

# Marie Skłodowska Curie métallurgiste

## Étude des propriétés magnétiques des aciers trempés (1894-1897)

Olivier Hardouin Duparc

<b>Résumé</b>	Le premier travail scientifique de Marie Skłodowska Curie, et ses deux premières publications, concernèrent l'étude des propriétés magnétiques des aciers trempés en fonction de leur composition chimique et des conditions de trempage. Ce travail dura trois ans et fut à l'origine de la rencontre entre Marie et Pierre Curie qui était un spécialiste du magnétisme des solides. Les connaissances sur le fer et les aciers étaient à l'époque encore fort incertaines quoique déjà complexes. Marie apprit à manier beaucoup d'échantillons de compositions chimiques variées fournis par plusieurs industriels. Ce sens de l'étude systématique fut providentiel lorsqu'elle décida ensuite d'examiner l'aptitude de différents matériaux à émettre des rayons uraniques.
<b>Mots-clés</b>	<b>Histoire des sciences, Marie Curie, métallurgie, aciers, magnétisme, radioactivité.</b>
<b>Abstract</b>	<b>Marie Skłodowska Curie a metallurgist: her study of magnetic properties of quenched steels (1894-1897)</b> Marie Skłodowska Curie's first scientific work, and her first two papers, dealt with the study of the magnetic properties of quenched steels as a function of their chemistry and their quenching treatment. It lasted three years and was instrumental in her meeting Pierre Curie, then a specialist in solid state magnetism. Knowledge of iron and steels, although already complicated was still far from perfect. Marie learned to use many samples of different chemistry provided by several manufacturers. This sense of systematic study proved essential when she started to investigate the possible emission of uranic rays by various materials.
<b>Keywords</b>	<b>History of science, Marie Curie, metallurgy, steels, magnetism, radioactivity.</b>

**M**arya Skłodowska, née le 7 novembre 1867 à Varsovie, arrive à Paris en septembre 1891, chez sa sœur Bronia qui y avait terminé ses études de médecine<sup>(1)</sup> grâce à l'argent gagné par Marya comme gouvernante les années précédentes (de 1886 à 1889, chez les Zorawski à Szczuki, à 80 km au nord de Varsovie). Marya/Marie Skłodowska s'inscrit à la Sorbonne. Deux ans plus tard, en juillet 1893, elle est reçue major à 26 ans à la licence ès sciences physiques. Elle aura eu entre autres Paul Appell, Edmond Bouty, Joseph Boussinesq, Henri Poincaré et Gabriel Lippmann comme professeurs. En juillet 1894, elle est reçue seconde à la licence ès sciences mathématiques. Durant cette année, Gabriel Lippmann l'accueille dans le Laboratoire des recherches physiques qu'il a transféré dans les nouveaux bâtiments de la Sorbonne.

### Premiers travaux sur les aciers

Sa première expérience dans un laboratoire date de 1890-1891 à Varsovie, grâce à son cousin Józef Boguski qui avait été l'assistant de Dimitri Mendeleïev. La surdouée qu'elle était y avait aussi appris beaucoup de chimie. Pendant sa licence de mathématiques à Paris, elle entreprend un travail de recherche commandité par la Commission des Alliages pilotée par Henry Le Chatelier avec la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale (SEIN)<sup>(2)</sup>. Ce travail, intitulé « Étude sur les propriétés magnétiques des aciers trempés », avait pour but « *d'étudier l'influence de la composition chimique des aciers sur leurs propriétés magnétiques et la manière dont ces propriétés sont modifiées par les conditions de trempage* »

(voir encadré 1). L'aspect méthodique très sérieux de ce travail est remarquable. Il permit à Marie de rencontrer Pierre, et réciproquement.

Le couple se rencontra en avril 1894 chez les Kowalski. Józef Wierusz-Kowalski était un physico-chimiste polonais qui devint professeur à l'Université de Fribourg cette année là, après avoir fait ses études en Allemagne et en Suisse. Marie avait connu sa nouvelle épouse quand elle était gouvernante en Pologne. Les Kowalski étaient alors juste mariés et en lune de miel à Paris, et Józef Kowalski, qui en profitait pour assister à des réunions de la Société Française de Physique, connaissait Pierre Curie. Les Kowalski organisèrent la rencontre et ce fut le début d'une grande complicité humaine et scientifique<sup>(3)</sup>. Le prétexte naturel était certainement que Marie manquait de place pour entreposer ses échantillons d'aciers, aussi bien dans sa chambre que dans le laboratoire déjà très occupé du professeur Lippmann, et que peut-être Pierre, spécialiste de magnétisme et chef de travaux à l'EmPCI (École municipale de Physique et de Chimie Industrielles de la ville de Paris)<sup>(4)</sup>, pourrait l'aider et lui trouver de la place.

Pierre Curie, né le 15 mai 1859 et donc de huit ans l'aîné de Marie, avait commencé à travailler sur les propriétés magnétiques des corps (y compris le fer) à diverses températures depuis 1891, et c'est d'ailleurs le titre de sa thèse soutenue le 6 mars 1895 où l'on trouve la loi de Curie de la susceptibilité magnétique en  $1/T$  (où  $T$  est la température absolue, voir encadré 2) et le fameux point de Curie ou température au-dessus de laquelle un aimant perd son aimantation (voir encadré 3 p. 107).

**Encadré 1****Études du magnétisme et applications industrielles vers la fin du XIX<sup>e</sup> siècle**

La deuxième moitié du XIX<sup>e</sup> siècle vit le développement de l'électricité industrielle. Le courant électrique est alors généré par des machines magnéto-électriques (des galvanomètres) qui impliquent l'utilisation d'aimants permanents. C'est au sein de la société L'Alliance, société d'appareillages électriques qui commercialisait ces machines, que le belge Zénobe Gramme (1826-1901) développa vers 1867-68 sa dynamo qui génère du courant continu et qui utilise également des aimants.

Dans les machines électriques, les aimants et les noyaux de fer s'échauffent sous l'action des courants électriques, et la force magnétique d'un aimant diminuant sous l'action de la chaleur, cet échauffement est susceptible de perturber le fonctionnement de la machine électrique ou du moteur. Il était donc logique d'étudier ces phénomènes comme le fit Pierre Curie (1859-1906), mais il n'était pas le seul : Jules Jamin (1818-1886), titulaire de la chaire de physique expérimentale à la Sorbonne et directeur du nouveau Laboratoire de recherches physiques créé sous l'égide de l'École Pratique des Hautes Études en 1868, orientera la plupart des recherches menées dans son laboratoire en ce sens (voir [12]). James Alfred Ewing publia en 1891 une monographie de 360 pages, *Magnetic Induction in Iron and Other Metals*. De 1889 à 1896, seul ou avec son collègue Benoît, Charles-Édouard Guillaume (1861-1938) fit varier patiemment et par variation infinitésimale la composition d'alliages d'aciers pour en obtenir un qui ne se dilate pas à température ambiante, destiné à la fabrication d'un mètre étalon, et il découvrit l'Invar (puis l'Elinvar en 1920, si utile à la chronométrie de précision à l'époque). Pierre Curie et Charles-Édouard Guillaume étaient devenus excellents amis depuis leurs rencontres via les réunions de la Société Française de Physique vers 1890. C.-E. Guillaume obtint le prix Nobel de physique en 1920. Le fait qu'il se soit déterminé comme champion d'une science française opposée à la relativité d'Einstein ne peut qu'être regretté et a beaucoup nui à sa réputation. Le comité Nobel récompensa Albert Einstein en 1921.

Pierre et Marie se marièrent le 26 juillet 1895. Marie Curie fut reçue major à l'agrégation des jeunes filles en physique le 15 août 1896 ; elle termina son travail sur les aciers à la fin de l'été 1897 et mit au monde sa fille Irène (future prix Nobel de chimie en 1935) le 12 septembre, accouchée par le père de Pierre, médecin de son état. Elle rédigea ensuite deux publications : une communication de trois pages présentée lors de la séance hebdomadaire de l'Académie des sciences du lundi 27 décembre 1897 [1], et une étude plus longue, d'une quarantaine de pages, publiée en janvier 1898 dans le bulletin de la SEIN ([2], reproduite dans [3]) – elle donna une partie de l'argent qu'elle reçut de la SEIN à l'organisme polonais qui lui avait octroyé une bourse quatre ans plus tôt.

Cette étude sera reprise *verbatim* dans un livre, *Contribution à l'étude des alliages*, publié en 1901 et où on trouve aussi des contributions d'Henry Le Chatelier, Georges Charpy, Floris Osmond, Charles Édouard Guillaume, William Chandler Roberts-Austen, Hendrik Willem Bakhuis-Roozeboom et de quelques autres. Lorsque Marie mentionne, vers la toute fin de son rapport pour la SEIN, la nécessité « d'examiner l'action possible du temps, modifiant lentement les propriétés de l'aimant à partir du moment où cet aimant a été constitué », il est émouvant de la voir regretter de n'avoir sur ce sujet « que quelques expériences incomplètes et de trop courte durée » en précisant des mesures avec des dates qui vont de la fin juillet jusqu'au 17 septembre 1897, lorsque l'on sait qu'elle accoucha de sa fille Irène le 12 septembre. Fin juillet-début août, Marie était à l'hôtel des Roches Grises à Port-Blanc avec son père Władysław Skłodowski venu passer quelques jours

**Encadré 2****De la mesure des températures élevées en métallurgie**

Les mesures de températures élevées se faisaient grâce aux thermocouples développés par Henry Le Chatelier (couple platine et platine-rhodium (~ 10 % de la masse)) à partir de 1885. L'histoire des thermocouples remonte à Thomas Johann Seebeck, Jean-Charles Peltier, et de nombreux autres comme Leopoldo Nobili et Macedonio Melloni. Antoine-César Becquerel, père d'Edmond et grand-père d'Henri, fut le premier, en 1826, à développer un thermocouple pour mesurer des hautes températures, celles de la « zone bleue » d'une flamme (donc quelques centaines de degrés Celsius).

Ce type de thermomètre est basé sur le fait que dans les métaux, les propriétés de conductibilités électriques et thermiques sont contrôlées par les électrons et donc fortement couplées, de manière forcément différente d'un métal à un autre. L'utilisation d'un couple de fils métalliques ayant des propriétés de conductibilité thermo-électrique voisines mais différentes permet de déduire des écarts de température en mesurant des forces électromotrices.

On sait aujourd'hui qu'en principe le thermocouple de Le Chatelier fonctionne de manière stable et précise jusque vers 1 700 °C : le platine fond à 1 768 °C à pression ambiante et l'alliage platine-rhodium (~ 10 % de la masse) à 1 830 °C (température de solidus). En 1889, le métallurgiste et chimiste britannique William-Chandler Roberts-Austen l'utilisait avec bonheur jusque vers 1 000 °C et même au-delà. Le métallurgiste américain Henry Marion Howe saluait à la même époque ce thermocouple de Le Chatelier, qui permettait des avancées considérables pour la recherche et l'industrie sidérurgique (le fer et les aciers) et métallurgique en général. Henry Le Chatelier créera la *Revue de Métallurgie* en 1904.

Rappelons aussi que le point de Curie du fer pur est à 768 °C et que la température de transformation en phase  $\gamma$  (cubique à faces centrées) est 910 °C. Marie Skłodowska Curie précise (en p. 45 de son deuxième article [2]) qu'elle a gradué un couple Le Chatelier entre le point d'ébullition du soufre, 445°, et le point de fusion de l'or, 1 050°, et a supposé qu'entre ces deux températures, la déviation variait linéairement avec la température.

de vacances en France pour voir sa fille et la forcer à se reposer (il est intéressant de noter que Port-Blanc est une station balnéaire bretonne sise sur les Côtes d'Armor, pas très loin de l'Arcouest qu'elle fréquentera plus tard, à partir de 1910 en compagnie de ses deux filles, avec les Perrin et beaucoup d'autres savants).

Pendant ce temps, Pierre était resté à Paris ; il avait sans doute des examens à corriger, sa mère était très malade (atteinte d'un cancer du sein, elle décèdera le 27 septembre) et il menait un travail qui lui tenait à cœur sur la croissance des cristaux<sup>(5)</sup>. C'est certainement lui qui fit quelques mesures de champ magnétique pour son épouse, au moins jusqu'au 2 août d'après les indications de relevés dans l'article. Pierre rejoignit Marie à Port-Blanc début août et ils essayèrent d'aller en bicyclette jusqu'à Brest (voir *photo p. 106*). L'état avancé de grossesse de Marie ne lui permit bien sûr pas cet exploit et ils durent écourter ce voyage et regagner Paris où Marie mit au monde leur première fille. On trouve dans l'article des mesures datées du 8 septembre et d'autres des 16 et 17 septembre.

Dans son introduction, Marie remercie bien sincèrement M. le professeur Le Chatelier, dont l'aide et les conseils ont été précieux. Elle prend également soin de remercier les directeurs des différents établissements industriels qui lui ont procuré des barres d'aciers pour son travail. Elle a étudié deux groupes d'aciers, des aciers relativement purs et des aciers spéciaux, dont elle précise à chaque fois la provenance :

Photo des Archives Curie, Association Curie-Joliot-Curie, DR.



Pierre et Marie Curie dans le jardin de la maison des parents de Pierre à Sceaux en 1895, en départ pour leur voyage de noce avec leurs bicyclettes modernes munies de pneumatiques, de roues de taille égale et à rayons, d'un cadre et d'une transmission par chaîne à rouleaux. Les cadres, les rayons et les chaînes sont en acier.

Les années 1890 sont l'âge d'or de la bicyclette qui a contribué à une évolution sociale importante en permettant des loisirs abordables et en étant à l'origine de la création d'une mode de vêtements comme les jupes-pantalons qui ont aidé les femmes à se libérer du corset et d'autres vêtements contraignants.

des aimants sous l'action des perturbations magnétiques croît aussi avec la grandeur du champ coercitif. Enfin l'expérience montre qu'il en est de même de la stabilité du magnétisme rémanent sous l'influence des secousses et des trépidations. »

Le principal résultat de son travail est que parmi les barres d'acier qui lui ont été fournies par les industriels, si elle (re)trouve le rôle favorable du tungstène, qui était déjà connu et utilisé (observé et publié par John Hopkinson (1849-1898) en 1886, [4]), elle trouve que le molybdène a un rôle plus favorable encore<sup>(6)</sup>. Elle conclut d'ailleurs clairement sa communication de 1897 à l'Académie des sciences ainsi : « Les aciers employés actuellement pour la construction des aimants permanents sont des aciers au tungstène. On voit que les aciers au molybdène pourraient également être utilisés davantage. » (voir la reproduction de son tableau ci-dessous).

Dans son rapport détaillé, Marie mentionne la « température de transformation magnétique » : « Quand on chauffe le barreau à une certaine température le magnétisme induit tombe rapidement à une valeur très faible. Cette température est celle de la transformation magnétique. » Dans ce paragraphe, elle ne se réfère pas au travail de son mari paru dans les *Annales de chimie et de physique* en 1895, ni aux travaux de John Hopkinson que son mari cite quant à lui (voir encadré 3). Mais rappelons qu'il s'agit plus d'un rapport d'étude que d'un travail de thèse, que le devoir de citations n'était pas aussi systématique à l'époque qu'aujourd'hui, que l'auteure venait d'être mère, et qu'il n'était peut-être pas indispensable de citer Pierre Curie quand on s'appelle Mme Skłodowska Curie.

Dans son rapport, elle parle aussi de la trempe de ces aciers : « Pour prendre la trempe, l'acier doit être trempé quand il est à l'état faiblement magnétique à haute température. » Elle pénètre un domaine complexe qui n'est pas sans lien avec une erreur du grand Floris Osmond (avec Jean Werth), erreur qui a persisté pendant longtemps et qui mélangeait deux problèmes très complexes à son

« J'ai étudié des aciers à divers pourcentages de carbone, ne contenant que de faibles quantités d'éléments autres que le fer et le carbone. Ces aciers sont de diverses provenances : aciers de Firminy, aciers d'Unieux, aciers Bœler de Styrie.

J'ai étudié aussi des aciers spéciaux à divers pourcentages de carbone : au bore, au cuivre, au silicium, au manganèse, au nickel, au tungstène, au molybdène, des usines des Sociétés Châtillon et Commentry, Commentry et Fourchambault ; des aciers au chrome, au tungstène de l'usine d'Assailly ; des aciers au tungstène de l'usine d'Allevard et de la maison Bœler de Styrie.

J'ai déterminé, dans ce travail, le champ extérieur désaimantant pour lequel l'intensité d'aimantation au centre du barreau est nulle, je l'appellerai le champ coercitif du barreau. (...) Le champ coercitif d'un acier joue un rôle prépondérant lorsqu'il s'agit de définir ses qualités pour la construction des aimants. (...) La stabilité

	C pour 100.	T.	H <sub>c</sub> .	I <sub>1</sub> .	I.	I <sub>m</sub> .	Hys.
Aciers au carbone de Firminy.....	0,06	1000	3,4	30	625	1560	28
	0,20	850	11,0	120	770	1590	68
	0,49	770	23	220	835	1525	108
	0,84	770	53	420	605	1230	170
Aciers au carbone Bœler, Styrie {	1,21	770	60	460	645	1200	182
	doux .....	0,70	800	49	420	"	"
	mi-dur .....	0,96	800	56	420	"	"
	extra-tenace dur .....	0,99	800	55	410	"	"
	extra-mi-dur .....	1,17	800	63	460	"	"
Aciers au carbone d'Unieux.....	0,75	770	51	410	"	"	"
	0,83	770	56	440	"	"	"
	0,96	770	58	430	640	1175	165
	1,40	750	61	"	"	"	"
Acier au cuivre de Châtillon et Commentry, Cu = 3,9 pour 100 .....	1,61	750	46	"	"	"	"
	0,87	730	68	490	"	"	"
Aciers au tungstène d'Assailly. {	0,76	850	66	510	800	1240	260
	1,10	830	68	500	"	"	"
Acier au tungstène de Châtillon et Commentry, W = 2,7 pour 100 .....	1,02	800	69	540	"	"	"
Aciers au tungstène {	1,10	850	74	530	"	"	"
	Spécial très dur, W = 2,9 pour 100.....	1,96	"	45	350	"	"
	Bœres non trempé, W = 7,7 pour 100.....	1,96	800	85	370	"	"
Acier d'Allevard, W = 5,5 pour 100 .....	0,59	770	72	560	850	1240	280
	0,51	850	60	530	"	"	"
Aciers au molybdène de Châtillon et Commentry. {	1,24	800	85	530	"	"	"
	Mo = 3,5 pour 100 .....	0,51	850	60	530	"	"
	Mo = 4,0 pour 100 .....	1,24	800	85	530	"	"
Mo = 3,9 pour 100 .....	1,72	800	78	560	"	"	"

Tableau extrait du premier article de Mme Skłodowska Curie [1].

Marie indique la nature chimique des aciers et leur provenance, le pourcentage de carbone (C pour 100), la température de trempe T, le champ coercitif H<sub>c</sub> (champ nécessaire pour désaimanter), diverses intensités d'aimantation I<sub>1</sub>, I et I<sub>m</sub>, et l'hystérèse Hys (qui mesure l'énergie perdue par cycle aimantation-désaimantation, par unité de volume de matière magnétique). On voit sur ce tableau que les aciers au tungstène et les aciers au molybdène ont un champ coercitif élevé. Mais il faut rester prudent, voir<sup>(6)</sup>. Ce premier article de Marie Curie est accessible via Gallica, la bibliothèque numérique de la Bibliothèque nationale de France ([gallica.bnf.fr/ark:/12148/cb343481087/date](http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/cb343481087/date)).

**Encadré 3****Sur quelques apports scientifiques de Pierre Curie**

John Hopkinson (1849-1898) avait parlé de « critical temperature » en 1889, mais son fer n'était pas pur et ce qu'il avait observé implique des changements de structures cristallographiques. William Gilbert (1540-1603) avait déjà fait des observations similaires dans son *De Magnete*. Les études systématiques et précises de Pierre Curie justifient l'appellation de température, ou point, de Curie. En 1894, Pierre avait publié *Sur la symétrie dans les phénomènes physiques, symétrie d'un champ électrique et d'un champ magnétique*, où l'on trouve les principes de (dis)symétrie de Curie : c'est la dissymétrie qui crée le phénomène. En 1880, il avait découvert l'effet piézoélectrique direct avec son frère aîné Jacques (1855-1941), dans le Laboratoire de minéralogie de Charles Friedel (1832-1899, co-fondateur de la Société Chimique de France) où ils travaillaient alors tous les deux. Jacques Curie avait beaucoup travaillé sur l'effet pyroélectrique, sous la direction de Charles Friedel dont il était doublement lointain cousin. En 1881, Gabriel Lippmann fit remarquer que l'effet piézoélectrique inverse devait également exister, ce que Jacques et Pierre vérifièrent immédiatement. C'est la même année que Wilhelm Gottlieb Hankel suggéra l'utilisation du terme piézoélectricité (du grec *piezein* : comprimer, presser), ce qui n'est pas sans rappeler « l'électricité de pression » de René Just Haüy, qui ne pouvait cependant pas être de la piézoélectricité puisque Haüy l'observa sur de la calcite, le spath d'Islande, qui n'est pas piézoélectrique. Jacques et Pierre Curie utilisèrent la piézoélectricité du quartz pour concevoir, avec l'infatigable constructeur d'instruments J.C. Bourbouze, un électromètre très précis, et Pierre l'améliora encore jusqu'à pouvoir mesurer la conductibilité électrique acquise par l'air sous l'influence d'une substance radioactive de manière quantitative, ce qui permit à Marie d'aller au-delà des résultats de Becquerel (et de Kelvin qui s'y intéressa aussi, mais Marie était plus jeune et était l'épouse du concepteur de l'électromètre avec quartz).

époque : (i) le fer change-t-il de structure, de phase, à la température de transformation magnétique ?, et (ii) quelles sont les conditions de durcissement (mécanique) des aciers par trempe ? C'est ce que l'on appelle la controverse du fer  $\beta$  et la querelle allotropistes/carbonistes au sujet du durcissement des aciers. Ces deux problèmes distincts avaient en outre été malheureusement pensés de manière interdépendante à l'époque (voir [5-6]).

On comprend que Marie ait trouvé le sujet de la métallurgie et du magnétisme très compliqué (voir *encadré 4*), et surtout déjà passablement occupé par de grands savants : les auteurs réunis dans *Contribution à l'étude des alliages* (voir plus haut) auxquels il faut ajouter, sans être exhaustif, John Hopkinson, Alfred Ewing, Emil Warburg, Lord Kelvin, Hantaro Nagaoka, Carl Barus, Vincenc Strouhal et Pierre Weiss.

**Des aciers à la radioactivité**

Or en cette période, depuis fin 1895-début 1896, on parlait de plus en plus de nouveaux rayons : les rayons X de Wilhelm Röntgen, les rayons de lumière noire de Gustave Le Bon, les rayons uraniques d'Henri Becquerel<sup>(7)</sup>... Parmi ces rayons, ceux de Becquerel semblaient les moins intéressants. De fait, Becquerel lui-même avait peu écrit sur son propre sujet : après ses sept articles de 1896, il n'en publia que deux en 1897 et aucun l'année suivante. En 1896, hormis les articles de Becquerel, seuls quatre autres furent consacrés au même sujet. En comparaison, les hypothèses du médecin-psychologue-sociologue et scientifique amateur Gustave Le Bon (1841-1931) au sujet de sa « lumière noire » avaient fait l'objet de quatorze articles, et près d'une centaine d'articles parurent

dans les *Comptes rendus de l'Académie des sciences* à propos des rayons de Röntgen (voir [7]).

Marie, en accord avec Pierre, décida de s'attaquer à l'étude des rayons de Becquerel dès la fin 1897 : « *L'étude de ce phénomène nous parut très attrayante* » écrira-t-elle plus tard, « *et cela d'autant plus que la question, entièrement nouvelle, ne comportait aucune bibliographie* » ([8], p. 64).

Forte de son expérience sur les aciers, Marie savait qu'elle devait étudier de manière précise et systématique le maximum de matériaux possible obtenus auprès de ses collègues savants : « *J'ai examiné un grand nombre de métaux, sels, oxydes et minéraux* » [9] et elle précise que si les sels et oxydes proviennent de l'EmPci, l'uranium a été donné par Henri Moissan (1852-1907, prix Nobel de chimie 1906) et plusieurs minéraux de provenance connue lui ont été procurés à partir de la collection du Muséum d'histoire naturelle de Paris par Alfred Lacroix (1863-1948). C'est bien ce qui permit à Marie d'avoir dans sa collection d'échantillons, des minéraux beaucoup plus actifs que l'uranium lui-même : l'oxyde de thorium et la pechblende de Johanngeorgensdadt (ville allemande à la frontière de l'actuelle République tchèque) ou celles de Sankt Joachimsthal (aujourd'hui Jachymov, en République tchèque, tout près de Johanngeorgensdadt) et Pzibram (Przibram ou Příbram, au sud ouest de Prague). Ces deux dernières villes étaient alors en Autriche-Hongrie. Il fallut donc cesser d'appeler uraniques les rayons de Becquerel émis par l'uranium et le thorium. Marie et Pierre introduisirent le nom « radioactivité » et l'adjectif « radioactif » et découvrirent cette même année 1898 deux éléments chimiques nouveaux : le « polonium » (« *du nom du pays de l'un de nous* », [10]) et le « radium » (publié dans un article co-écrit avec Gustave Bémont, chef des travaux de chimie à l'EmPci [11]).

Cette découverte qualitative nouvelle d'éléments chimiques encore inconnus, préluant à la chimie nucléaire, est due à un effort quantitatif double<sup>(8)</sup> : (i) avoir les moyens d'expérimenter de manière précise, ce qu'elle avait grâce à l'électromètre de Pierre, et (ii) expérimenter le maximum possible d'échantillons différents, ce qu'elle avait appris lors de sa première étude (qui lui avait aussi permis de rencontrer Pierre...).

À ces causes, il faut aussi ajouter le facteur chance : si Marie avait choisi d'étudier la lumière noire de Gustave Le Bon, elle n'aurait pas découvert grand chose et, quatrième facteur, il faut aussi tenir compte des qualités de caractère de Marie pour maîtriser les aspects expérimentaux quelles que soient les difficultés dans le petit local qui leur avait été concédé. Les deux derniers facteurs sont relativement accidentels (au sens d'Aristote, *i.e.* non essentiels), alors que les deux premiers sont essentiels.

Ce travail sur les propriétés magnétiques des aciers trempés en fonction de leur composition chimique et des

**Encadré 4****Où l'on (ré-)apprend qu'il y a ferrites et ferrites...**

Attention au vocabulaire : ne pas confondre les ferrites du genre masculin (en principe) qui sont des oxydes ferriques, comme la magnétite, et les ferrites du genre féminin qui sont des aciers de structure cristallographique  $\alpha$ , ferritique (cubique centrée), même si ces deux types de ferrites peuvent être aimantés de façon permanente. De même, on parle d'aimants doux ou durs en fonction de leur force coercitive et cela n'a rien à voir *a priori* avec leurs propriétés mécaniques, sauf qu'il se trouve que les matériaux magnétiques doux (resp. durs) sont en général mécaniquement doux (resp. durs) sous leur point de Curie. Les ferrites masculins sont ferrimagnétiques (Louis Néel, 1948).

conditions de trempe, qui a donné lieu aux deux premières publications de Marie, a donc été pour elle, outre l'opportunité de rencontrer Pierre Curie, une excellente préparation pour ses travaux ultérieurs.

*Pour de multiples discussions et relectures attentives, l'auteur tient à remercier Edmond Amouyal, représentant officiel du Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche pour l'Année internationale de la chimie 2011.*

## Notes et références

- (1) Le mouvement dit du positivisme polonais était très en faveur de l'éducation des femmes à l'égal des hommes. Le père de Marya a été professeur de physique, de mathématiques et de sciences naturelles et sa mère fut directrice d'école.
- (2) Cette société existe toujours. Henry Le Chatelier (1850-1936), chimiste, métallurgiste, spécialiste des plâtres et des ciments, en fut le président de 1903 à 1905.
- (3) Pendant l'été 1886, elle avait vécu une idylle avec l'étudiant mathématicien Kazimierz Zorawski, fils aîné de ses employeurs en Pologne, mais les parents Zorawski s'étaient très fermement opposés à toute idée de tisser des liens avec une domestique. Kazimierz Zorawski (1866-1953) deviendra un grand mathématicien avec des contributions importantes sur les groupes de Lie, la géométrie différentielle et la mécanique des fluides. Cet épisode malheureux joua dans la détermination de Marie à quitter la Pologne.
- (4) Pierre Curie avait pris un poste d'assistant à l'École municipale de Physique et de Chimie Industrielles de la ville de Paris, aujourd'hui ESPCI ParisTech, dès la création de cette dernière en 1882, et il y devint chef de travaux en 1890 et professeur en 1895 (nomination théorique le 7 mars), ce qui lui procurera un meilleur salaire mais pas davantage de place pour travailler malgré la bienveillance du (premier) directeur de l'école à l'époque, Paul Schützenberger, qui autorisa Marie à travailler avec lui (voir Barbo L., *Pierre Curie*, Belin, 1999). Paul Schützenberger (1829-1897) était d'origine alsacienne, comme le père de Pierre Curie.
- (5) Pierre Curie désirait savoir si certaines faces d'un cristal se développent de préférence parce qu'elles ont une vitesse d'accroissement différente ou parce que leur solubilité est différente. Toujours selon Marie Curie ([8], p. 53), « il obtint assez rapidement des résultats intéressants (non publiés), mais dut interrompre ce travail afin de poursuivre des recherches sur la radioactivité [initiées par Marie], et ne put jamais le reprendre, ce qu'il regrettait fréquemment. » Georges Friedel, fils de Charles Friedel, s'intéressera également vers 1924-26 à ce problème où les aspects cinétiques peuvent prédominer les aspects de stabilité thermodynamique. Ces résultats vont au-delà de ce qu'avait publié Pierre Curie en 1885.
- (6) On sait qu'en notation équivalent chrome, le molybdène est deux fois plus alphasagène (stabilisateur de la phase ferritique alpha) que le tungstène, mais cela ne suffit pas comme information et il faut rester prudent quand on essaye d'interpréter des observations d'autrefois faisant intervenir des phénomènes multiphasés très dépendants des contenus en impuretés et des traitements. De nos jours, le tungstène reste l'élément d'alliage des aciers pour les aimants permanents.
- (7) Déjà pressentis en 1857 dans le cadre de ses recherches photographiques par Abel Niepce de Saint Victor (1805-1870) (voir [13]), cousin issu de germain de Nicéphore Niepce (1765-1833).
- (8) Il faut donc parfois du quantitatif pour atteindre du qualitatif. Lord Kelvin, grand admirateur de Pierre Curie et de son électromètre, partageait ce souci : « lorsqu'on ne peut l'exprimer par des nombres, le savoir reste ingrat et peu satisfaisant » (William Thomson (pas encore Lord Kelvin of Largs), *Popular Lectures and Addresses*, Londres, 1889-1891).
- [1] M<sup>me</sup> Skłodowska Curie, « Propriétés magnétiques des aciers trempés », note présentée par Potier A., *C.R. Acad. Sci.*, **1897**, 125, p. 1165 (séance du 27 déc. 1897). Curieusement, cet article n'est pas donné dans les *Œuvres de Maria Skłodowska Curie* [3].
- [2] M<sup>me</sup> Skłodowska Curie, Propriétés magnétiques des aciers trempés, *Bulletin de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale*, janvier **1898**, 3, p. 36, repris dans *Contribution à l'étude des alliages*, Chamerot et Renouard, Paris, **1901**, p. 159.
- [3] *Œuvres de Maria Skłodowska Curie*, recueillies par Irène Joliot Curie et publiées par l'Académie polonaise des sciences pour commémorer le 20<sup>e</sup> anniversaire de la mort de Marie, Panstwowe Wydawnictwo Naukowe, Varsovie, **1954**.
- [4] Hopkinson J., Magnetisation of iron, *Phil. Trans. Roy. Soc. of London*, **1886**, 176, p. 455.
- [5] Cohen M., Harris J.M., The  $\beta$ -iron controversy, *The Sorby Centennial Symposium On The History Of Metallurgy*, C.S. Smith (ed), Gordon and Breach, New York, **1965**, p. 209.
- [6] Chézeau N., *De la forge au laboratoire, naissance de la métallurgie physique (1860-1914)*, Presses universitaires de Rennes, **2004**.
- [7] Badash L., The radioactivity before the Curies, *American Journal of Physics*, **1965**, 33, p. 128.
- [8] Curie M., *Pierre Curie*, Payot, Paris, **1924**.
- [9] M<sup>me</sup> Skłodowska Curie, « Rayons émis par les composés de l'uranium et du thorium », note présentée par M. Lippmann, *C.R. Acad. Sci.*, **1898**, 126, p. 1101 (séance du 12 avril 1898).
- [10] Curie P., Curie M., « Sur une substance nouvelle radio-active, contenue dans la pechblende », note présentée par M. Becquerel, *C.R. Acad. Sci.*, **1898**, 127, p. 175 (séance du 18 juillet 1898).
- [11] Curie P., Curie M., Bémont G., « Sur une nouvelle substance fortement radio-active, contenue dans la pechblende », note présentée par M. Becquerel, *C.R. Acad. Sci.*, **1898**, 127, p. 1215 (séance du 26 déc. 1898).
- [12] Blondel C., Les physiciens français et l'électricité industrielle à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, *Physis. Rivista internazionale di storia della scienza*, **1998**, 35, p. 245.
- [13] Fournier P., Fournier J., Hasard ou mémoire dans la découverte de la radioactivité ?, *Revue d'Histoire des Sciences*, **1999**, 52, p. 51.



**Olivier Hardouin Duparc**

est chercheur CNRS\* et membre du Comité éditorial de la *Revue de Métallurgie*.

\* Laboratoire des solides irradiés, UMR 7642 CNRS/CEA/X, École Polytechnique, F-91128 Palaiseau Cedex.  
Courriel : olivier.hardouinduparc@polytechnique.edu



102 avenue Georges Clemenceau - 94700 MAISONS ALFORT

Tél. : 01 43 53 64 00 - Fax : 01 43 53 48 00

edition@edif.fr - www.edif.fr