vie », l'Université de Paris, n° 230, mai 1921.

on la réduit à bien définir le problème à résoudre puis à mobiliser l'ensemble des connaissances antérieures pour rechercher la solution. Son originalité réside dans l'effort continu pour que les connaissances nouvellement acquises en maîtrise des propriétés viennent enrichir la doctrine et dans la compréhension fine du besoin à satisfaire et sa traduction en une combinaison de ces mêmes propriétés.

Leur volonté de transmettre et de former

Comme le montre le tableau, Fayol, Guillaume et Chevenard partagent la volonté de faire connaître leurs résultats, de promouvoir les convictions issues de leur expérience et de former leurs élèves et collaborateurs. Ils utilisent dans ce but des canaux adaptés aux différents publics visés.

	Vers le monde scientifique	Vers les décideurs	Vers le grand public	Vers les étudiants et les jeunes	Vers leurs collaborateurs
FAYOL	Théorie des deltas. Mécanisme de combustion de la houille. Relation avec le Muséum national d'histoire naturelle. Soutien de publications scientifiques. Accueil du Congrès international de géologie en 1900.	Publication de l'ouvrage « Administration industrielle et générale ». Critique des modes de fonctionnement des établissements et des services publics ; l'incapacité industrielle de l'État : les PTT		Conseils de perfectionnement Mines de Saint Etienne et CNAM. Centre d'études administratives.	Cours de base à Commentry. Formation de ses directeurs et chefs de service (réunions, rapports). Impulsion en faveur des recherches scientifiques et techniques
GUILLAUME	CR Acad Sc. *Archives* de Genève. Synthèses dans des revues scientifiques spécialisées. Travaux et Mémoires du Bureau international des poids et mesures. Membre de sociétés savantes. Académie des sciences.	Cercle Autour du Monde d'Albert Kahn. Conseil d'administration de l'Air Liquide Monte un consortium pour le développement des travaux à destination de l'horlogerie Développe un partenariat avec la Fabrique des Spiraux Réunis	Livre « Initiation à la mécanique » Hachette, Paris, première édition, 1909. Articles dans des revues de vulgarisation scientifique.	Visiteurs du BIPM. Jeunes voisins en Suisse. Conférence à l'Université de Paris et devant les élèves de l'École des Mines de Saint-Étienne. École d'horlogerie en Suisse	Formation des aides, des assistants et des adjoints (Albert Bonhoure, Charles Volet). Formation des jeunes-filles de l'EN Sèvres engagées en renfort pour effectuer des travaux de calcul et de calibration.
CHEVENARD	Très nombreuses publications : CR Acad Sc. et synthèses régulières dans des revues scientifiques spécialisées. Membre et président de sociétés savantes. Académie des sciences	Promotion de la recherche dans l'industrie (dans ses discours et certains de ses articles). Membre du comité national de la recherche scientifique.	Publie dans *La Nature* un long article en deux parties (n° 2382 et 2383, des 22 et 29 novembre 1919).	Elèves de l'École des Mines de Saint Etienne, puis de l'École des Mines de Paris.	Formation des agents de son laboratoire. Formation de l'ensemble du personnel d'Imphy.

Fayol est membre actif du conseil de perfectionnement de l'École de mines de Saint Étienne et de celui du Conservatoire National des Arts et Métiers. Il propose de réduire la part des mathématiques dans l'enseignement dispensé aux élèves ingénieurs, son argument étant que beaucoup n'utiliseront que la règle de trois dans leur carrière et qu'il vaudrait mieux consacrer le temps libéré aux sciences humaines et à la gestion. On lui rétorque que les mathématiques ont, avant tout, un but pédagogique de formation à la rigueur ; des cours d'économie industrielle seront cependant introduits dans les programmes des écoles des mines au début des années 1900.

Cette contestation des mathématiques explique pour une bonne part l'hostilité de la « famille polytechnicienne[107] » et son opposition à l'entrée de Fayol à l'Académie des sciences. Quand Fayol y pose sa candidature en 1918, c'est Henry Le Chatelier qui anime la commission chargée du vote. Les trois postes vacants sont attribués à des polytechniciens et Fayol n'obtient aucune voix[108].

Pour enseigner et promouvoir ses idées, Fayol crée en 1917 le Centre d'études administratives dont il préside chaque semaine les débats. Il retrouve ainsi dans ses dernières années le rôle d'enseignant qu'il a pratiqué au début de sa carrière auprès de ses « élèves » de Commentry.

Ce qui est marquant chez Fayol, c'est son refus du découpage des disciplines et son appel, au contraire, à toutes celles qui peuvent contribuer à` résoudre le problème posé. Il est bien lui-même le prototype de l'ingénieur généraliste dont il fait la promotion dans l'enseignement.

On note que c'est à un tout jeune homme qu'il accorde sa confiance quand il définit sa mission à Chevenard et lui donne les moyens de se constituer un laboratoire bien équipé. Cette confiance en la jeunesse lui vient peut-être de ce que lui-même a bénéficié très tôt de celle de Stéphane Mony (1800-1884) qui le fait nommer directeur de la mine de Commentry à 25 ans[109]. Ses notes personnelles montrent également sa satisfaction lorsque des cadres anciens sont remplacés par des jeunes[110].

Guillaume et Chevenard publient systématiquement les résultats de leurs travaux. Ils utilisent tous deux la voie des comptes rendus à l'Académie des sciences pour prendre date avec la communauté scientifique nationale, puis rédigent des articles plus construits qu'ils publient dans diverses revues. Guillaume participe régulièrement aux séances hebdomadaires du Bureau des longitudes pour y exposer ses recherches[111].

Guillaume publie ainsi régulièrement dans des grandes revues internationales comme *Nature*[112] destinées à ses pairs et tout autant dans des revues dites de vulgarisation comme *La Nature* pour diffuser ses avancées aussi auprès d'une audience plus large. Dès les premières années qui suivent son arrivée au BIPM, il contribue à *La Nature* où il publie de très nombreux articles sur des sujets variés, allant de la température de l'espace aux radiations cosmiques, en passant par la géodésie, l'horlogerie ou encore le Système métrique. Les Travaux et Mémoires du BIPM lui permettent également de rendre compte des résultats de ses recherches auprès de la communauté scientifique internationale.

Guillaume est attaché à la transmission par le biais de la diffusion des connaissances auprès du grand public. Homme de son temps, il est, de même qu'Adolphe Hirsch (1830-1901), son maître, profondément animé par l'idée que la science est la flèche du progrès et permet une transformation déterminante et positive du monde. Guillaume n'aura jamais d'activité d'enseignement (bien qu'une proposition qu'il déclinera lui sera faite en 1899 pour occuper la chaire de physique à l'Université de Genève[113]), mais son goût pour la transmission est relevé par Aimé Cotton (1869-1951) qui se souvient de sa rencontre

107 Qui préfère promouvoir les idées de l'ingénieur américain Frederick Winslow Taylor (1856-1915).

108 O. HENRY, « Un entrepreneur de réforme de l'État : Henri Fayol (1841-1925) », *Actes de la recherche en sciences sociales*, 2012/3 (n° 193), p. 38-55. DOI : 10.3917/arss.193.0038. URL : https://www.cairn.info/revue-actes-de-la-recherche-en-sciences-sociales-2012-3-page-38.htm.

109 J-Ph. PASSAQUI, « La mine de Commentry, une étape décisive dans l'édification des principes gestionnaires et administratifs d'Henri Fayol », M. BERTILORENZI, N. DUBRUC et J-Ph. PASSAQUI (dir.), *Henri Fayol, les multiples facettes d'un manager*, Paris, Presses des Mines, 2019, p. 33 à 70.

110 Noté par Maurice de Longevialle dans le chapitre consacré à Fayol dans le livre dit « du centenaire ».

111 Guillaume intervient très régulièrement au Bureau des longitudes, son nom apparaît une centaine de fois dans les procès-verbaux du Bureau des longitudes. Voir les procès-verbaux des séances hebdomadaires du Bureau des longitudes (1795-1932), un patrimoine numérisé : http://bdl.ahp-numerique.fr/.

112 La célèbre revue scientifique consacre à Guillaume un article après son décès, « Dr. C.-E. Guillaume ». *Nature* 142, 1938, p. 322–323. https://doi.org/10.1038/142322a0

113 Procès-verbaux des séances du Comité international des poids et mesures, 1900, p. 8-9.

avec Guillaume à l'occasion d'une visite du BIPM alors qu'il enseigne à l'École normale supérieure :

« C'est à cette époque, je m'en souviens, que j'ai été moi-même pour la première fois en relation avec Ch.-E. Guillaume, qui devait bientôt m'honorer d'une amitié qu'il n'a cessé de me témoigner. C'était à l'occasion d'une visite des élèves de l'École Normale au Pavillon de Breteuil. Les physiciens du Bureau réservaient toujours un excellent accueil à ces élèves ainsi qu'à ceux de l'École Normale Supérieure de Sèvres[114]*. Sans doute avaient-ils à cœur de montrer à ces jeunes gens qui se destinaient à l'enseignement, l'importance de l'effort accompli au Bureau pour la diffusion du Système métrique. Mais ils voulaient détruire ce préjugé d'après lequel les mesures de métrologie sont monotones, d'un ordre inférieur et moins intéressantes que des travaux sur des questions nouvelles. [...] Avec une patience inlassable, Ch.-E. Guillaume, comme MM. Benoît et Chappuis, les initiaient à l'emploi des divers instruments servant au travail journalier du Bureau, et à leurs propres recherches. Ils leur montraient aussi ceux qui avaient servi à la mesure déjà célèbre alors du mètre en longueurs d'ondes faite par Michelson*[115] *et Benoît. »*[116]

Au BIPM, Guillaume se voit confier la tâche de former les jeunes femmes issues de l'École normale supérieure de Sèvres, employées à partir de 1884 comme calculatrices. Elles sont une main d'œuvre peu coûteuse et non négligeable dans une période où le personnel est constitué d'un directeur, deux adjoints, quatre aides et un mécanicien. Elles sont essentiellement, dans un premier temps, affectées à la calibration de la centaine de thermomètres Tonnelot destinés à être livrés avec les mètres prototypes ou utilisés avec les comparateurs[117].

Guillaume montre tout au long de sa vie une volonté de faire partager le goût de la science aux jeunes générations comme en témoigne l'ouvrage intitulé « Initiation à la mécanique » qui paraît en 1909[118] et dont le sous-titre est « Ouvrage étranger à tout programme dédié aux amis de l'enfance ». Le livre commence par une citation d'Anatole France (1844-1924) :

« Montrons en peu de mots les grands objets d'une science ; Marquez-en les résultats par quelques exemples frappants... Ne vous flattez pas d'enseigner un grand nombre de choses. Excitez seulement la curiosité. Contents d'ouvrir les esprits, ne les surchargez point. Mettez-y l'étincelle. D'eux-mêmes ils s'éprendront par l'endroit où ils sont inflammables. »[119]

Dans la série d'hommages qui lui sont rendus à son décès, un ami de son fils, voisin de la maison familiale à Fleurier, explique le goût du physicien pour la transmission en direction des jeunes générations :

« On ne peut avoir aucune idée, si on ne l'a pas éprouvée soi-même de la bonté qu'il témoignait aux jeunes, se mettant à leur niveau, leur apprenant quantité de choses de façon amusante et attrayante. Nous ne nous lassions pas de l'écouter. Il avait une manière bien à lui – parce qu'il avait un esprit extraordinairement clair – d'exposer les problèmes les plus compliqués avec une telle simplicité, une telle limpidité, qu'on avait l'impression de les avoir toujours connus. L'entendre parler science ou histoire était, pour nous adolescents, un divertissement[120]*. »*

Après l'obtention de son Prix Nobel, c'est devant l'Association générale des étudiants de l'Université de Paris que Guillaume choisit de faire une longue conférence sur la métrologie et ses aspects généraux,

114 L'école est située à une centaine de mètres du Pavillon de Breteuil. Marie Curie y enseigne entre 1900 et 1906, elle très liée, avec son époux Pierre Curie, à Ch.-É. Guillaume.

115 Alfred Michelson (1852-1931) effectue au Bureau international la première détermination de la valeur du mètre en longueur d'onde de la raie rouge du cadmium en 1892-1893. Les résultats de ces mesures sont publiés dans le tome XI des Travaux et Mémoires du Bureau international des poids et mesures en 1895.

116 Discours d'Aimé Cotton à l'occasion des funérailles de Charles-Édouard Guillaume. Voir également la Notice nécrologique de Charles-Édouard Guillaume rédigée par Aimé Cotton et lue le 20 juin 1938 publiée dans les Comptes rendus de l'Académie des sciences, tome 206, p.1841-1844.

117 C. FELLAG ARIOUET. « Les acteurs du Bureau international des poids et mesures dans les procès-verbaux du Bureau des longitudes », 2022. Parmi les premières calculatrices, figure Jeanne Taufflieb, sœur d'Émilie Marie Anne Taufflieb (1860-1952) qui épouse C.-Éd. Guillaume le 31 octobre 1888.

118 C-Éd. GUILLAUME, Initiation à la mécanique, Hachette, Paris, 1909.

119 Est-ce un hasard si Guillaume choisit cette citation d'Anatole France ? En effet, après avoir refusé de donner son opinion sur la culpabilité de Dreyfus, celui-ci est l'un des deux premiers avec Zola (et l'un des très rares Académiciens) à signer la première pétition « des intellectuels » après la publication de J'accuse en janvier 1898. Soutien d'Émile Zola, il refuse de siéger à l'Académie française où il a été élu en 1896, de 1900 à 1916.

120 Archives du Musée international de l'horlogerie, MIH, La Chaux de Fonds.

le 9 mars 1922. Son intervention a pour objectif de faire découvrir la métrologie aux étudiants qui sont déjà engagés dans des études scientifiques. Il conclut son discours par cette phrase :

« En vous adonnant à l'étude, vous avez voulu, mes chers jeunes camarades, consacrer votre vie à la recherche de la vérité, sentant que la plus grande grâce donnée à l'homme est de pouvoir l'aimer passionnément ; même si elle doit être toujours fuyante, même si comme un mirage, elle s'échappe lorsque nous étendons la main pour la saisir, nous voulons aller vers elle, sentant dans cette incessante poursuite, s'accomplir l'idéal auquel nous sommes voués. Nous devons aimer la science, qui nous donne des moyens de marcher sans cesse vers la vérité ; aucune ne nous rapproche autant que la métrologie ; et je voudrais penser, si je n'ai point été trop inférieur à la tâche, que, des moments passés ensemble, demeurera dans votre esprit un peu d'affection pour la science. »[121]

De son côté, c'est dès 1919 que Chevenard occupe la chaire de métallurgie de l'École des Mines de Saint-Étienne et y crée un laboratoire dont est issu l'actuel laboratoire de science des matériaux. Très attaché à cette mission d'enseignement, il imagine en particulier des petits appareils destinés à rendre immédiatement compréhensibles des phénomènes aussi énigmatiques que le pouvoir thermoélectrique ou la transition de ferro à paramagnétique[122]. C'est l'ensemble de ces activités de recherche et d'enseignement qui a contribué à construire la notoriété de Chevenard comme fabricant d'instruments de précision.

On peut penser qu'il fait forte impression à ses élèves quand on relève que près de 300 de ses anciens élèves ont participé en 1946 à la souscription pour son épée d'académicien.

Comment s'en étonner quand on voit que lors de sa remise d'épée, il conclut son discours en disant :

« J'aime tant les jeunes, mes élèves, que je voudrais les voir partager les joies vigoureuses de connaître, de créer, de servir ».

Affirmant que « la partie la plus essentielle d'une lunette est l'œil placée derrière l'oculaire », Chevenard choisit avec soin ses agents de laboratoire et veille à leur formation. Il explique ainsi :

« À leur entrée au laboratoire, les manipulateurs ne possèdent, pour la plupart, qu'une instruction primaire. La sélection est basée sur la valeur morale, l'intelligence, les succès scolaires, l'attrait pour le travail précis ; quelques-uns ont même une véritable vocation expérimentale. Leur formation est un problème d'une importance capitale : En même temps qu'on leur apprend à manipuler, on cherche à combler les lacunes de leur formation générale. On leur donne de véritables leçons de mathématiques, de mécanique, de physique, de chimie ; on leur procure des livres et on guide leurs lectures ; on les encourage à suivre des cours par correspondance. Chacune des nouvelles techniques d'essai est l'occasion d'explications détaillées : but de la mesure, principe de la méthode, mécanisme de l'appareil, causes d'erreur et précautions, conduite des calculs, construction des diagrammes, etc... »[123]

Plus largement, Chevenard est le promoteur et l'acteur d'une formation permanente technique de l'ensemble du personnel de l'usine. Lors de la remise de son épée d'académicien, le PDG de la société déclare :

« Recherchant sans cesse l'amélioration du sort des travailleurs par le perfectionnement de leurs qualités techniques, vous avez été l'instigateur des cours complémentaires qui facilitent le recrutement de nos cadres et l'accession de notre personnel ouvrier et employé à des postes de commandement ».

Chevenard était, comme Guillaume[124], membre de nombreuses sociétés savantes françaises et étrangères. Il a présidé la Société française de Physique, l'Association technique de la Fonderie, la Société Française de Métallurgie, la Société des

121 Discours prononcé à l'Université de Paris le 9 mars 1922, publié dans le Supplément scientifique de l'Université de Paris, Archives MIH.

122 Réf. 40 ci-dessus.

123 P. CHEVENARD, « L'installation et l'organisation d'un laboratoire sidérurgique moderne, » *Mémoires et comptes rendus des travaux de la Société des Ingénieurs civils de France*, 1932, p. 1109 à 1158. Article reproduit sous la référence suivante : J-Ph. PASSAQUI, « Textes choisis présentant la démarche scientifique de Pierre Chevenard », *Le Marteau Pilon*, tome XXI, juillet 2010, p. 67 à 88.

124 Guillaume et Chevenard ont été tous deux membres de l'Académie des sciences, de la Société française de Physique et de la Société Astronomique de France.

Ingénieurs civils de France, la Société Française de Minéralogie, la Société Astronomique de France.

Leurs relations d'estime et d'amitié

Lors de leur première rencontre en 1896, Fayol accorde d'emblée sa confiance à Guillaume en lui apportant son soutien pour mettre en œuvre ses recherches. Est-ce la raison pour laquelle durant toute sa carrière, Guillaume restera attaché à CFD ? S'il est difficile de répondre à cette question, on peut néanmoins émettre l'hypothèse que les relations personnelles entre nos trois acteurs contribuent notablement à la réussite de leur entreprise. La correspondance entre Guillaume et Chevenard conservée au Bureau international des poids et mesures constitue un corpus d'un peu plus de deux-cents lettres. À cela s'ajoutent les lettres adressées à la direction de la Société CFD qui représentent environ six cents lettres. Ces correspondances concernent autant des commandes, des échanges sur les développements à faire, des visites que des considérations plus personnelles.

Ces correspondances montrent d'une part une relation de profonde estime à l'égard de Fayol avec lequel Guillaume a tissé des liens au fil des années comme en témoigne cette lettre datée du 29 juin 1925 :

> *« Vous me rendez un peu de courage en me disant que j'ai fait un grand plaisir à vous-même et aux anciens camarades de Saint-Étienne. Je n'étais pas très content de moi. La veille, l'enterrement de Flammarion avec qui j'étais très lié m'avait attristé. Quand j'ai regardé M. Fayol qui m'a paru très ému, l'émotion m'a gagné. »*[125]

Dès 1912, l'attention de Guillaume est attirée sur les premiers travaux de Chevenard par Pierre Girin. Guillaume évoque directement Chevenard pour la première fois dans une lettre en date du 29 avril 1914[126] dans laquelle il écrit à l'attention de Fayol :

> *« Le programme dressé par M. Chevenard est extrêmement intéressant. Il devrait être étendu aux aciers au manganèse dont on possède des échantillons, et qui fourniront des indications peut-être encore plus importantes. »*

L'année 1914 marque le début d'une relation étroite entre Chevenard et Guillaume comme le montre cette lettre que le métrologiste lui adresse le 16 juillet 1914 :

> *« Votre si gentille lettre m'a charmé. Croyez-le c'est une vraie joie pour moi de vous aider au début de votre carrière scientifique. Tout m'y convie : votre enthousiasme, votre ardeur au travail, la perspicacité que vous mettez dans vos investigations, la communauté de nos recherches et de nos pensées qui établissent entre nous un lien intime de fructueuse collaboration. Partant de points de vue bien distincts, nous attaquons les mêmes problèmes par des faces différentes, afin de nous en rendre maîtres ; mais c'est une bien grande satisfaction pour moi de vous aider par une plus vieille expérience à franchir les étapes que votre jeunesse et votre isolement rendraient plus pénibles. »*[127]

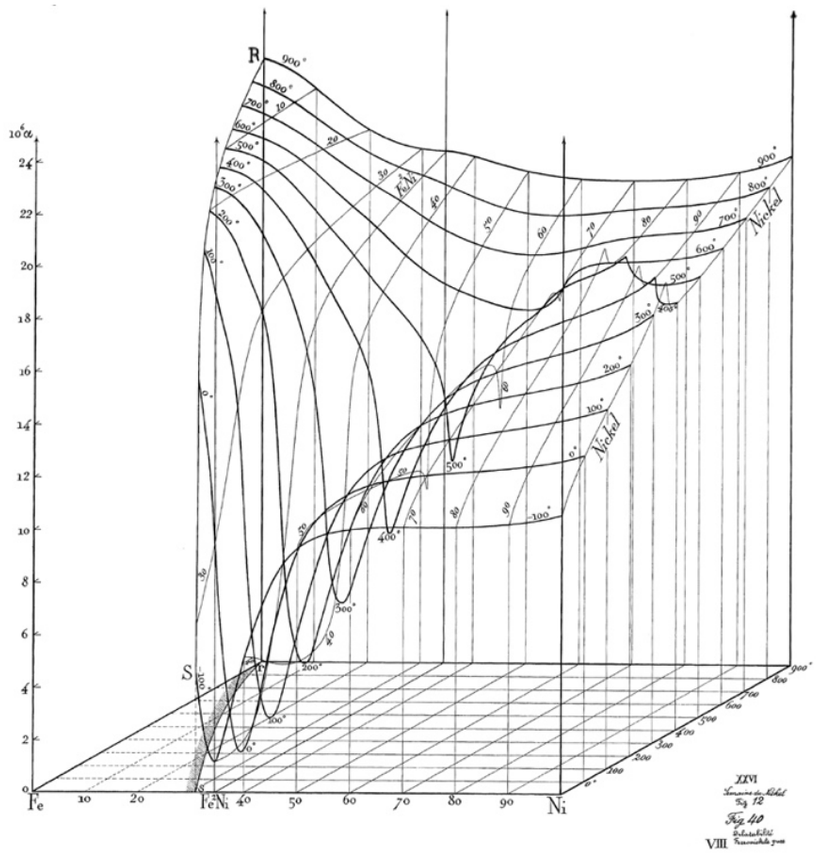
Les conseils de Guillaume sont particulièrement importants au début de la carrière de Chevenard car, comme il l'indique dans cette lettre, il rompt l'isolement de Chevenard qui, à Imphy, doit assumer seul la charge et le développement d'une recherche nouvelle et la mise en place d'une infrastructure. Guillaume, de vingt-sept ans son aîné, est son guide et son interlocuteur privilégié. Les travaux de Chevenard qui poursuivent et complètent ceux de Guillaume sont publiés avec une préface de ce dernier. C'est le cas des deux articles de synthèse publiés en 1927 et 1929, le premier intitulé « Recherches expérimentales sur les alliages de fer, de nickel et de chrome » et le second « Analyse dilatométrique des matériaux »[128].

125 Lettre de Charles-Édouard Guillaume adressée à Pierre Chevenard le 29 juin 1925, archives BIPM. Camille Flammarion, ami intime de Guillaume décède à Juvisy-sur-Orge le 3 juin 1925.

126 Lettre en date du 29 avril 1914 (n° 445), Archives BIPM.

127 Lettre de Charles-Édouard Guillaume adressée à Pierre Chevenard le 16 juillet 1914, Archives BIPM.

128 P. CHEVENARD : « Recherches expérimentales sur les alliages de fer, de nickel et de chrome ». Libraire du bureau international des poids et mesure. Extrait du tome XVII, 1927, p. 1 à 144 et Analyse dilatométrique des matériaux, p. 1 à 79. Edition DUNOD (1929).



Dilatation des alliages Fe-Ni-Cr.

Guillaume est impressionné par la qualité des travaux de Chevenard. Il lui donne des indications sur les orientations des recherches tout en rendant compte des résultats de ses propres mesures sur les échantillons des coulées que lui fait parvenir Chevenard ou qu'il demande directement à Imphy. Autour de ce travail au long cours qui ne prendra fin qu'au départ de Guillaume du BIPM en 1936, la relation du maître au disciple laisse place à une véritable amitié.

L'évolution est double : D'abord élève attentif de Guillaume, Chevenard s'affirme progressivement comme chercheur / inventeur autonome, collaborant avec son maître mais développant également ses propres recherches. Guillaume, d'abord séduit par ce brillant disciple, traite Chevenard de plus en plus en égal ; leur amitié s'affirme et se transforme peu à peu. De nombreuses lettres témoignent de l'affection que Guillaume porte à Chevenard, d'autant que Guillaume retrouve dans la vie de Chevenard des événements qu'il a lui-même vécus, que cela concerne les enfants (il est question de François le fils de Chevenard qui ne mange pas assez) ou de la santé de l'un et de l'autre. Guillaume partage avec Chevenard son expérience de père de famille, s'intéresse à ses enfants.

Dans « l'adresse remise à Charles-Édouard Guillaume le 23 janvier 1937 [129]», Chevenard conclut ainsi le chapitre consacré à son œuvre métallurgique :

> *« Guide clairvoyant, désintéressé, d'une exquise bienveillance, il a su agir envers son disciple de telle sorte que celui-ci, selon le mot de Descartes " lui sache gré non seulement des choses qu'il a expliquées, mais aussi de celles qu'il a omises volontairement afin de lui laisser le plaisir de les inventer ". C'est pourquoi j'ai voulu montrer en Ch.-Ed. GUILLAUME non seulement l'observateur habile, le réalisateur ingénieux et*

129 « La vie et l'œuvre de Charles-Édouard Guillaume », Juin 1937. Le chapitre consacré à l'œuvre métallurgique de Guillaume comporte également une évocation par Portevin des travaux de Guillaume sur les aciers trempés pour calibres et étalons utilisés en contrôle industriel. Ce sujet préoccupera Guillaume encore après sa retraite du BIPM, comme en témoigne la dizaine de lettres à Chevenard évoquant les aciers au chrome CCR entre 1932 et 1935.

tenace, le savant dont les travaux ont marqué d'une empreinte vigoureuse la science et la métallurgie, mais aussi le Maître auquel m'unissent les liens d'une profonde gratitude ».

Guillaume a traversé des problèmes de santé identiques à ceux qui affectent Chevenard en raison de la charge de travail importante. Il évoque dans une dizaine de lettres l'impact de l'important surmenage sur sa santé comme dans cette lettre du 14 septembre 1923 :

« C'est avec un grand plaisir que j'ai appris l'amélioration de votre santé ; l'avenir vous paraissait, alors, moins sombre, votre sommeil était raisonnable et votre appétit ; vous aviez moins de palpitations. Les symptômes que vous avez observés chez vous ont été aussi les miens pendant un certain temps. Serait-ce le sort de ceux qui s'occupent des aciers au nickel ? Si tel était le cas, il faudrait s'en garer. Nous avons tous les deux largement dépassé la limite élastique et je l'avais fait déjà à peu près à votre âge. L'an dernier je suis arrivé tout près de la rupture, et maintenant je crois que je serai sage. »[130]

Le 6 septembre 1934, Guillaume parle à nouveau de leurs santés respectives et donne à Chevenard des nouvelles de ses enfants et petits-enfants. On note qu'il demande à Chevenard où en est son étude de l'intérêt pour les spiraux de l'ajout d'aluminium[131].

Guillaume et Chevenard s'aident mutuellement pour la production des rapports et conférences qui intéressent leur recherche commune. Guillaume se réjouit en 1935, lorsque Chevenard vient enseigner à l'École des Mines de Paris, d'avoir l'occasion de le voir plus souvent.

Les dernières lettres conservées par Chevenard sont émouvantes. Celle du 12 juillet 1937 a été dictée à Madame Guillaume qui ajoute ses propres amitiés dans les quelques lignes qu'elle ajoute après la signature malhabile de son mari. Celle du 7 août, écrite par Madame Guillaume à Madame Chevenard, évoque le plaisir qu'a son mari à retrouver ses souvenirs d'enfance et jeunesse dans la maison familiale de Fleurier. Cette relation entre les épouses est le signe de la proximité des deux familles[132].

Après la mort de Guillaume, Chevenard s'intéresse en 1952 au projet de Léopold Defossez, directeur de la Société des Fabriques de Spiraux réunies, d'éditer la correspondance de Guillaume. Le projet ne verra pas le jour mais Chevenard s'impliquera en écrivant à Charles Volet, directeur du BIPM à partir de 1951 et en faisant parvenir à Léopold Defossez[133], une copie des lettres les plus pertinentes de sa volumineuse correspondance avec Guillaume ; un témoignage de leur amitié et de la reconnaissance envers celui qui a orienté et guidé l'activité professionnelle de toute une vie[134].

Conclusion

La collaboration, qui débute en 1896 et se poursuit presque jusqu'au décès de Guillaume, a pour point de départ la découverte d'un alliage aux propriétés inattendues grâce à la mesure de quelques échantillons fournis par Commentry-Fourchambault[135], la société dirigée par Fayol. Dans les années qui suivent, Guillaume invente une dizaine d'alliages que l'usine d'Imphy met à son catalogue pendant que Fayol et Guillaume formalisent leur collaboration. En 1911, Fayol définit à Chevenard, jeune embauché, la mission qui va orienter et remplir sa vie professionnelle. Pour mener sa mission de défricheur d'une nouvelle métallurgie et fort de l'exemple et des conseils de Guillaume, Chevenard entame une carrière de concepteur d'appareils de laboratoire et d'inventeur d'alliages répondant finement à des besoins nouveaux. Poursuivant la métallurgie de précision initiée par Guillaume, il en fait une méthode pour innover toujours pratiquée pour développer les spécialités d'Imphy.

130 Lettre du 14 septembre 1923, Archives BIPM. Guillaume évoque dans cette lettre et dans de nombreuses autres les importants soucis de santé qu'il a rencontrés. En 1922, Guillaume est victime d'une hémorragie cérébrale dont il se remettra mais qui lui impose de réduire drastiquement le niveau de son activité.

131 Il s'agit certainement du durcissement structural du Durinval.

132 Fonds Chevenard aux Archives départementales de la Nièvre, 95 J 32.

133 Lettres de Pierre Chevenard à Louis Defossez 29 août et 26 septembre 1952, CEG-40.1, Musée international de l'Horlogerie, La Chaux-de-Fonds, Suisse.

134 Il serait précieux de retrouver des lettres personnelles de Chevenard à Guillaume. On peut en effet supposer que Chevenard, orphelin de père à trois ans, a pu trouver en Guillaume de 27 ans son aîné, au-delà du « bon maître » qu'il évoque en public, une véritable figure paternelle.

135 17 alliages pour tracer la courbe et son fameux minimum, mais près de 600 au cours de la collaboration.

Fayol, Guillaume et Chevenard, artisans de ce partenariat de plus de vingt-cinq ans, ont connu une très grande notoriété et la reconnaissance de leurs contemporains avant de tomber ensuite assez rapidement dans l'oubli. Les hommages rendus au moment de leur disparition montrent qu'ils sont célébrés par leurs contemporains comme de véritables héros de la science et de l'industrie. Les cérémonies et les hommages rendus à Guillaume au moment de son décès survenu le 13 juin 1938 en fournissent l'illustration :

« Le jeudi 16 juin, un funèbre convoi quittait sa demeure de Sèvres et l'emportait vers la Gare de Lyon où, cœur étreint, plusieurs centaines de savants et d'amis [...] étaient venus rendre les devoirs à notre cher compatriote. Les Autorités fédérales s'étaient associées à ce deuil par la présence du nouveau ministre de Suisse, M. Stucki, entouré des attachés de la légation. Un service d'honneur formé du 23e d'infanterie coloniale, accompagné de la fanfare du régiment, était rangé en carré dans une grande cour voisine de la gare, apportant au moment où le corps de l'illustre savant, haut dignitaire de la légion d'honneur, allait quitter le sol français, l'hommage solennel de son Gouvernement.

Et, c'est aux accents de la Marseillaise, après le seul discours prévu pour la cérémonie de M. Aimé Cotton, Président de l'Institut, suivi de quelques paroles de M. Georges Claude, et des dernières prières dites par M. le pasteur Monod, de Versailles, que le cercueil disparut dans le wagon mortuaire sous d'innombrables couronnes, tandis que s'inclinait le drapeau tricolore, saluant gravement la dépouille glorieuse de ce Suisse si ardemment Français. »[136]

L'impact des résultats qu'ils ont obtenus, la diffusion de leur recherche au sein de multiples réseaux, mais sans doute tout autant une vision commune de leur mission et du rôle de la science et de l'industrie, les ont conduits à dépasser le cadre de leurs fonctions et du domaine de la métrologie ou de la métallurgie. Leur notoriété s'explique aussi par le fait que Fayol, Guillaume et Chevenard sont les concepteurs de méthodes nouvelles qui ont transformé durablement les pratiques et ont de ce fait eu un rayonnement considérable.

Si le NC 4, alliage à 22/23 % de nickel et 2 à 3 % de chrome, mis au point à la demande du Service technique de l'Artillerie, est remarquable pour ses propriétés mécaniques - ductilité et durcissement par travail à froid - la découverte de la très forte anomalie de dilatabilité des compositions autour de 36 % de nickel focalise l'attention sur les propriétés autres que mécaniques. De nombreux alliages utiles pour l'électricité, l'horlogerie, l'industrie du froid, sont très rapidement inventés par Guillaume, fabriqués par l'usine d'Imphy et mis au catalogue de la Société que dirige Fayol. Chemin faisant, Guillaume demande à l'aciériste une précision fortement accrue dans la réussite analytique et la reproductibilité de ses coulées. Dans l'industrie horlogère de sa région natale comme aux Aciéries d'Imphy, Guillaume introduit la méthode scientifique, apporte ses connaissances des théories sur les alliages et la cristallographie, conduit des études systématiques pour scruter les propriétés des métaux et les additions afin de mettre au point les alliages les mieux adaptés.

Fayol décide que la voie ainsi ouverte doit être poursuivie et élargie et confie cette mission à Chevenard qui va y consacrer toute sa vie professionnelle. Guidé par Guillaume et commençant par la mesure de la dilatation, Chevenard construit toute une large gamme d'appareils permettant de mesurer des propriétés pertinentes pour les applications et de remonter aux mécanismes structuraux qui les gouvernent. Utilisant le chrome pour résister à la corrosion, Chevenard revient aux propriétés mécaniques en appliquant aux Fe-Ni-Cr d'abord le durcissement par solution solide[137] et carbures, puis le durcissement structural, ouvrant ainsi la voie aux alliages pour travail à haute température. Dans sa démarche de création d'alliages, Chevenard érige la métallurgie de précision initiée par Guillaume en une véritable méthode pour innover qu'il pratique et illustre bien avant d'en donner une définition.

En conduisant ensemble cette œuvre commune, Fayol, Guillaume et Chevenard, qui appartiennent à trois générations successives, ont affirmé et développé entre eux une communauté de vues et des relations personnelles allant au-delà de simples relations professionnelles : estime et amitié entre Fayol et Guillaume, amitié et affection entre Guillaume et Chevenard. Dans une sorte de cercle vertueux, leurs relations professionnelles et privées ont nourri et stimulé leurs recherches, enrichi leurs méthodes et dynamisé leurs travaux respectifs.

136 *Annales françaises de chronométrie*, 1938.

137 Introduction d'éléments à gros atomes comme le tungstène et le molybdène.

Quelle réalité aujourd'hui pour cette nouvelle métallurgie ?

Pendant de longues années, les alliages inventés par Guillaume n'ont été fabriqués qu'en quantités modestes. L'invar lui-même n'avait comme débouché véritablement industriel que d'être le constituant faiblement dilatable des bilames[138]. L'élinvar était fabriqué en très faible tonnage mais, introduisant Imphy dans l'industrie horlogère, l'a conduit à fabriquer un alliage pour ressorts moteurs, le Phynox, dont la production a permis de constituer un savoir-faire de lamineur de précision.

Dans les années 1960/70, le développement de l'électronique et des circuits intégrés a fait émerger un vaste marché de bandes minces en N42 (Fe + 42 % Ni) à dilatabilité proche de celle des puces en silicium. La téléphonie et la sécurité électrique ont sollicité les propriétés magnétiques des ferronickels, faisant naître de nombreux alliages fonctionnels. L'invar lui-même restait modeste mais ses « enfants » se développaient dans les technologies au service de la vie courante. Le tube cathodique de télévision a utilisé de nombreuses pièces en bilames et en alliages soudables au verre et même, avant d'être détrôné par l'écran plat, un masque d'ombre en invar[139].

C'est cependant la technologie des navires méthaniers à cuves intégrées et membrane plane[140] qui, dans la même période, a provoqué la transformation de l'invar d'alliage métrologique en matériau de l'ingénieur, produit en bandes de grande largeur, formées et soudées pour tapisser les cuves. À raison de plusieurs centaines de tonnes par navire, le matériau a changé d'échelle. Dans le même temps, d'autres applications, comme les outils de forme pour la fabrication en composites d'éléments de voilure d'avions, ont contribué à changer la dimension économique de l'invar. Il représente actuellement 30 % de la production de l'usine : « Nous le vendons sous toutes les formes que nous sommes capables de fabriquer », comme l'indiquait Olivier Benoit, responsable commercial de l'entreprise au Journal du Centre[141] à l'occasion du centenaire de l'attribution du Nobel à Guillaume.

Les appareils Chevenard qui ont longtemps constitué l'équipement de base des laboratoires d'étude des matériaux ont perdu une grande partie de leur intérêt. L'amplification électronique s'est imposée et la microscopie électronique donne une vue directe des transformations structurales.

Si beaucoup des alliages inventés par Chevenard ne sont plus fabriqués, ceux qui ont pris leur place ou naissent aujourd'hui, finement adaptés aux exigences des technologies nouvelles, ont été et sont mis au point grâce à la méthode de la métallurgie de précision. Cette méthode pour innover continue en effet à guider le travail du Centre de recherches qui a pris en 2011, cent ans après les débuts du jeune Chevenard, le nom de « Centre de recherches Pierre Chevenard ». Ce baptême tardif a eu lieu alors que l'usine d'Imphy a réussi à faire évoluer à la fois sa présence commerciale et son outil industriel pour pouvoir se consacrer entièrement aux spécialités[142], champ d'application privilégié de la métallurgie de précision[143].

138 Un bilame est constitué de deux lames de deux alliages ayant des coefficients de dilatation différents. Sa déformation lorsque la température varie permet de mesurer celle-ci ou d'actionner une sécurité.

139 Dans un tube de télévision couleurs, le masque d'ombre est une feuille percée d'une multitude de trous qui sont autant de diaphragmes assurant la focalisation des faisceaux des trois couleurs.

140 Voir par exemple P. JEAN et H. PETIT, *Quand le méthane prend la mer*, Éditions P. Tacussel, 1998.

141 Article de Fanny DELAIRE dans le *Journal du Centre* du 17 octobre 2020.

142 La « spécialité » est définie suite à un dialogue approfondi avec un nombre limité d'utilisateurs. Elle est finement adaptée à leur usage ; producteur et utilisateur ont en quelque sorte partie liée. Elle s'oppose à la « commodité » qu'un cahier des charges international suffit à définir.

143 Même si la Société Métallurgique d'Imphy est connue pour ses spécialités, les aciers spéciaux constituent la majorité de ses activités. Pierre-Marie Fourt développe les spécialités mais l'usine a besoin, et pour encore de longues années, des aciers inoxydables pour assurer son équilibre.

ANNEXE 1 : LE BIPM ACTEUR ESSENTIEL DE LA FABRICATION DES FILS GÉODÉSIQUES

Guillaume n'est pas ici seulement l'inventeur d'un nouvel alliage mais le concepteur d'une méthode qui fait du BIPM le maillon essentiel de la chaîne de fabrication. L'invar est élaboré par l'usine d'Imphy. Les coulées les plus stables sont choisies pour la fabrication des fils géodésiques qui requièrent une dilatabilité la plus faible possible et une stabilité dans le temps. Guillaume lui-même sélectionne les coulées capables de donner ces fils, en effectuant avec les assistants du BIPM qu'il a formés, des mesures de dilatation au comparateur sur des tiges d'un mètre issues des lingots. Seules les tiges présentant une dilatation comprise en 0,8 et 1.10^{-6} sont retenues. L'étirage des lingots permet de réduire encore la dilatabilité[144]. L'étuvage qui stabilise le fil l'accroît légèrement mais dans une certaine limite. Les coulées retenues pour fabriquer du fil géodésique sont alors tréfilées à l'usine d'Imphy. Le fil de diamètre 2 mm obtenu au moyen de filières acier est ensuite tréfilé en filières diamant jusqu'à un diamètre de 1,65 mm, dimension retenue pour les fils géodésiques. Le fil ainsi travaillé présente l'avantage d'avoir une surface lisse et un diamètre uniforme. L'usine d'Imphy livre le fil sous forme de couronnes mesurant de 70 à 80 cm. Les livraisons de 50 à 80 kg de fil permettent de fabriquer de 110 à 180 fils géodésiques de 24 m (24 m est la longueur de la base géodésique du BIPM, c'est aussi un multiple de 4, la longueur de la plupart des règles géodésiques utilisées jusque-là étant de 4 m).

La mesure des fils s'effectue au BIPM par comparaison avec une série de douze fils étalon. Ces douze fils étalon sont mesurés une fois par an. Ces fils numérotés ainsi A6 à A11 et 112 à 117 sont mesurés pour en déterminer la valeur absolue une fois par an, sur la base géodésique de l'Observatoire dont on détermine la longueur à partir de la règle I4 mesurant 4 m et préalablement étalonnée au moyen du comparateur géodésique de la salle 1 par comparaison avec un prototype en platine iridié qui est remplacé dans les années suivantes par la règle en invar qui porte le numéro N1. Le travail de détermination de ces fils occupe chaque année quatre opérateurs pendant une semaine de travail[145].

Le rôle du BIPM est donc de sélectionner les coulées et procéder au traitement qui permet de stabiliser les fils qui sont ensuite fournis aux constructeurs de fils géodésiques comme Carpentier, Morin ou Secrétan pour ne citer que les principaux qui reçoivent les commandes des différents services pour leurs mesures sur le terrain. En choisissant de se faire livrer des quantités importantes de fils, le BIPM constitue au fil des ans un stock permettant de fournir les fabricants de fils pendant un cycle de deux ou trois ans. Le traitement comprend un étuvage des fils et une série de battages destinés à accroître la stabilité des fils en réalisant un vieillissement accéléré[146]. Les années 1897-1905 donnent un premier aperçu de l'évolution du comportement des fils à différentes températures. Ces premières années de tests permettent de fixer la méthode définie dès 1897 et qui sera mise en œuvre pendant de très longues années. Albert Bonhoure engagé au Bureau le 12 octobre 1912 décrit ainsi les traitements appliqués aux fils qui ont constitué un travail régulier dans une communication datée de 1941 :

Avant de commencer l'étuvage on prélève sur la livraison deux ou trois échantillons de 24 m de longueur dont on détermine la dilatation (toujours fortement négative à l'aide du dilatomètre de la base. C'est le résultat de ces premières mesures qui permet de fixer approximativement la température maximum de l'étuvage telle que celui-ci amène la dilatabilité du fil à une valeur aussi petite que possible (…) Lorsque l'étuvage est terminé, on garde le fil encore deux ou trois ans dans le laboratoire avant de le donner aux constructeurs. C'est à ce moment que le fil est coupé à la longueur convenable et qu'on lui fait subir les premiers battages destinés à augmenter sa stabilité et à le rendre moins sensible aux chocs qu'il subira inévitablement lorsqu'il sera en service. Cette première série de battages comprend d'abord 100 secousses rapides contre le plancher du laboratoire, puis le fil est amené sur toute sa longueur à frapper violemment le plancher dix fois, enfin il subit encore 100 secousses rapides. Le fil est alors remis au constructeur qui est chargé de le polir, de fixer les réglettes terminales et d'ajuster sa longueur. Lorsqu'il est rapporté au Bureau, le fil est soumis à une tension de 60 kg pendant 24 heures pour éprouver la solidité des attaches des réglettes, puis mesuré à nouveau. Enfin, il subit encore 100 battages, il est mesuré, battu à nouveau 100 fois, et mesuré. Il ne reste plus qu'à rectifier la direction des réglettes si le fil, près des attaches a été trop fortement courbé par les battages,

144 L'écrouissage abaisse le coefficient de dilatation jusqu'à pouvoir le rendre négatif.

145 A. BONHOURE, « Le traitement du fil d'invar et la préparation des fils géodésiques au Bureau international », Exposé du 4 mars 1941.

146 Étuvage et battage permettent d'obtenir une sorte d'épuisement du potentiel de vieillissement.

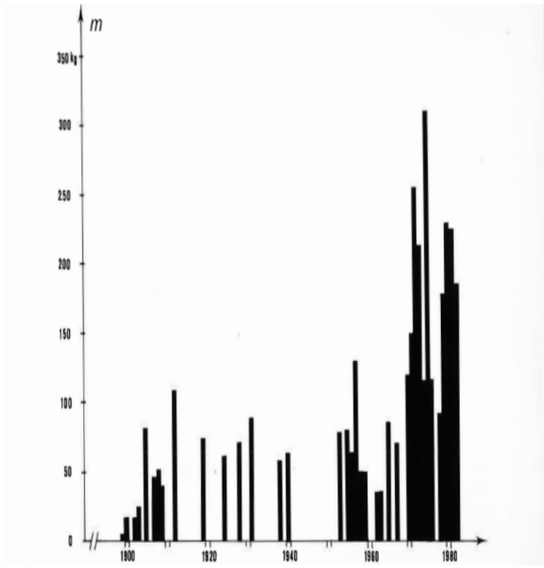
et procéder aux mesures définitives. L'action des premières séries de battages effectué avant le montage des réglettes sur le fil et sans que celui-ci ait été soumis à une forte tension et des battages qui lui succèdent a été déterminé sur tous les fils qui ont été étudiés au Bureau. La tension de 60 kg exercée pendant 24 heures sur un fil de 24 m l'allonge de 2 à 5 dixièmes de millimètre. La première série de 100 battages amène généralement un raccourcissement du fil du même ordre de grandeur. La deuxième série de 100 battages accentue légèrement ce raccourcissement, le plus souvent de moins d'un dixième de millimètre. Cependant, pour un assez grand nombre de fils l'effet des 100 derniers battages se traduit par un petit allongement. » [147]

Avec la demande croissante et le développement de son expérience, le BIPM constitue un stock important spécialement sélectionné pour alimenter les fabricants. Il est important de relever que les fils livrés par Imphy demeurent la propriété de CFD, le BIPM n'en est que le dépositaire mais il occupe un rôle stratégique dans la fabrication et la garantie du produit. L'étuvage des fils est une opération qui réclame la participation d'une grande partie du personnel. Les bottes de fils livrées par Imphy atteignent plusieurs centaines de mètres et il faut plusieurs opérateurs pour les préparer en les enroulant autour de spires jointives sur plusieurs couches autour d'un cylindre creux de 50 cm de diamètre :

On enduisait de vaseline chaque couche de fil que l'on séparait de la suivante par une bande de papier d'emballage. Maudet qui présidait à cette opération en guidant le fil et en l'enduisant de vaseline n'en conservait pas moins ses manchettes empesées pour effectuer à cette opération. (…) Une autre opération qui se répétait assez souvent, pour étudier la permanence des bases terrestres, consistait à mesurer avec un fil d'invar de 24 m (fil 0) la distance de deux piliers placés dans la cour du Bureau, l'un près de l'Observatoire côté nord, l'autre près du bureau occupé maintenant (1967) par Jeannin. Guillaume participait à ces mesures. Pour sortir le fil de la base où il était accroché en permanence, on ne l'enroulait pas, on passait par un soupirail incommode et poussiéreux en tenant le fil à chaque bout. Cette gymnastique ne me convenait pas du tout, mais elle ne rebutait pas Maudet[148].

Le graphique ci-dessous montre l'augmentation significative de la quantité d'invar soumise annuellement à l'étuvage au BIPM. Il illustre l'importance et la longévité de l'utilisation de l'invar. Comme le rappelle G. Girard en 1983, l'invar est alors employé dans de nombreux secteurs :

L'emploi de l'invar, jadis limité à la géodésie, s'étend maintenant au génie civil (surveillance d'ouvrages souterrains, de mines, de ponts, de barrages, de centrales hydro-électriques et nucléaires, etc)[149].



Masse (m) d'invar soumise annuellement à l'étuvage[150]

147 A. BONHOURE, op. cit. p. 4.

148 A. BONHOURE, « Je me souviens …. (1912-1963) » témoignage de sa carrière au Bureau international, p. 5.

149 Monographie du BIPM 83/06, Traitement thermique de l'invar au Bureau international des poids et mesures. En génie civil, des capteurs à corde vibrante en invar permettent de déceler de très petits déplacements. Voir : N. ROSIN-CORE, C. NORET, J.L. BORDES « L'auscultation par capteurs à corde vibrante, 80 ans de retour d'expérience » *Colloque CFBR Auscultation des barrages et des digues*, Chambéry, 27-28 novembre 2012.

150 Monographie du BIPM 83/6, 1983.

ANNEXE 2 : GUILLAUME ET L'HORLOGERIE

« De la mesure des longueurs, seule inscrite au programme primitif, la mesure du temps a surgi d'elle-même, comme une conséquence directe et en quelque sorte évidente, tant il est vrai qu'en métrologie tout est lié. » Ch.-E. Guillaume, 1920.

Cette activité permet à Guillaume de renouer avec ses racines familiales horlogères[151]. Dès 1897, Guillaume développe en parallèle de ses activités métrologiques, des recherches pour améliorer le réglage des instruments servant à la mesure du temps pour la compensation thermique des horloges, la compensation thermique des montres et la compensation des chronomètres de marine et de poche. Guillaume a une stratégie clairement énoncée : favoriser l'industrie horlogère de la région neuchâteloise. Ces recherches correspondent aussi à de nouveaux besoins de la société, en particulier le développement du chemin de fer qui requiert une précision et une synchronisation du temps.

Une première collaboration est engagée avec Paul Perret, un horloger de La Chaux-de-Fonds. Perret demande en 1897 à Guillaume un échantillon d'invar à partir duquel il met au point en collaboration avec Guillaume un premier spiral. Perret constate qu'un mouvement équipé d'un spiral en invar « avance au chaud » c'est-à-dire qu'il a un coefficient thermoélastique positif. Guillaume trace alors la courbe du coefficient thermique du module d'élasticité en fonction de la teneur en nickel et propose un spiral « auto-compensateur » en alliage à 45 % de nickel. Ce premier spiral qui est un véritable succès équipe dans les années qui suivent les montres ordinaires car il ne permet pas une compensation complète. La quasi-perfection sera obtenue plus tard avec l'alliage élinvar, breveté en 1919, qui combine une dilution de l'anomalie par un ajout de chrome et un durcissement par le carbone et le tungstène.

Comme le montre Johann Boillat[152], la stratégie de Guillaume évolue concernant la prise de brevets :

« Sur le plan des brevets tout d'abord l'*Invar* et l'*Elinvar* ont des trajectoires diamétralement opposées. Contre toute attente, le premier métal n'est pas enregistré au nom de son inventeur. En Suisse, l'*Invar* est en effet protégé entre 1897 et 1898, par un « associé » de Charles-Édouard Guillaume, Paul Perret (1855-1904), dont les revendications donnent naissance à plusieurs publications scientifiques financées par l'industrie horlogère suisse. Le deuxième alliage, quant à lui, est inscrit en 1918 au nom de Charles-Édouard Guillaume et la Société des Spiraux Réunies. »

Ce changement de stratégie est à mettre en perspective avec l'évolution de la carrière de Charles-Édouard Guillaume au BIPM. En 1896, lorsqu'il découvre l'invar, il est encore Assistant. Il est nommé directeur-adjoint en 1901. Adolphe Hirsch (1830-1901), astronome germano-suisse qui l'a d'ailleurs engagé au Bureau international, dirige l'Observatoire de Neuchâtel et a été l'un des principaux architectes de la Convention du Mètre. Il est depuis 1875 Secrétaire du Comité international des poids et mesures (CIPM). Hirsch suit de très près les affaires du Bureau international et accompagne de même Guillaume dans la promotion de sa découverte pour le milieu horloger. Guillaume partage avec Hirsch et Perret la volonté de faire profiter l'industrie horlogère suisse de ces découvertes. C'est d'ailleurs Adolphe Hirsch à l'initiative de Guillaume qui présente officiellement lors d'une Conférence à l'Observatoire de Neuchâtel les premiers résultats de Guillaume, témoignant de l'importance de la découverte de l'invar pour toute l'industrie horlogère suisse[153] et du rôle de l'Observatoire cantonal.

151 Charles-Édouard Guillaume est issu d'une famille d'horlogers originaire de Fleurier dans le Haut-Jura suisse. Son grand-père Charles-Frédéric Guillaume s'est réfugié en Angleterre en 1815 où il a épousé une Neuchâteloise descendante des réfugiés de la Révocation. Ils y élèvent trois garçons et fondent une maison d'horlogerie. Le père de Charles-Édouard Guillaume grandit à Londres avant de retourner en Suisse et devient à son tour horloger. Il transmet à son fils son goût pour l'érudition et la passion de l'horlogerie. Le grand-père, le père et l'oncle de Guillaume ont une certaine notoriété dans la région de Neuchâtel qui est dans une phase importante de valorisation et de reconnaissance de son savoir-faire et de l'expertise horlogère locale. Guillaume a, par ce biais, une connaissance importante de ce milieu et a de nombreux points d'appui. Les archives montrent qu'il est en relation avec les horlogers et les chronométriers du Locle, de la Chaux-de-Fonds, de Neuchâtel, mais également en France, en Angleterre.

152 J. BOILLAT, « Des alliances pour des alliages III : le béryllium des spiraux », *Bulletin de la Société Suisse de Chronométrie*, n° 88, décembre 2019.

153 L'Observatoire de Neuchâtel est fondé par Adolphe Hirsch en 1858. Hirsch en fait un véritable observatoire scientifique et astronomique. L'Observatoire avait été pensé dès 1855 pour permettre au canton de Neuchâtel de promouvoir l'industrie horlogère suisse de haute précision en fournissant des certificats. Un projet d'étude est en cours sur L'Observatoire cantonal de Neuchâtel (1858-1948) : cultures de la précision, économie de la qualité et « merchandisation » de l'heure » sous la direction de Gianenrico Bernasconi à l'Université de Neuchâtel. Sur la fondation de l'Observatoire, voir également la Conférence de Rossella Baldi, Les origines de l'Observatoire de Neuchâtel, enregistrée au Club 44, le 19 février 2019. https://soundcloud.com/club-44/les-origines-de-lobservatoire-de-neuchatel-rossella-baldi

Dans les premières années qui suivent la découverte de l'invar, Guillaume reste très en retrait, c'est une stratégie assumée qui tient à sa position au Bureau qui l'incite à se tenir éloigné des affaires commerciales se bornant à apparaître officiellement comme simple expert et caution scientifiques apparaissant comme « ingénieur conseil » dans le consortium mis sur pied avec Perret. Cette posture officielle est très éloignée de la réalité car Guillaume participe très activement aux travaux d'ajustement et de développement du spiral en étroite collaboration avec Perret comme en atteste la très volumineuse correspondance conservée au Musée International de l'Horlogerie et au BIPM[154]. La situation particulière de Guillaume explique ainsi qu'il laisse prendre les premiers brevets au nom de Perret et non au sien. Perret parallèlement signe une convention avec la société Commentry-Fourchambault et Decazeville pour formaliser les conditions de la fourniture des alliages.

La relation entre Guillaume et Paul Perret prend dès 1898 un tour assez conflictuel. Perret est très directif dans ses prises de position, cultive la politique du secret imposant de conserver une confidentialité absolue autour de leurs travaux et ne laisse à Guillaume qu'une faible marge de manœuvre[155]. Les relations compliquées avec Perret qui décède en 1904 et l'immense travail de vérification imposé par les développements pour l'horlogerie incitent Guillaume à réfléchir à une alternative et à s'appuyer sur un groupe industriel pour la commercialisation de ses inventions. Adolphe Hirsch meurt en 1901 et Guillaume est promu directeur-adjoint cette même année. Cette nouvelle position et l'élection du nouveau Secrétaire du CIPM, Pietro Blaserna (1836-1918) qui est moins intrusif dans la gestion des affaires du Bureau international, permettent à Guillaume de prendre de nouvelles décisions dans le développement de ses travaux à destination de l'horlogerie.

Guillaume signe ainsi en 1901 une convention avec la Société des Fabriques de Spiraux Réunies à la Chaux-de-Fonds qui prend en charge la fabrication industrielle des spiraux avec les alliages fournis par l'usine d'Imphy. En 1904, Guillaume écrit à un ami qu'il est heureux de s'être déchargé des problèmes de fabrication et de réglage même si c'est au prix de sa liberté d'action[156]. Guillaume, à partir des alliages fournis par Imphy, met au point le balancier intégral appelé balancier Guillaume qui élimine l'erreur secondaire des montres, un problème que les horlogers cherchaient à résoudre depuis plus de 200 ans. Guillaume considère d'ailleurs que le balancier Guillaume est sa plus grande réussite[157] dans ses travaux à destination de l'horlogerie. À partir de 1912, en étudiant les additions avec Chevenard, il commence les recherches qui le conduisent à mettre au point l'élinvar, comme élasticité invariable, mis au point en 1919 et constituant l'apogée de ses recherches pour l'horlogerie.

Les apports de Guillaume à l'amélioration de la précision des horloges et des montres peuvent s'analyser en quatre étapes successives : La première est de fabriquer en invar le balancier des pendules, rendant ainsi sa période insensible aux variations de température. Les étapes suivantes portent sur l'ensemble « balancier spiral » qui est l'organe réglant des montres[158].

Après les premiers essais de Perret avec un spiral en invar, l'exploration du diagramme Fe-Ni permet à Guillaume de rapidement identifier deux teneurs en nickel (28/29 % et 44/45 %) présentant un coefficient thermoélastique (CTE) nul. La variation du CTE étant moins rapide autour de 44/45 %, c'est cet alliage que Guillaume choisit pour la fabrication des spiraux compensateurs qui sont adoptés pour équiper les montres ordinaires.

Les mouvements de précision continuent cependant à utiliser un spiral en acier associé à un balancier

154 Les archives du BIPM conservent 5 volumes d'environ 565 feuilles chacun avec les lettres de Guillaume adressées aux différents acteurs dans le cadre de ses activités à destination de l'horlogerie. Le fonds Guillaume au Musée international de l'horlogerie conserve une grande partie des archives, notamment les lettres de Paul Perret.

155 Voir les lettres de Paul Perret adressées à Charles-Édouard Guillaume, Archives du Musée international de l'horlogerie, MIH, Fonds Guillaume, CEG-2.

156 Lettre du 1er septembre 1904 adressée à Rucher Moser à La Chaux de Fonds. Archives BIPM.

157 « Les concours de l'an dernier, dont les rapports des directeurs des grands observatoires chronométriques on fait connaître récemment les conclusions, ont affirmé une fois de plus le succès du balancier dont notre compatriote, M. Ch. Ed. Guillaume, donna la formule il y a plus de treize ans. La supériorité des résultats obtenus au moyen de ce balancier est telle en effet, que, dans les pièces ayant subi victorieusement les épreuves, le balancier compensateur acier-laiton est devenu l'exception : 5 sur 181 à Genève, 11 sur 258 à Neuchâtel, 3 sur 90 à Besançon. », Extrait de la Fédération horlogère suisse, N°55, 13 juillet 1912. Le balancier Guillaume permet d'obtenir le record au concours de chronométrie de Kew en 1912. Une montre neuchâteloise bat le record de chronométrie à Kew avec une montre Ditisheim et son balancier Guillaume. Voir Conférence de Rossella Baldi, Les origines de l'Observatoire de Neuchâtel.

158 Ce paragraphe emprunte beaucoup au mémoire de DEA déjà cité d'Éric LAMBRET, *Cent ans d'Invar*, p. 57 à 78.

bimétallique. Dans ce dispositif, dont l'invention remonte au milieu du XVIII[e] siècle, la variation de la raideur du spiral en fonction de la température est compensée par la variation du moment d'inertie du balancier, grâce à la déformation résultant de sa structure bimétallique. Cette compensation n'est cependant pas parfaite car raideur du spiral et moment d'inertie du balancier n'évoluent pas suivant des lois rigoureusement images l'une de l'autre. La correction peut être obtenue parfaite à deux températures mais une « erreur secondaire » subsiste aux autres températures. Guillaume analyse finement le problème et identifie un alliage Fe-Ni dont le comportement en fonction de la température est tel que son choix comme constituant peu dilatable du balancier bimétallique permet une compensation dans tout le domaine de température. Le « balancier intégral Guillaume » supprime l'erreur secondaire et est adopté pour les chronomètres[159].

Le troisième et le plus célèbre apport de Guillaume est l'invention de l'élinvar qui est l'aboutissement de ses recherches pour améliorer l'alliage fer-nickel des premiers spiraux compensateurs. Ces spiraux présentent deux défauts : ils ne corrigent pas l'erreur secondaire et ils sont trop mous. Guillaume introduit un ajout de chrome, dont il constate qu'il dilue l'anomalie, donnant ainsi naissance à un alliage présentant un coefficient thermoélastique proche de zéro dans une plus grande plage de température. Puis il augmente la dureté par une augmentation de la teneur en carbone et l'introduction d'un ajout de tungstène. Les carbures (de chrome et de tungstène) ne provoquent pas eux-mêmes un durcissement important mais leur présence rend plus intense le durcissement par écrouissage. Erreur secondaire très faible et dureté suffisante sans trop grande fragilité ne sont cependant pas obtenues avec une reproductibilité parfaite et le fabricant de spiraux doit trier les coulées[160].

L'élinvar fera l'objet d'une longue collaboration entre CFD Imphy et les Fabriques de Spiraux Réunies. Comme l'expose Johan Boillat[161], un alliage concurrent, qui prend le nom de Nivarox, apparaît au début des années 1930. Ses propriétés de thermoélasticité ont la même origine que celles de l'élinvar mais il est à bas carbone et son durcissement est du type « durcissement structural » que Chevenard va adopter pour le Durinval. Nivarox et Durinval sont tous deux élaborés sous vide, le premier est durci par le béryllium et le second par l'aluminium[162]. Le Nivarox fait l'objet de nombreux articles et d'une promotion agressive. Les Fabriques de Spiraux Réunies s'en assurent l'exclusivité en créant, en 1937, la société Nivarox SA qu'elles contrôlent. On peut penser que CFD Imphy n'a été informée que tardivement de ce basculement vers le Nivarox, puisqu'en février 1938 les Spiraux Réunies éditent une luxueuse brochure décrivant les dernières recherches de Chevenard et son équipe et en particulier la mise au point du Durinval[163].

Les Spiraux Réunies vont désormais se fournir auprès de Nivarox SA dans une relation d'exclusivité bilatérale. CFD Imphy ne fournira plus que les Spiraux Français qui ne souhaiteront pas utiliser le Durinval et resteront fidèles à l'élinvar. Une nuance de Durinval ajustée pour être peu magnétique sera livrée pendant une dizaine d'années à Timex Grande Bretagne et à Timex Kelton qui fabriquent leurs spiraux en interne.

159 Guillaume considère que c'est son invention principale en horlogerie pure.

160 Ce sont des coulées de quelques dizaines de kilogrammes. L'homogénéité n'est pas non plus parfaite à l'intérieur d'une coulée.

161 J. BOILLAT, « Des alliance pour des alliages III : le béryllium des spiraux », *Bulletin SSC*, n°88, 2019.

162 Dans les deux alliages, le durcissement par « durcissement structural » permet d'obtenir la dureté souhaitée sans fragilité excessive. Le bas carbone favorise la résistance à la corrosion, mais la teneur en chrome est bien trop faible pour une véritable inoxydabilité. Par ailleurs, exploitant tous deux la même anomalie d'origine magnétique, ils ne peuvent pas être rigoureusement non magnétiques. L'International Nickel proposera le Nispan C, durci par le titane, qui sera utilisé pour la fabrication des capsules barométriques mais très peu en horlogerie, du moins en Europe.

163 Intitulée « Nouveaux alliages du type Elinvar pour spiraux de chronomètres », elle est tirée à 1.000 exemplaires sur velin bouffant. Elle indique que « les essais nécessaires ont été conduits avec patience et habileté, au laboratoire de la Société des Fabriques de Spiraux Réunies par MM. Defossez et Hofer, à Imphy par MM. Waché, Villachon, Joumier, Mlle Dondon ».