

Des alliances pour des alliages III : le béryllium des spiraux ¹

Johann Boillat

Haute École de Suisse Occidentale HES-SO

Haute École Arc, Neuchâtel

johann.boillat@he-arc.ch – www.he-arc.ch/conservation-restauration

Décembre 2019

29

Bulletin SSC n° 88

D'une manière générale, l'industrie se distingue par sa dépendance face aux matières premières ou produits semi-finis. En Suisse, la question de l'approvisionnement se pose peut-être avec plus d'acuité dans le sens où, depuis l'éclatement de la Révolution industrielle au XIX^e siècle, la pauvreté géologique du pays a rapidement contraint le patronat à sécuriser les filières et à organiser les marchés. De son côté, la branche horlogère ne fait pas exception à la règle. Ainsi, le secteur voit se développer des alliances garantissant aux acteurs l'alimentation du système productif en alliages de très haute qualité.

Entre la fin du XIX^e et le début du XX^e siècle, la seconde révolution industrielle permet le déploiement de nouvelles techniques dans le domaine de l'industrie des métaux². Cette « nouvelle métallurgie »³, stimulée par l'utilisation de procédés électrochimiques, provoque l'apparition de matières inconnues⁴. Pour ce qui concerne la mesure du temps, la mise au point, en France, d'une série d'alliages inédits aux propriétés exceptionnelles donne naissance à la métallurgie dite « de précision »⁵. Cette dernière se caractérise notamment par la nécessité de maîtriser une série d'opérations d'une très grande exactitude « en raison du nombre des conditions à satisfaire et de l'étroitesse du domaine où chacune des propriétés atteint le degré voulu »⁶. En pratique, les conditions de production telles que la fusion, la coulée, le forgeage, puis le travail à froid « requièrent des matières premières plus pures, des appareils plus délicats, des techniques plus exactes, une surveillance plus attentive que la fabrication des aciers proprement dits »⁷. C'est durant cette période charnière que l'industrie horlogère suisse va se retrouver face à des alliages étrangers, retouchant la structure de son district⁸.

Charles-Edouard Guillaume et Imphy (1896-1930)

La première série d'innovation trouve son origine en France, au siège du Bureau international des Poids et Mesures à Sèvres, dans le Département des Hauts-de-Seine. Rattaché à l'Institution depuis 1883, le Neuchâtelois Charles-Edouard Guillaume (1861-1938)⁹ y poursuit des recherches sur des alliages capables de servir de base pour la création d'étalons de mesures. Cependant, le Pavillon de Breteuil ne dispose pas des infrastructures nécessaires à l'élaboration des échantillons. Le physicien suisse se tourne alors vers la Société de Commentry-Fourchambault & Decazeville, à Imphy, dans le département de la Nièvre¹⁰. À cette époque, la fonderie est entre les mains d'Henri Fayol (1841-1925), épaulé par un jeune directeur technique, Pierre Chevenard (1888-1960)¹¹. Les deux hommes mettent en place un programme de recherche et développement particulier qui va perdurer jusqu'au milieu des années trente¹². S'appuyant sur des installations électriques de premier ordre, les aciéries d'Imphy se sont spécialisées dans le traitement du nickel dans les années 1880 déjà¹³. Jusqu'au milieu des années 1930, les alliages fondus dans la Nièvre

par Pierre Chevenard sont ainsi analysés par Charles-Edouard Guillaume à Paris¹⁴. La collaboration qui s’instaure entre le monde scientifique et la sphère industrielle se révèle particulièrement féconde et vaudra au Neuchâtelois l’attribution du Prix Nobel de Physique en 1920¹⁵.

L’invention mère est un alliage binaire élaboré en 1896¹⁶. Composé de fer et de nickel et baptisé *Invar* (diminutif du mot «*invariable*»), il se caractérise par une dilatabilité quasi nulle¹⁷. La seconde nouveauté, mise au point en 1918, est un mélange de fer, de nickel et de chrome. Il s’agit de l’*Elinvar* (acronyme pour «*élasticité invariable*») qui se démarque par un coefficient d’élasticité stable¹⁸. Les comportements exceptionnels de ces métaux et les améliorations majeures qu’ils sont susceptibles d’apporter dans la quête de l’exactitude attirent l’attention des horlogers suisses. Ceux-ci vont en effet rapidement entrer en contact avec Charles-Edouard Guillaume afin de tirer profit des innovations.

Sur le plan des brevets tout d’abord, l’*Invar* et l’*Elinvar* ont des trajectoires diamétralement opposées¹⁹. Contre toute attente, le premier métal n’est pas enregistré au nom de son inventeur (Fig. 1). En Suisse, l’*Invar* est en effet protégé, entre 1897 et 1898²⁰, par un «associé» de Charles-Edouard Guillaume, Paul Perret (1855-1904)²¹, dont les revendications donnent naissance à plusieurs publications scientifiques financées par l’industrie horlogère suisse²². Le deuxième alliage, quant à lui, est inscrit en 1918 au nom de Charles-Edouard Guillaume et de la Société des Fabriques de Spiraux Réunies²³. Cette asymétrie dans l’enregistrement de la propriété intellectuelle, soit une dimension individuelle pour l’*Invar* et une appréhension entrepreneuriale pour l’*Elinvar*²⁴, va avoir d’importantes répercussions sur le déploiement des marchés.



Fig. 1 : Un des quatre brevets *Invar* (1897)²⁵.

Au début du XX^e siècle, les FSR (Fabriques de spiraux réunies SA) cherchent à prendre le contrôle des patentes de l’usurpateur en s’attachant les services de l’inventeur. En 1901, une convention est signée entre les deux parties²⁶ : les contrats stipulent que Charles-Edouard Guillaume concède le droit de vente exclusif et dans le monde entier du balancier compensateur aux FSR via un partenariat avec la fabrique de balanciers Ferrier & Vaucher à Travers²⁷. Cette dernière bénéficie des conseils de Charles-Edouard Guillaume pour la production de balancier *Invar* jusqu’à concurrence de 10’000 francs par année. Au-delà de ce seuil, les FSR reprennent la fabrication des fournitures, moyennant une répartition des bénéfices avec le physicien neuchâtelois. Parallèlement, la promotion commerciale de l’invention est supportée par les FSR alors que Charles-Edouard Guillaume, désormais collaborateur de ces dernières²⁸, s’engage à multiplier les publications dans les revues horlogères²⁹ ou scientifiques³⁰. La manœuvre a pour but d’endiguer la commercialisation de l’*Invar* par Paul Perret. Depuis le 1^{er} août 1901, celui-ci est en effet à la tête d’une petite entreprise chargée de la fabrication et de la vente de spiraux en acier-nickel³¹. Les affaires semblent florissantes puisque l’unité est transformée en société anonyme le 23 décembre 1902, sous le nom de «Société anonyme des spiraux Paul Perret à Fleurier»³² (Fig. 2).



Fig. 2 : Publicité pour la fabrication des spiraux *Invar* par Paul Perret (1901)³³.

Après le décès de Paul Perret, le jeune directeur des FSR, Paul Baehni (1894-1970)³⁴, rachète le centre de production des spiraux Perret à Fleurier, puis procède à sa fermeture et à son transfert, pour moitié à Genève et pour moitié à Bienne³⁵. Plus rien ne s’oppose désormais à la production industrielle de l’*Invar*, hormis les problèmes d’usinage. Les débuts de la nouvelle collaboration entre Charles-Edouard Guillaume et le trust des spiraux ne se présentent pas sous les meilleurs auspices en effet. Entre 1905 et 1908, les manufactures, clientes des FSR, se plaignent de la très mauvaise qualité des spiraux qui leur sont livrés. Les problèmes proviennent des aciéries d’Imphy qui, à cette époque, ne parviennent pas encore à stabiliser les conditions de productions nécessaires à la pratique de la métallurgie de précision. Par exemple, un

des administrateurs des FSR, Charles-Albert Vuille (1866-1949)³⁶, écrit à Charles-Edouard Guillaume au début de l'année 1907 pour lui faire part de son mécontentement. Dans sa lettre, il encourage le scientifique à rompre sa collaboration avec les forges d'Imphy pour se tourner vers une entreprise concurrente, Le Ferro-Nickel SA, active sur le marché des alliages cuivreux depuis 1884³⁷ : « étant donné les ennuis que nous avons depuis plusieurs mois avec cette fourniture, je vous demande instamment de bien vouloir traiter au plus vite et en sous-mains, comme vous le proposez vous-même avec Mr. le directeur du Ferro-nickel. Ces Messieurs tiennent d'en sortir et nous ne pouvons pas laisser la clientèle dans cette situation »³⁸. Les principales difficultés se concentrent autour de la stabilisation des techniques inhérentes à la métallurgie de précision et plus particulièrement de la question de l'hétérogénéité des alliages. Comme le signale un des directeurs des FSR dans son rapport à Guillaume au début du mois de février 1907, « on trouve, paraît-il, par places, des filons de nickel qui n'ont pas subi l'assimilation à l'acier. D'autre part, j'ignore pour quelle raison, mais les derniers aciers-nickel envoyés, de la fonderie d'Imphy, le 10 janvier [1907], étaient presque complètement craquelés et si peu propres, qu'il était matériellement impossible d'en tirer aucun parti. Ce qu'il faudrait donc, c'est que les fonderies, soit d'Imphy, soit du Ferro-nickel, puissent nous fournir le métal aux teneurs que vous indiquez, mais proprement mélangé, et si possible, dépourvu de ce défaut grave, qui se présente sous la forme de bûchilles ou d'esquilles lorsqu'on travaille le métal. Dès que nous aurons le métal dans de bonnes conditions, nous pourrions pousser la fabrication et lui donner une orientation meilleure, étant donné le fait que le balancier Guillaume fait tout naturellement son chemin »³⁹. Dès l'hiver 1908-1909, les améliorations apportées aux procédés autorisent la livraison de lingots homogènes. Dans les années qui suivent, les relations entre Imphy, Sèvres et la Suisse entrent dans une phase de consolidation⁴⁰ et la poursuite des travaux de Charles-Edouard Guillaume permet donc de lancer sur le marché l'*Elinvar* dès 1919 (Fig. 3) dont la commercialisation se présente sous la forme de spiraux dotés d'un coefficient thermo élastique nul à température ambiante. Cette avancée est fondamentale dans l'histoire des techniques horlogères puisqu'elle permet de résoudre définitivement le problème dit de « l'erreur secondaire » : en unissant un balancier Guillaume à un spiral *Elinvar*, le Fleurisan apporte une solution structurelle à la mesure du temps, soit l'affranchissement des mouvements aux conditions thermiques⁴¹. Ainsi, dès le début des années 1920, l'industrie horlogère suisse a franchi un palier lui permettant d'observer le développement de la concurrence avec suffisamment de recul. L'histoire aurait pu s'arrêter là, si un nouveau métal, en provenance d'Allemagne cette fois-ci, n'était pas venu redistribuer les cartes.

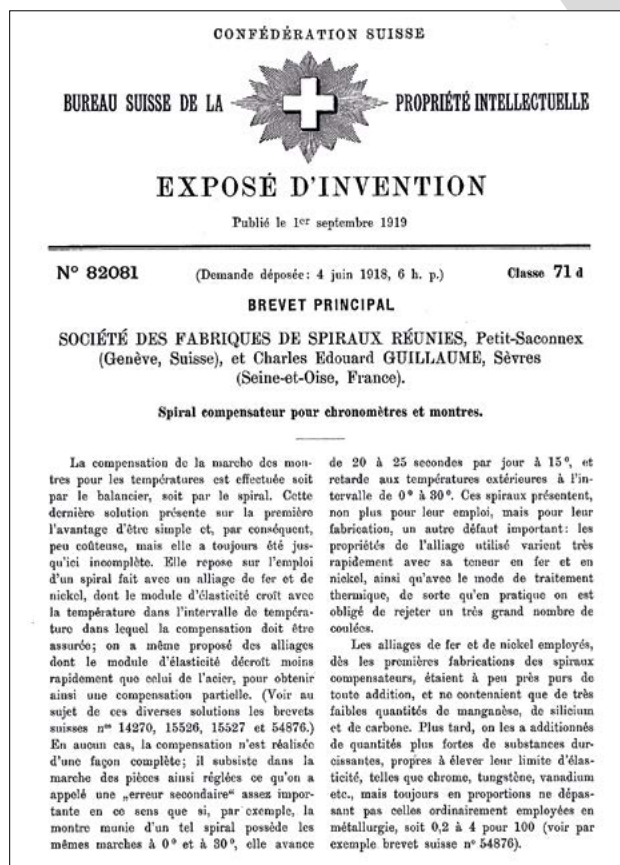


Fig. 3 : Brevet *Elinvar* (1918)⁴².

Reinhardt Straumann et Hanau am Main (1931-1967)

Les premières critiques contre les avantages des spiraux *Elinvar* apparaissent durant la seconde moitié des années 1920. Elles émanent d'un jeune ingénieur, Reinhardt Straumann (1892-1967), alors recruté comme directeur technique de la manufacture Thommen à Waldenburg, dans le canton de Bâle-Campagne⁴³. Celui-ci constate que les alliages développés précédemment présentent trois grandes faiblesses : ils sont magnétiques, déformables et oxydables⁴⁴. La question du magnétisme devient, durant le premier tiers du XX^e siècle, un problème récurrent dans la mesure où on assiste à la multiplication, dans la société civile et militaire, de compteurs et autres appareils électriques⁴⁵. Or, l'utilisation de ces instruments génère des champs magnétiques contribuant à créer un environnement domestique et professionnel de plus en plus hostile à la bonne marche des mouvements. De plus, la question de la dilatation bien que réduite, n'en est pas totalement éliminée pour autant. Dans cette perspective, le recours à des matières supportant des variations de températures plus importantes devient une nécessité, notamment avec l'accélération générale des moyens de transports durant l'entre-deux-guerres. Enfin, la réaction des alliages à l'humidité reste problématique. Ce dernier point semble avoir été particulièrement sensible.

Ainsi, comme l'évoque un fabriquant suisse dans ses souvenirs, « le fléau numéro 1, [c'est] la rouille. Dans les périodes de brouillard, le 70 % à 80 % des spiraux étaient rouillés et inutilisables »⁴⁶.

Ces divers inconvénients vont être surmontés au début des années 1930 dans le sillage des recherches entamées dix ans plus tôt par la multinationale Siemens & Halske à Berlin⁴⁷. À la fin des années 1920, les laboratoires du conglomerat allemand sont arrivés à la conclusion que l'adjonction d'une faible quantité de béryllium dans certains mélanges donne naissance à des alliages très légers, amagnétiques, inoxydables et d'une dureté supérieure à celle de l'acier⁴⁸. Les propriétés hors normes des alliages au béryllium amènent un des scientifiques impliqué dans le projet, Alfred Stock (1876-1946)⁴⁹, directeur retraité du prestigieux *Kaiser-Wilhelm-Institut für Chemie*, à prophétiser sur leurs applications: « on peut leur prédire un avenir technique important. Aujourd'hui déjà [1929], ils produisent des ressorts particulièrement résistants »⁵⁰. De son côté, l'ingénieur bâlois, présentant le potentiel de ce « nouveau matériau »⁵¹, s'exile en Allemagne⁵². Il entre alors en contact avec les dirigeants de l'entreprise Heraeus-Vacuumschmelze à Hanau am Main⁵³, une des seules fonderies d'Europe qui, à cette époque, maîtrise la coulée sous vide, technologie nécessaire à la fabrication du béryllium⁵⁴. Les essais sont concluants et débouchent sur une prise de brevet pour un nouveau type de ressort de montre: le Nivarox, acronyme de « *nicht variabel oxydfest* »⁵⁵ (Fig. 4). Par la suite, Reinhard Straumann multiplie, lui aussi, les publications dans les périodiques horlogers pour faire part de sa découverte⁵⁶.

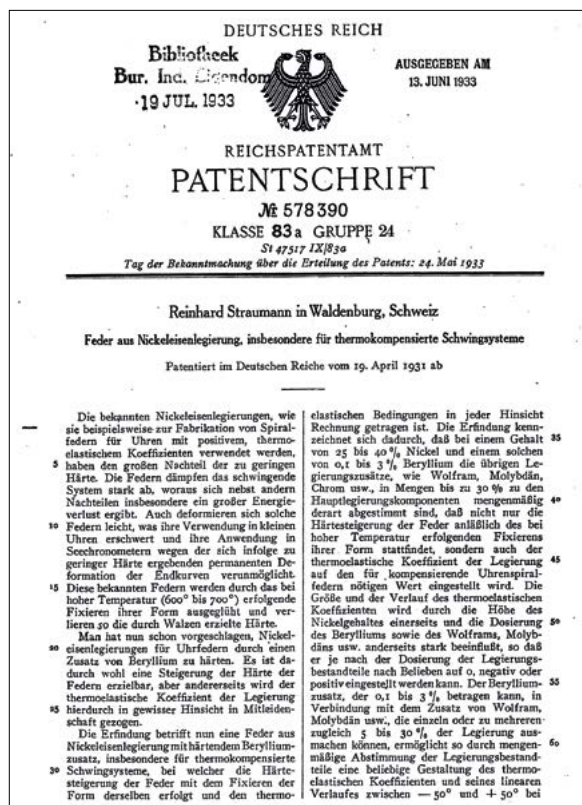


Fig. 4: Brevet Nivarox (1931)⁵⁷.

Le transfert technologique vers la Suisse n'est pas immédiat, la faute au verrouillage du marché par le cartel horloger⁵⁸. Il faut en effet souligner que les fabricants helvétiques voient d'un très mauvais œil l'irruption de cette nouvelle matière dans le paysage horloger. Du côté des propriétaires historiques des FSR, on estime que la Suisse doit continuer à miser sur le potentiel d'innovation des aciéries d'Imphy: « Straumann continue à faire beaucoup de bruit avec sa nouvelle invention, et, à ma grande surprise, j'ai vu que la Société Générale de l'Horlogerie Suisse (le trust qui contrôle les parties réglantes de la montre) suit attentivement les résultats de sa prétendue découverte. Devant ces faits, j'espère que nous obtiendrons sous peu d'Imphy le nouvel *Elinvar* auquel vous travaillez avec Monsieur Chevenard, et qu'il vous sera possible, de votre côté, de nous donner des alliages destinés aux balanciers devant s'accoupler aux spiraux *Elinvar*. Nous préviendrons ainsi toutes les tentatives Straumann »⁵⁹. Or, l'innovation fait son chemin et provoque son lot de réactions. Certains en appellent à l'expertise de Charles-Edouard Guillaume (Fig. 5).

D'autres, face à une menace difficilement identifiée, crient au complot. Tel est le cas de Louis Huguenin, administrateur des FSR, dont le réflexe consiste à déconsidérer le nouvel alliage et son inventeur, tout en procédant parallèlement au renouvellement des licences antérieures: « indépendamment de l'affaire Straumann qui, même si elle se révèle comme ne valant pas grand-chose, a sur le public horloger un effet regrettable, en ce sens qu'elle porte atteinte par sa réclame au caractère d'exclusivité de notre *Elinvar*, la question du renouvellement de nos brevets devient aujourd'hui tout-à-fait urgente. En effet, le brevet suisse 82.081 pour un spiral compensateur pour chronomètres et montres, arrive à échéance cette année. Le même brevet en France et en Allemagne arrive à échéance l'année prochaine. Pour l'Angleterre, l'échéance était l'année passée. Les nouveaux brevets seront échus en Suisse et en France en 1935, aux États-Unis et en Angleterre en 1936, et en Allemagne et aux États-Unis encore, sur le spiral compensateur, en 1940 (...). La prise de nouveaux brevets sur un alliage légèrement modifié et espérons-le, encore amélioré, mettrait fin aussi à cette campagne de recherches qui devient presque une campagne de dénigrement, entreprise par les Chamberlain, Straumann et consorts »⁶⁰.

Enfin, du côté des représentants de la Société générale de l'industrie horlogère suisse SA (Asuag), la réaction est différente. À leurs yeux, le cartel, qui vient de procéder au rachat des fabriques de spiraux, doit absorber l'innovation au risque de se retrouver distancé par la concurrence étrangère⁶¹. La réponse des organisations patronales horlogères se déploie en trois séquences. Au mois d'août 1933, une convention est tout d'abord signée entre Reinhard Straumann et le cartel aux termes de laquelle l'ingénieur s'engage à faire profiter la Suisse des améliorations technologiques de son ressort en échange de « royautés »

(sic) sur la fabrication de spiraux ni variables ni oxydables pour le marché suisse⁶². Dès 1935 ensuite, une entente est conclue entre les entreprises Siemens & Halske (détentrice des brevets initiaux), Heraeus-Vacuumschmelze (maîtresse de la coulée sous vide) et Reinhard Straumann lui-même, par laquelle la production de l'alliage mère est fixé à hauteur de 35 % pour l'Allemagne (avec un droit d'exclusivité attribué à la fabrique Karl Haas AG à Schramberg) et 65 % pour la Suisse (avec un droit d'exclusivité attribué à la fabrique W. Ruch & Cie à St-Imier)⁶³. Enfin, en 1937, la commercialisation exclusive du spirale est attribuée à une nouvelle société, Nivarox SA à St-Imier, contrôlée par les FSR⁶⁴. En d'autres termes, c'est grâce à un transfert technologique effectué dans les années 1930 que l'entreprise du Jura bernois est devenue leader mondial dans le domaine de la mesure mécanique du temps⁶⁵.

Une Suisse horlogère dépendante de l'étranger

L'étude des flux de matières stratégiques met clairement en évidence le fait que la Suisse est dépendante des nations étrangères en matière d'innovation horlogère durant la première moitié du XX^e siècle : la France, pour ce qui touche à la métallurgie de précision et l'Allemagne, pour ce qui concerne la métallurgie sous vide. De son côté, le patronat helvétique, grâce à un haut degré d'organisation, économique et financière, est parvenu à éliminer les disruptions engendrées par les potentialités technologiques de ces nouveaux alliages. Cette spécificité horlogère mériterait d'être comparée aux autres périodes de crises technologiques de même qu'à d'autres secteurs emblématiques de l'industrie helvétique. ■

Notes et bibliographie

1 Cet article s'inscrit dans le cadre d'un projet du Fonds national suisse de la recherche scientifique (FNS), subside n° P2NEP1_159008. L'auteur tient à remercier les personnes et institutions suivantes pour la mise à disposition des ressources. En Allemagne : Bayerische Staatsbibliothek Muenchen ; Deutsches Museum Muenchen – Forschungsinstitut für Wissenschafts- und Technikgeschichte (Dr. Alexander GALL) ; Deutsches Patent- und Markenamt Muenchen [désormais DE-DPMA] ; Universitätsbibliothek Technischen Universität Muenchen. En France : Amis du Vieux Guérisny – le Musée Forges et Marines, Guérisny (Alain BUSSIÈRE et François DUFFAUT) et Société des Ingénieurs et Scientifiques de France, Paris (Alexandra PUJOL et Nicolas PONGY). En Suisse : Berner Fachhochschule / Haute école spécialisée bernoise, Biel / Bienne (Kathrine WINKLER) ; Bibliothèque de la Ville du Locle (Fabio BERTAZZONI) ; Mémoires d'Ici, Centre de recherche et de documentation du Jura bernois [désormais CH-MICI], St-Imier (Frédérique ZWAHLEN) et Musée international d'horlogerie [désormais CH-MIH], La Chaux-de-Fonds (Dr. Régis HUGUENIN-DUMITTAN, Françoise BELTRAMI et Isis JOLIAT). Un remerciement tout parti-

culier à François GOETZ (Professeur à la Haute École Arc – Neuchâtel) pour ses précieux commentaires. Les volets précédents de cette série ont été publiés dans les Bulletins SSC n° 84 (décembre 2017) et n° 85 (juin 2018).

- 2 CHEZEAU Nicole, *De la forge au laboratoire : naissance de la métallurgie physique : (1860-1914)*, Rennes : Presses universitaires de Rennes, 2004, 237 p.
- 3 DAUMAS Maurice (dir.), *Histoire générale des techniques. 5 Les techniques de la civilisation industrielle : transformation, communication, facteur humain*, Paris : PUF, 1996, pp. 48-71.
- 4 GARÇON Anne-Françoise, *Mine et métal 1780-1880. Les non-ferreux et l'industrialisation*, Rennes : Presses universitaires de Rennes, 1998, 278 p. Ici, p. 122.
- 5 CHEVENARD Pierre, *Méthodes de recherche et de contrôle dans la métallurgie de précision*, Paris : Imprimerie Chaix, 1923, 43 p. ; CHEVENARD Pierre, « La métallurgie de précision », in : *La technique moderne*, 30, (1^{er} avril 1938), n° 7, pp. 1-11 et CHEVENARD Pierre, *La précision en métallurgie et la métallurgie de précision*, Paris : Hôtel de la Société, 1952, 44 p. Ici, pp. 21-22.
- 6 CHEVENARD Pierre, « La métallurgie de précision », in : *La technique moderne*, 30, (1^{er} avril 1938), n° 7, pp. 1-11. Ici, p. 1.
- 7 *Idem*.
- 8 BOILLAT Johann, « Des banquiers des horlogers aux horlogers des banquiers. Une analyse quantitative du patronat des cantons de Berne, Neuchâtel et Soleure (1900-1950) », in : FLORES ZENDEJAS Juan, HÜRLIMANN Gisela, LORENZETTI Luigi et SCHIEDT Hans-Ueli (éd.), *Texte und Zahlen. Der Platz quantitativer Ansätze in der Wirtschafts- und Sozialgeschichte. Des textes et des chiffres. La place des approches quantitatives dans l'histoire économique et sociale*, Zurich : Chronos, 2019, pp. 177-199.
- 9 Les notices nécrologiques sont nombreuses. Pour un premier survol, on se tournera avantagusement vers : GOETZ François, « Charles-Édouard Guillaume, physicien (1861-1938), Prix Nobel », in SCHLUP Michel (dir.), *Biographies neuchâteloises. De la Révolution au cap du XX^e siècle*, vol. 3, Hauterive : G. Attinger, 2001, pp. 167-174.
- 10 CHEVENARD Pierre, « Apports scientifiques de la société Imphy. Sa contribution aux progrès de la métallographie et à l'imprégnation scientifique de l'industrie métallurgique », in : SOCIÉTÉ MÉTALLURGIQUE D'IMPHY (éd.), *La société de Commeny-Fourchambault et Decazeville (1854-1954)*, Paris : Office de Propagande Générale, 1954, pp. 219-263. Voir plus précisément la section II : « Collaboration avec le Bureau international des Poids et Mesures 1895-1937. L'œuvre de Charles-Édouard Guillaume et ses conséquences immédiates et lointaines », pp. 225-230 ; THUILLIER Guy, « Charles-Édouard Guillaume et Imphy », in : AMIS DU VIEUX GUÉRIGNY (éd.), *Marteau Pilon*, vol. 4, Guérisny, juillet 1992, pp. 135-141 ; LAMBRET Eric, « L'œuvre métallurgique de Charles-Édouard Guillaume, Prix Nobel 1920 et sa collaboration avec les Acieries d'Imphy », in : AMIS DU VIEUX GUÉRIGNY (éd.), *Actes du Colloque. Innovations métallurgiques en Nivernais*, Guérisny, septembre 1996, pp. 9-20.
- 11 LE MASSON Pascal, WEIL Benoit, « Fayol, Guillaume, Chevenard – la Science, l'Industrie et l'exploration de l'inconnu : logique et gouvernance d'une recherche conceptive », in : *Entreprises et Histoire* 83, 2016, pp. 79-107. Ici, pp. 88-89 ; DUFFAUT François, « Pierre Chevenard ou la recherche au cœur de l'entreprise moderne », in : *Entreprises et Histoire* 83, 2016, pp. 64-78 et DUFFAUT François, « Pierre Chevenard (1888-1960) », in : AMIS DU

- VIEUX GUÉRIGNY (éd.), *Marteau Pilon*, vol. 22, Guérigny, octobre 2010, pp. 65-87.
- 12 LE MASSON Pascal, WEIL Benoit, «Fayol, Guillaume, Chevenard – la Science, l'Industrie et l'exploration de l'inconnu: logique et gouvernance d'une recherche conceptive», in: *Entreprises et Histoire* 83, 2016, pp. 79-107. Ici, pp. 88-89.
- 13 DUFFAUT François, TINGAUD Henri, NECTOUX Bernard et DUMAINE Alain, «L'électricité et la métallurgie d'Imphy», in: *Bulletin d'histoire de l'électricité* 33 (1999), pp. 125-136; DUFFAUT François, «La recherche à Imphy entre 1885 et 1914», in: AMIS DU VIEUX GUÉRIGNY (éd.), *Actes du Colloque. La situation du Nivernais en 1900*, Guérigny, octobre 2000, pp. 97-102; DUFFAUT François, «Le nickel: élément clé des spécialités d'Imphy», in: AMIS DU VIEUX GUÉRIGNY (éd.), *Marteau Pilon*, vol. 17, Guérigny, juillet 2005, pp. 73-82; DUFFAUT François, «Imphy: innover pour vivre», in: MUSÉES DE LA NIÈVRE (éd.), *La Nièvre, le royaume des forges. La métallurgie nivernaise. Inventaire des forges et fourneaux de la Nièvre XVII^e-XX^e siècles*, Nevers: Imprimerie Normalisée, 2006, pp. 37-43.
- 14 CH-MIH/CEG-16 à CEG-24: *Charles-Edouard Guillaume, Fleurier – 17 juin 1938. Allocution de P. Chevenard. Document Imphy. Discours prononcé aux obsèques de M. Guillaume à Fleurier, le 17 juin 1938*, 4 p.
- 15 GUILLAUME Charles-Edouard, «L'Invar et l'Elinvar. Conférence Nobel», in: FONDATION NOBEL (éd.), *Les Prix Nobel en 1919-1920*, Imprimerie Royale. P. A. Norstedt & Söner, Stockholm, 1922, 32 p. Voir aussi: THE NOBEL FOUNDATION, «Charles Edouard Guillaume», <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1920/guillaume>.
- 16 DÉRÉ Anne-Claire, DUFFAUT François et DE LIÈGE Gérard, «Cent ans de science et d'industrie», in: BÉRANGER Gérard, DUFFAUT François, MORLET Jean et TIERS Jean-François, *Cent ans après la découverte de l'Invar. Les alliages de fer et de nickel*, Londres; Paris; New York: Lavoisier Tec & Doc, 1996, pp. 3-23; LAMBRET Eric, SAINDRENAN Guy, *Cent ans d'Invar*, Nantes: Laboratoire Génie des matériaux, 1996, 193 p. Ici, pp. 57-78 et LAMBRET Eric, SAINDRENAN Guy, «The Discovery of Invar and the Metallurgical Works of Charles-Edouard Guillaume», in: WITTENAUER Jerry (éd.), *The Invar Effect. A Centennial Symposium*, The Minerals, Metals & Materials Society Warrendale (PA), 1996, pp. 39-47.
- 17 BERNER Georges-Albert, *Dictionnaire professionnel illustré de l'horlogerie*, Bienne: Fédération horlogère suisse, 2002, p. 602.
- 18 *Ibid.*, p. 414.
- 19 ATTINGER Claude, «De Christian Huygens à Charles-Edouard Guillaume. La compensation thermique des horloges et des montres», in: *Chronométrophilia* 25 (1988), pp. 42-80. Ici, p. 68 ss.
- 20 DE-DPMA/Brevet CH14270 (6 mai 1897), CH16678 (15 avril 1898), CH15526 (21 avril 1898) et CH15527 (21 avril 1898). Ces quatre brevets sont tous déposés au seul nom de Paul Perret, privant ainsi le physicien du fruit de ses recherches. En effet, Charles-Edouard Guillaume protège ses découvertes sur les ferronickels le 20 octobre 1898 (CH17746), soit six mois plus tard. Sur les améliorations apportées par Ch.-Ed. Guillaume, avant la création de l'Elinvar, voir encore les brevets CH27952 (5 mars 1903) et CH32895 (8 décembre 1904). Sur le point de vue de Paul Perret lui-même, voir: CH-MIH/CEG-1 à CEG-15: Correspondance de Paul Perret ainsi que: CH-MIH/BAE-24 à BAE-34: *Mémoire descriptif du spiral compensateur par Paul Perret*, Fleurier, 12 septembre 1904, 14 p.
- 21 *L'Impartial*, 1^{er} avril 1904, p. 4 et *La Fédération horlogère suisse [désormais FHS]*, 3 avril 1904, p. 187.
- 22 OBSERVATOIRE CANTONAL DE NEUCHÂTEL (éd.), *Étude sur le spiral-compensateur Paul Perret comparé avec les spiraux en acier trempé, Palladium et non-magnétiques durci en bronze blanchi*, Fleurier: Imprimerie et lithographie Montandon, 1901, 12 p. et SOCIÉTÉ DES FABRIQUES DE SPIRAUX RÉUNIES S.A. (éd.), *Deuxième étude sur le spiral compensateur breveté de Paul Perret, fabriqué par la Société des Fabriques de Spiraux Réunies*, La Chaux-de-Fonds: Imprimerie Nouvelle W. Graden, 1907, 5 p.
- 23 DE-DPMA/Brevet CH82081 (4 juin 1918), déposé collectivement aux noms de Charles-Edouard Guillaume et de la Société suisse des Fabriques de spiraux réunies à La Chaux-de-Fonds.
- 24 VEYRASSAT Béatrice, «De la protection de l'inventeur à l'industrialisation de l'invention: le cas de l'horlogerie suisse, de la fin du 19^e siècle à la Seconde Guerre mondiale», in: *Société suisse d'histoire économique et sociale*, 17 (2001), pp. 367-383. Ici, pp. 375-376. Voir aussi: VEYRASSAT Béatrice, «Aux sources de l'invention dans l'Arc jurassien. Une approche par les brevets», in: BELOT Robert, COTTE Michel, LAMARD Pierre (dir.), *La technologie au risque de l'histoire*, Belfort-Montbéliard; Paris: Université de Technologies de Belfort-Montbéliard (UTBM), 2000, pp. 69-76.
- 25 DE-DPMA/Brevet CH14270.
- 26 AMB/Fonds Baehni/Conventions, Statuts, etc, 3-8: *Convention entre Monsieur Ch. Ed. Guillaume, Directeur au Bureau international des poids et mesures à Sèvres d'une part et la Société des fabriques de spiraux réunies, ayant son siège à La Chaux-de-Fonds d'autre part*, 1901, 5 p. Ici, p. 4.
- 27 AMB/Fonds Baehni/Conventions, Statuts, etc, 3-8: *Convention entre Messieurs Ferrier et Vaucher, fabricants de balanciers à Travers d'une part, et la Société des fabriques de spiraux réunies, ayant son siège à La Chaux-de-Fonds d'autre part*, 1901, 4 p. Ici, p. 1.
- 28 CH-MIH/BAE-24 à BAE-34: *Réflexions sur l'industrie du spiral. Conférence tenue en 1936 par Gustave Ulrich au Rotary de La Chaux-de-Fonds*, 8 p. Ici, p. 6.
- 29 Un inventaire systématique de ses articles parus dans les périodiques suisses et étrangers manque toujours à l'heure actuelle. Pour la Suisse, un rigoureux travail de dépouillement reste à faire dans la *Revue internationale de l'horlogerie* [désormais *RIH*], la *FHS* et le *Journal suisse d'horlogerie* [désormais *JSH*]. Quelques pistes sont à suivre: «Recherches sur les aciers au nickel et leurs applications à l'horlogerie et à la chronométrie», in: *FHS*, 15 novembre 1903, pp. 591-592; «Recherches sur les aciers au nickel et leurs applications à l'horlogerie et à la chronométrie II», in: *FHS* 19 novembre 1903, pp. 599-600; «Quelques métaux précieux pour l'horlogerie: le platine, l'invar et l'élinvar», in: *RIH* 1^{er} décembre 1930, pp. 268-269. Voir aussi: SANDS J. W., «Invar, Elinvar and Related Iron-Nickel Alloys», in: *Metals & Alloys* (1932), juin, pp. 130-135 et p. 150. et SANDS J. W., «Invar, Elinvar and Related Iron-Nickel Alloys», in: *Metals & Alloys* (1932) juillet, pp. 159-165.
- 30 Même remarque que précédemment. Voir: JAQUEROD Adrien, «Charles-Edouard Guillaume: 1861-1938», in: *Bulletin de la Société neuchâteloise des sciences naturelles* 63 (1938), pp. 85-96. Ici, pp. 93-96.
- 31 *Feuille officielle suisse du commerce* [désormais *FOSC*], 1901, p. 1122.
- 32 *FOSC*, 1902, p. 1839.

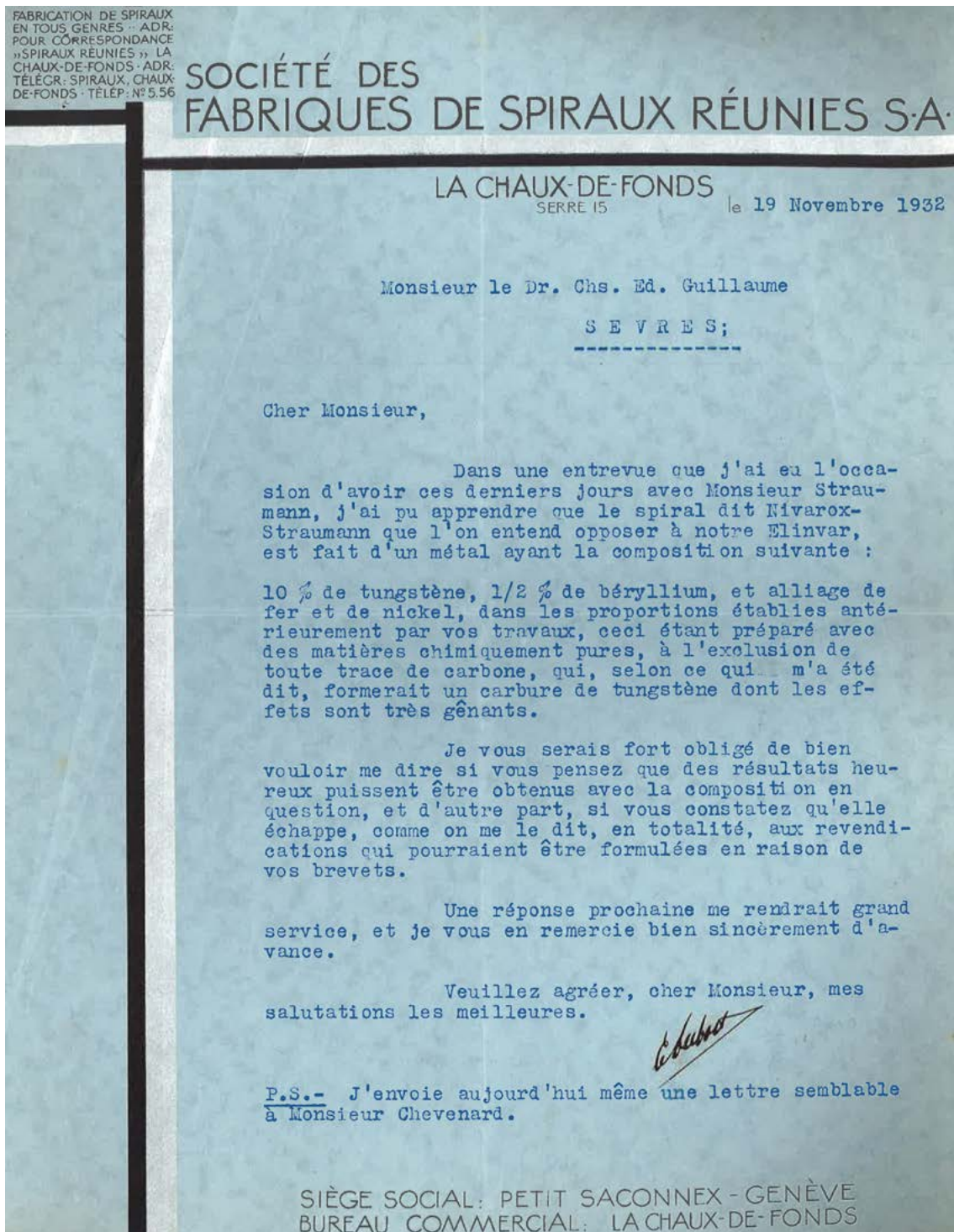


Fig. 5: Lettre des FSR à Charles-Edouard Guillaume (19 novembre 1932)⁶⁶.

33 FHS, 21 juillet 1901, p. 326.

34 ZÜRCHER, Christoph, «Baehni, Paul», in: *Dictionnaire historique de la Suisse (DHS)*, version du 21.12.2001, traduit de l'allemand. Online: <https://hls-dhs-dss.ch/fr/articles/029838/2001-12-21>, consulté le 30.06.2019.

35 CH-MIH/BAE-35 à BAE-43: *Lettre de Paul Baehni à Th. Renfer*, le 3 janvier 1968, 2 p.

36 BOILLAT Johann, *Les véritables maîtres du Temps. Le cartel horloger suisse (1919-1941)*, Neuchâtel: Alphil-Presses universitaires suisse; La Chaux-de-Fonds: L'Homme et le Temps, 2014, p. 637.

37 BENCIVENGO Yann, *La société Le Nickel. Une entreprise au cœur de la naissance de l'industrie du nickel (1880-1914)*, Paris, 2010, 3 volumes. Ici, vol. 1, p. 263 et pp. 418-419; BENCIVENGO Yann, *Nickel. La naissance de l'industrie calédonnienne*, Tours: Presses Universitaires François-Rabelais, 2014, 470 p. Ici, pp. 53-54.

38 CH-MIH/CEG-1 à CEG-15: *Lettre de la Fabrique des Spiraux Réunies, La Chaux-de-Fonds à Charles-Edouard Guillaume, Sèvres*, 16 janvier 1907, 2 p. Ici, p. 2.

- 39 CH-MIH/CEG-1 à CEG-15: *Lettre de la Fabrique des Spiraux Réunies, La Chaux-de-Fonds à Charles-Edouard Guillaume, Sèvres, 8 février 1907, 4 p.* Ici, p. 2.
- 40 DE-DPMA/Brevet CH54715, CH54876 et CH54877 (20 février 1911). Voir encore: DE-DPMA/Brevet CH89576 (21 mai 1920), déposé au seul nom des Fabriques de spiraux réunies à La Chaux-de-Fonds; GUILLAUME Charles-Edouard, «Notice sur les aciers au nickel et leurs applications à l'horlogerie», in: GROSSMANN Jules, GROSSMANN Hermann, *Horlogerie théorique*, Bienne: E. Magron, 1911, vol. 2, pp. 361-414 et CHEVENARD Pierre, *Nouveaux alliages de type élinvar pour spiraux de chronomètres*, La Chaux-de-Fonds: Fabriques de spiraux réunies, 1938, 59 p.
- 41 ATTINGER Claude, «De Christian Huygens à Charles-Edouard Guillaume. La compensation thermique des horloges et des montres», in: *Chronométriphilia* 25 (1988), pp. 42-80. Ici, p. 57 ss.
- 42 DE-DPMA/Brevet CH82081 (4 juin 1918), déposé collectivement aux noms de Charles-Edouard Guillaume et de la Société suisse des Fabriques de spiraux réunies à La Chaux-de-Fonds.
- 43 ANONYME, «Reinhard Straumann», in: *Personenlexikon des Kanton Basel-Landschaft*, version d'origine en allemand. Online: https://personenlexikon.bl.ch/Reinhard_Straumann, consulté le 30.06.2019.
- 44 STRAUMANN Reinhard, «Eine monometallische Kompensationsuhr», in: *Deutsche Uhrmacher Zeitung* 31 (1928), pp. 569-570.
- 45 PASQUIER Hélène, «Uhren, Kompass und elektrische Zähler. Longines, 1910-1925», in: ROSSFELD Roman, STRAUMANN Tobias (éd.), *Der vergessene Wirtschaftskrieg. Schweizer Unternehmen im Ersten Weltkrieg*, Zürich: Chronos, 2008, pp. 151-169; TRÉDÉ Monique, *Électricité et électrification dans le monde 1880-1980. Actes du deuxième Colloque international d'histoire de l'électricité*, Paris: PUF, 1992, 561 p. et JÄGER Kurt (éd.), *Alles bewegt sich: Beiträge zur Geschichte elektrischer Antriebe*, Berlin: VDE, 1998, 222 p.
- 46 CH-MIH/BAE-35 à BAE-43: *Lettre de Paul Baehni à Th. Renfer*, le 3 janvier 1968, 2 p.
- 47 BOILLAT Johann, «Birth of a Military Sector. The Case of the International Beryllium Industry (1919-1939)», in: GARUFO Francesco et MOREROD Jean-Daniel (éd.), *Laurent Tissot, une passion loin des sentiers battus*, Alphil: Neuchâtel, 2018, pp. 41-64.
- 48 ILLIG Kurt, FISCHER Hellmuth, «Beryllium», in: ENGELHARDT Victor (éd.), *Handbuch der Technischen Elektrochemie*, Leipzig, 1934 (III), pp. 415-476. Ici, pp. 470-472.
- 49 *Deutsche biographische Enzyklopädie* 9 (2008), p. 713.
- 50 «Man darf ihnen eine bedeutende technische Zukunft prophezeien. Schon heute werden aus ihnen mechanisch und chemisch besonders widerstandsfähige Federn hergestellt»: STOCK Alfred, «Beryllium», in: *Zeitschrift für angewandte Chemie* 42 (1929), pp. 637-639. Ici, p. 639.
- 51 ILLIG Kurt, «Beryllium, ein neuer Werkstoff», in: *Siemens Jahrbuch*, 3 (1929), pp. 535-543.
- 52 KEIL Wilhelm, «Biographie Reinhard Straumann», in: AMREIN Werner (et al.), *Fortschritte der Uhrentechnik durch Forschung. Festschrift für Herrn Dr.-Ing. Ehrenhalber Reinhard Straumann*, Stuttgart, 1952, pp. 1-16 et KERSTEN Martin, «Die Nivarox-Spiralfeder im Lichte der physikalischen Theorien des Ferromagnetismus», in: AMREIN Werner (et al.), *Fortschritte der Uhrentechnik durch Forschung. Festschrift für Herrn Dr.-Ing. Ehrenhalber Reinhard Straumann*, Stuttgart, 1952, pp. 51-67.
- 53 BOILLAT Johann, «Le béryllium des horlogers» [à paraître].
- 54 ROHN W., «Die Entwicklung der Heraeus-Vacuumschmelze A.-G. 1923-1933», in: HERAEUS-VACUUMSCHMELZE-AKTIEGESELLSCHAFT (éd.), *Die Heraeus-Vacuumschmelze Hanau am Main 1923-1933*, Hanau am Main, 1933, pp. 1-73.
- 55 DE-DPMA/Brevet DE578390 (19 avril 1931), DE585151 (5 décembre 1931) et DE649811 (14 décembre 1935). Pour le marché suisse, les brevets correspondants sont respectivement les suivants: CH160798 (9 avril 1932), CH166535 (28 novembre 1932) et CH196408 (26 novembre 1936).
- 56 STRAUMANN Reinhard, «Le spiral Nivarox un nouveau spiral compensateur», in: *Bulletin de la Société Suisse de Chronométrie*, 1932, pp. 37-38; STRAUMANN Reinhard, «Les alliages de Béryllium», in: *FHS*, 28 septembre 1932, pp. 371-373; STRAUMANN Reinhard, «Alliages de Béryllium pour l'industrie horlogère», in: *FHS*, 1^{er} février 1933, p. 39; STRAUMANN Reinhard, «Les alliages au Béryllium (Glucinium) comme matière première pour l'industrie horlogère», in: *FHS*, 6 novembre 1935, p. 274; STRAUMANN Reinhard, «Du Nivarox. Sa création, ses propriétés», in: *JSH 7-8* (juillet-août 1936), pp. 25-29; STRAUMANN Reinhard, «L'effet compensateur du spiral Nivarox et sa dépendance des propriétés mécanique et ferro-magnétique de l'alliage», in: *Bulletin de la Société Suisse de Chronométrie*, 1937, pp. 21-23. Voir encore: DITTSHEIM Paul, *Le spiral réglant et le balancier depuis Huygens à nos jours*, Lausanne: JSH, 1945, 117 p. et GUYOT E., «La compensation des chronomètres avec le spiral Nivarox», in: *Bulletin de la Société Suisse de Chronométrie et du Laboratoire suisse de recherches horlogères* 3 (1951), pp. 116-118.
- 57 DE-DPMA/Brevet DE578390.
- 58 BOILLAT Johann, *Les véritables maîtres du Temps. Le cartel horloger suisse (1919-1941)*, Neuchâtel: Alphil-Presses universitaires suisse; La Chaux-de-Fonds: L'Homme et le Temps, 2014, 768 p.
- 59 CH-MIH/CEG-1 à CEG-15: *Lettre de la Fabrique des Spiraux Réunies, La Chaux-de-Fonds à Charles-Edouard Guillaume, Sèvres, 14 octobre 1932, 2 p.* Ici, p. 2.
- 60 CH-MIH/CEG-1 à CEG-15: *Lettre de la Fabrique des Spiraux Réunies, La Chaux-de-Fonds à Charles-Edouard Guillaume, Sèvres, 6 janvier 1933, 2 p.* Ici, pp. 1-2.
- 61 BOILLAT Johann, «Contrôler la dissidence: naissance et évolution du cartel horloger suisse (1931-1941)», in: MÜLLER Margrit, SCHMIDT Heinrich, TISSOT Laurent (éd.), *Regulierte Märkte: Zünfte und Kartelle*, Zürich: Chronos, 2011, pp. 261-274. Ici, pp. 268-269.
- 62 CH-MIH/BAE-6 à BAE-23: *Convention entre M. Reinhard Straumann, Waldenbourg, d'une part et la Société des Fabriques de Spiraux Réunies, Genève, d'autre part*, La Chaux-de-Fonds, le 10 octobre 1945, 2 p.
- 63 STRAUMANN Reinhard, «Les alliages au Béryllium (Glucinium) comme matière première pour l'industrie horlogère», in: *FHS*, 6 novembre 1935, p. 274.
- 64 CH-MIH/BAE-35 à BAE-43: *Souhaits de bienvenue de M. Th. Renfer, président du Conseil d'administration, à l'occasion du 75e anniversaire de la fondation de la Société des Fabriques de Spiraux Réunies à Genève le 12 juin 1970, 3 p.*
- 65 BOILLAT Johann, «Le béryllium des horlogers» [à paraître].
- 66 Musée International d'Horlogerie – La Chaux-de-Fonds (CH-MIH/CEG 1 à CEG 15).

**L'ATOME DE BERYLLIUM SOURCE
D'ÉNERGIE DU SPIRAL NIVAROX QUI LUI
DONNE SES QUALITÉS EXTRAORDINAIRES**

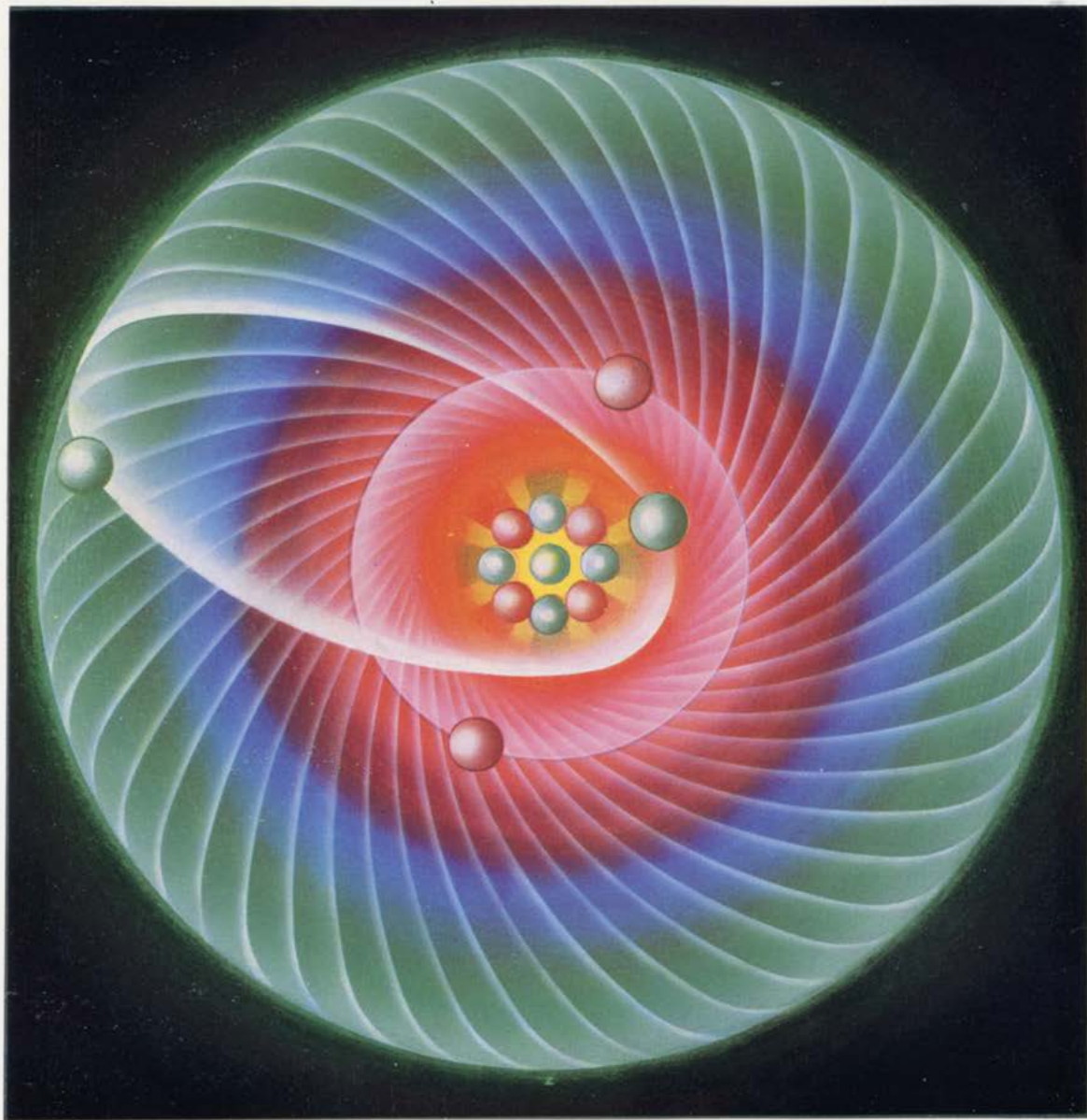


Fig. 6: Mémoires d'Ici, Centre de recherche et de documentation du Jura bernois, *Fonds Nivarox*.