

LOUIS NEEL : QUARANTE ANS DE MAGNETISME

Michel Prévot¹ et David Dunlop²

¹ *Laboratoire de Géophysique, Tectonique et Sédimentologie, CNRS et Université de Montpellier 2, 34095 Montpellier Cedex 05, France. Adresse courriel : prevot@dstu.univ-montp2.fr*

² *Geophysics, Department of Physics, University of Toronto, Toronto, Canada M5S 1A7*

C'est en 1928, à l'Institut de Physique de Strasbourg dirigé par Pierre Weiss, que Louis Néel entreprit ses premières recherches en magnétisme. A cette époque, le magnétisme théorique était dominé par la théorie du champ moléculaire de P. Weiss (1907). Selon cette théorie, sous leur température de Curie Θ , les ferromagnétiques pouvaient être considérés comme des paramagnétiques dont les moments magnétiques étaient fortement couplés entre eux par un champ magnétique fictif proportionnel à l'aimantation spontanée de la substance. Au dessus de Θ , la substance devient paramagnétique, l'inverse de la susceptibilité devant alors suivre la loi linéaire de Curie-Weiss. Comme l'intensité du champ moléculaire, de l'ordre d'une centaine de Teslas, ne permettait pas de comprendre pourquoi il est si facile de désaimanter un morceau de fer, P. Weiss avait émis l'hypothèse supplémentaire que la matière était subdivisée en domaines élémentaires dont la direction d'aimantation et les limites pouvaient être modifiés par des champs faibles ou moyens. Mais bien des problèmes se posaient. Un grand nombre de métaux ont une susceptibilité positive, mais indépendante de la température (paramagnétisme constant). Dans les ferrites comme la magnétite, la loi linéaire de Curie-Weiss n'est pas obéie, l'inverse de la susceptibilité variant de manière hyperbolique avec la température. Surtout, et même dans le cas du fer et du nickel, cette courbe ne devient linéaire qu'à une centaine de degrés au-dessus du point de Curie ferromagnétique si bien que l'extrapolation linéaire fournit un second point de Curie, le point de Curie paramagnétique, supérieur d'une dizaine de degrés au premier. Dans un laboratoire tout acquis à la théorie de Weiss, Néel a rapidement développé une vision originale, n'hésitant pas à reprendre des manipulations expérimentales dont les conclusions, conformes à cette théorie, lui paraissaient, à juste titre, discutables. Dès le début de sa carrière son indépendance d'esprit et sa force de caractère se sont imposés.

Néel s'attaque d'abord à l'énigme des deux points de Curie. Weiss avait supposé que le champ moléculaire était uniforme. Or, en 1928, Heisenberg montre que les couplages entre moments magnétiques résultent des actions d'échange entre électrons et qu'elles décroissent exponentiellement avec la distance séparant les atomes. Néel décide alors de substituer au champ moléculaire uniforme de Weiss un champ moléculaire local, défini à l'échelle atomique, et qui varie dans le temps et dans l'espace (Néel, 1957). Mais, plutôt que de recourir à la mécanique quantique, il conserve l'approximation simple de la théorie du champ moléculaire. L'article qu'il publie en 1932, tiré de son mémoire de thèse soutenue la même année, montre toute la fécondité de cette approche (Néel, 1932). Il y démontre que l'agitation thermique produit des fluctuations dans le temps du champ moléculaire local, fluctuations qui permettent d'expliquer la présence des deux points de Curie. Les variations dans l'espace du champ moléculaire sont, elles, la cause de la variation hyperbolique de l'inverse de la susceptibilité observée dans les solutions solides, par exemple la magnétite, au-dessus du point de Curie. Toujours dans le même mémoire, il étudie le cas des interactions négatives, montrant que les fluctuations thermiques conduisent à un paramagnétisme constant aux basses températures. Quelques années plus tard il effectue une étude étendue de la variation des interactions en fonction des distances interatomiques (Néel, 1936a) et reprend d'une manière plus rigoureuse l'étude théorique des substances à interactions négatives (Néel, 1936b). Dans ce dernier article, il considère fondamentalement les substances "antiferromagnétiques" (ou, selon l'expression de l'époque, "à paramagnétisme constant") comme constituées de deux ferromagnétiques entrelacés, correspondant chacun à l'un des sous-réseaux magnétiques, dont l'aimantation spontanée obéit aux équations de l'approximation du champ moléculaire. Il démontre ainsi, de façon plus générale que dans ses travaux antérieurs, que l'ordre antiferromagnétique génère un paramagnétisme constant du zéro absolu jusqu'à une certaine température, maintenant dite de Néel, qui est équivalente à la température de Curie des

ferromagnétiques. Par cet article d'un peu plus d'une page seulement, le quatrième état magnétique ordonné de la matière, l'antiferromagnétisme, ainsi nommé par Bitter en 1939, est découvert.

La guerre marque le terme de cette période, la Faculté des Sciences de l'Université de Strasbourg se repliant en 1939 à Clermont-Ferrand. Néel est affecté à l'Institut Polytechnique de Grenoble, ville où il restera par la suite. En 1946, le CNRS, avec l'appui de l'Université de Grenoble, crée, à sa demande, le "Laboratoire d'Electrostatique et de Physique du métal" dont la direction lui est bien évidemment confiée.

A Grenoble, Néel s'attaqua d'abord à l'interprétation théorique des lois d'aimantation découvertes expérimentalement par Lord Rayleigh en 1887 et restées inexplicables depuis. Une approche simple lui permit de retrouver ces lois pour une substance à multiples domaines et de donner une interprétation physique du diagramme de Preisach-Néel (Néel, 1942, 1943). Il s'intéresse ensuite en particulier au rôle des champs démagnétisants internes, ou champs de dispersion, dus à des déviations locales de la direction de l'aimantation spontanée ou à l'effet des inclusions. Il montre que des inclusions non magnétiques, lorsqu'elles sont de taille suffisante, donnent naissance à de nouveaux domaines élémentaires en fer de lance, maintenant appelés "Néel's spikes" (Néel, 1944a). Dans un article qu'il considère comme l'un des plus originaux qu'il ait jamais écrit (Néel, 1991), supposant nuls les champs de dispersion, il démontre que différents modes d'aimantation peuvent être reconnus, selon le nombre de phases magnétiques présentes (Néel, 1944b). Cette approche lui permet de préciser, pour la première fois sur des bases théoriques, la forme et les dimensions des domaines élémentaires. Il jette alors les fondements d'une nouvelle théorie générale du champ coercitif (Néel, 1946) basée sur l'existence de fluctuations dans la direction ou l'intensité de l'aimantation spontanée à l'intérieur des domaines. Ces fluctuations sont provoquées, en direction, par les perturbations élastiques du réseau, en intensité, par les inégalités de composition chimique ou par la présence d'inclusions ou de cavités. Il montre que l'énergie des champs de dispersion résultant de ces fluctuations joue un rôle fondamental dans la propagation de la paroi. Les résultats obtenus dans le cadre de cette théorie rendent bien compte des valeurs du champ coercitif de nombreux alliages. Dans un autre article (Néel, 1948b), il montre que les champs de dispersion jouent également un rôle important dans l'approche à saturation de l'aimantation.

Néel a toujours été très attentif aux applications du magnétisme, notamment en sciences de la terre. Dès 1931, lors d'un séjour à l'Institut et à l'Observatoire de Physique du Globe de Clermont-Ferrand, dont il envisageait de prendre la direction, il prend connaissance des observations de Bruhnes vers 1900 établissant l'existence, au sommet du Puy de Dôme, de laves dont l'aimantation rémanente est inversée. Il juge ce phénomène "passionnant" (Néel, 1991), et envisage une investigation approfondie, avec de nouveaux moyens en matériel et en personnel. Malheureusement, manquant d'arguments pour justifier une demande de crédits importants, il décide finalement d'abandonner la géophysique pour retourner à Strasbourg. Cependant l'explosion du magnétisme des roches et du paléomagnétisme après la guerre, avec notamment, en France, les travaux d'Emile Thellier, ne pouvait manquer d'attirer son attention. En 1947, il établit que le fer en grains de taille inférieure à 32 nm est monodomaine et fortement coercitif (Néel, 1947). C'est dans les Annales de Géophysique qu'il publie, deux ans plus tard, son mémoire fondamental sur le magnétisme des grains monodomaines (Néel, 1949), s'attachant en particulier à interpréter quantitativement les résultats expérimentaux de Thellier et de ses élèves. Etudiant l'effet des fluctuations thermiques, il découvre l'état monodomaine superparamagnétique, fixant à 16 nm pour le fer la limite avec l'état monodomaine magnétiquement stable. C'est l'énergie considérable due à ces fluctuations qui explique que le faible champ magnétique terrestre parvienne à s'imprimer dans les roches par l'intermédiaire de grains dont le champ coercitif peut lui être plus de 1000 fois supérieur. La notion de temps de relaxation, si fondamentale en géologie, est calculée; Néel montre en particulier qu'un modeste doublement de la taille de ces grains multiplie par 10^{10} le temps de relaxation. Les propriétés des aimantations thermorémanente (totale et partielle), isotherme et visqueuse sont étudiées en détail; mais aussi l'effet des traitements, thermiques et par champs alternatifs, bien que ce dernier n'était alors pas encore pratiqué. Et, parce que sa théorie est éminemment vérifiable par des expériences simples, il suggère aux magnéticiens des roches l'objectif de déterminer la distribution des volumes et des champs coercitifs microscopiques des grains magnétiques présents dans les roches. Ce sera, deux dizaines d'années plus tard, le sujet de thèse de l'un d'entre nous (Dunlop, 1968). En 1951, Néel émet l'hypothèse que les renversements de l'aimantation des roches pourraient ne pas refléter des inversions géomagnétiques (Néel, 1951b). Pour

les laves, l'autoinversion de l'aimantation pourrait se produire pendant le refroidissement, par interaction magnétostatique entre deux phases ou par renversement de l'aimantation spontanée d'une phase unique. Pour les sédiments, et éventuellement certaines laves, l'altération chimique du minéral magnétique au cours du temps pourrait aboutir au même résultat. Quelques mois plus tard, Nagata et ses collègues découvrent en effet qu'une lave du Mont Haruna acquiert, au laboratoire, une thermorémanence inversée par rapport au champ appliqué. D'autres (rares) exemples sont maintenant connus, mais le mécanisme actuellement invoqué est généralement différent de ceux initialement proposés par Néel. En 1955, Néel publie en anglais, ce qui est très exceptionnel, un article de synthèse destiné aux magnéticiens des roches. Il y décrit l'essentiel des propriétés des ferrimagnétiques, ainsi que celles des grains monodomaines et polydomaines; seul point vraiment nouveau, il propose pour ces derniers la première théorie de l'aimantation thermorémanente (Néel, 1955).

La théorie de Néel (1949) indique que le traînage magnétique des grains monodomaines est dû aux fluctuations thermiques. Dans les substances massives, Néel reconnaît deux types de traînage (Néel, 1951a). Le premier est de même nature que celui des grains fins. Il a son origine dans les fluctuations thermiques qui aident les parois de séparation entre les domaines à franchir les obstacles s'opposant à leur propagation. Néel représente cet effet par un "champ de traînage" qui croît avec le logarithme du temps. L'intensité de l'ARV est alors, selon lui, égale au produit de ce champ par la susceptibilité différentielle irréversible. Le second traînage, dit de diffusion (Néel, 1952), résulte de la redistribution d'atomes étrangers non magnétique à l'intérieur du réseau cristallin, suite à la modification, par le champ appliqué, de la direction de l'aimantation spontanée. A la différence du précédent, il ne se manifeste que dans un intervalle de température limité.

De l'avis de Néel (1991), ce sont ses travaux sur les ferrites spinelles qui, de beaucoup, ont eu le plus grand impact et les conséquences pratiques les plus importantes. C'est en 1948 qu'il publie son mémoire fondamental intitulé "les propriétés magnétiques des ferrites: ferrimagnétisme et antiferromagnétisme" (Néel, 1948a). Il généralise sa théorie des antiferromagnétiques en supposant que les deux sous-réseaux magnétiques A et B des ferrites sont de moments inégaux, et il introduit 3 coefficients de champ moléculaire local $n(AA)$, $n(BB)$ et $n(AB)$ représentant les interactions magnétiques à l'intérieur de chacun de ces deux sous-réseaux et entre les deux. Il attribue ces interactions, préférentiellement, à un superéchange. Sa théorie rend quantitativement compte, pour la première fois, des caractéristiques magnétiques déjà connues des ferrites. Elle en prévoit de nouvelles, comme la possibilité d'une variation thermique atypique de l'aimantation spontanée, qui peut dans certains cas s'annuler puis s'inverser spontanément au cours du refroidissement. Néel suggère également l'existence de "domaines antiferromagnétiques" séparés par des parois analogues à celles des ferromagnétiques, mais qui exigent pour être déplacées des champs de l'ordre du tesla. En 1954, Néel suggère d'expliquer les propriétés magnétiques des grenats de terres rares, dont l'intérêt pratique est considérable dans le domaine des hautes fréquences car ce sont souvent de très bons isolants, par une structure ferrimagnétique particulière, les ions ferriques formant un système ferrimagnétique à deux sous-réseaux et à très fortes interactions, faiblement couplés négativement à un troisième sous-réseau d'ions de terres rares (Néel, 1954b). C'est pour "des recherches et des découvertes fondamentales concernant l'antiferromagnétisme et le ferrimagnétisme qui ont des applications importante dans la physique de l'état solide" que le Prix Nobel fut attribué à Louis Néel en 1970.

Négligé dans ses premiers travaux, le couplage anisotrope entre atomes voisins a fait l'objet d'un article approfondi en 1954. Néel souligne la présence, dans les corps ferromagnétiques, d'une énergie d'anisotropie superficielle qui est susceptible de jouer un rôle important dans les grains de taille inférieure à 10 nm (Néel, 1954a), ce que confirment maints travaux récents. Il examine également les conditions d'apparition et les effets d'un ordre directionnel. Ces considérations ont été appliquées à l'interprétation de l'origine du Fe-Ni quadratique (tétratoenite), découvert une quinzaine d'années plus tard dans des météorites. Ce minéral possède une surstructure quadratique de très grande anisotropie dont la direction est imposée par le champ magnétique ambiant (Néel et al., 1962). La présence de la tétratoenite justifie l'hypothèse selon laquelle les météorites qui en contiennent proviennent de la fragmentation d'un corps céleste suffisamment gros pour que son refroidissement ait duré les millions d'années nécessaires à la formation de la surstructure (Néel, 1991). Elle suggère aussi la présence d'un champ magnétique de direction constante, peut-être créé par ce corps même.

Né à Lyon le 22 novembre 1904, Néel est décédé à Meudon le 17 novembre 2000. Il s'était excusé de ne pouvoir assister, pour raison de santé, au symposium organisé en son honneur à l'EGS

2000. Mais il se félicitait que les géophysiciens continuent de manifester un intérêt soutenu envers le magnétisme des roches.

Publications de Louis Néel citées dans le texte

- L. Néel (1932). Influence des fluctuations du champ moléculaire sur les propriétés magnétiques des corps. *Ann. de Phys.*, 17, 5-105.
- L. Néel (1936a). Propriétés magnétiques de l'état magnétique et énergie d'interaction entre atomes magnétiques. *Ann. de Phys.*, 5, 232-279.
- L. Néel (1936b). Théorie du paramagnétisme constant; application au manganèse. *C. R. Acad. Sc.*, 203, 304-306.
- L. Néel (1942). Théorie des lois d'aimantation de Lord Rayleigh. 1^{ère} partie: les déplacements d'une paroi isolée. *Cah. Phys.*, 12, 1-20.
- L. Néel (1943). Théorie des lois d'aimantation de Lord Rayleigh. 2^{ème} partie: multiples domaines et champ coercitif. *Cah. Phys.*, 13, 18-30.
- L. Néel (1944a). Effet des cavités et des inclusions sur le champ coercitif. *Cah. Phys.*, 25, 21-44.
- L. Néel (1944b). Les lois de l'aimantation et de la subdivision en domaines élémentaires d'un monocristal de fer. *J. Phys. Rad.*, 5, 241-279.
- L. Néel (1946). Base d'une nouvelle théorie générale du champ coercitif. *Ann. Univ. Grenoble*, 22, 299-343.
- L. Néel (1947). Propriétés d'un ferromagnétique cubique en grains fins. *C. R. Acad. Sc.*, 224, 1488-1490.
- L. Néel (1948a). Propriétés magnétiques des ferrites. Ferrimagnétisme et antiferromagnétisme. *Ann. Phys.*, 3, 137-198.
- L. Néel (1948b). La loi d'approche en a/H et une nouvelle théorie de la dureté magnétique. *J. Phys. Rad.*, 9, 184-192.
- L. Néel (1949). Théorie du traînage magnétique des ferromagnétiques en grains fins avec application aux terres cuites, *Ann. Géophys.*, 5, 99-136.
- L. Néel (1951a). Le traînage magnétique. *J. Phys. Rad.*, 12, 339-351.
- L. Néel (1951b). L'inversion de l'aimantation permanente des roches. *Ann. Géophys.*, 7, 90-102.
- L. Néel (1952). Théorie du traînage magnétique de diffusion. *J. Phys. Rad.*, 13, 249-263.
- L. Néel (1954a). Anisotropie magnétique superficielle et surstructures d'orientation *J. Phys. Rad.*, 15, 225-239.
- L. Néel (1954b). Sur l'interprétation des propriétés magnétiques des ferrites de terres rares. *C. R. Acad. Sc.*, 239, 8-11.
- L. Néel (1955). Some theoretical aspects of rock magnetism. *Phil. Mag. Suppl.*, 4, 191-243.
- L. Néel (1957). Le champ moléculaire de Weiss et le champ moléculaire local. Colloque National de Strasbourg, commémoratif de l'œuvre de Pierre Weiss, 8-10 juillet 1957, CNRS éd., 24 pp.
- L. Néel (1991). Un siècle de physique. Ed. Odile Jacob, Paris.
- L. Néel, J. Paulevé, D. Dautreppe et J. Laugier (1962). Etablissement d'une structure ordonnée FeNi par irradiation aux neutrons. *C. R. Acad. Sc.*, 254, 965-968.