



Le magnétisme grenoblois

PIERRE AVERBUCH

Il y a 50 ans, Louis Néel expliquait le comportement des corps magnétiques utilisés aujourd'hui tant dans les dynamos de vélos que dans les disques durs des ordinateurs.

Aujourd'hui, Grenoble est renommée, parmi les physiciens, pour ses laboratoires et ses grands équipements, le synchrotron européen, par exemple. Ce centre européen de la physique est né avec l'arrivée, en 1940, de Louis Néel (*ci-dessus*), qui s'est intéressé au magnétisme. Puis il a contribué à y développer la physique des solides, la physique nucléaire et de nombreuses autres recherches.

À la fin du XIX^e siècle, on distingue les corps paramagnétiques des corps ferromagnétiques. Les premiers s'aimantent sous l'influence d'un champ extérieur, mais perdent leur aimantation dès que ce champ disparaît. C'est le cas de l'aluminium, de l'oxygène, du sodium, du platine, etc. Les seconds conservent l'aimantation qu'ils ont acquise dans un champ magnétique, même après la suppression de ce dernier, devenant ainsi des aimants permanents. Au-delà d'une certaine température (découverte par Pierre Curie et nommée aujourd'hui température de Curie), les substances ferromagnétiques deviennent paramagnétiques. C'est le cas du fer, du nickel, du cobalt, des alliages contenant ces éléments et de la magnétite ou pierre d'aimant, que Platon connaissait déjà : «Non seulement la pierre attire des anneaux de fer, mais elle leur communique ce pouvoir, qui permet à ces anneaux d'en attirer d'autres.» Les corps ferromagnétiques sont utilisés depuis longtemps pour fabriquer les boussoles, mais aussi de nombreux objets plus modernes, telles les bandes magnétiques : les particules d'oxyde de fer placées sur le support en plastique sont aimantées lors de l'enregistrement et conservent les informations grâce à leur orientation. De même, les bits des disques durs d'ordinateurs, qui codent l'information sous forme binaire, sont des petits aimants dont les champs sont orientés dans un sens ou dans l'autre.

Au début du XX^e siècle, Paul Langevin explique le paramagnétisme par le

magnétisme électronique à l'échelle atomique : les électrons ont des propriétés magnétiques parce qu'ils tournent autour du noyau. Les corps paramagnétiques sont ceux dont les éléments ont un moment magnétique intrinsèque. Le moment magnétique de chaque atome est orienté au hasard : à l'échelle macroscopique, le corps n'est pas aimanté. En revanche, dans un champ magnétique, les moments atomiques s'alignent comme l'aiguille d'une boussole sur le champ terrestre. L'agitation thermique s'oppose à cet ordre. Paul Langevin explique ainsi la diminution du paramagnétisme avec la température.

Peu après, Pierre Weiss élabore une phénoménologie du ferromagnétisme, toujours en vigueur aujourd'hui. Elle est fondée sur l'existence d'un couplage entre les moments magnétiques intrinsèques des atomes. Weiss invente le terme de «champ moléculaire», proportionnel à l'aimantation, pour désigner le phénomène responsable de ce couplage. Il suppose que les substances ferromagnétiques sont formées d'un grand nombre de domaines microscopiques (les domaines de Weiss), où les moments magnétiques sont parallèles. Chaque domaine est un petit aimant, mais leurs champs se compensent, en raison des orientations diverses des domaines. Lorsque l'on place un corps ferromagnétique dans un champ extérieur, l'aimantation des domaines s'aligne sur ce champ et le corps s'aimante.

L. Néel arrive à l'Université de Strasbourg en 1928. Jeune agrégé sortant de l'École normale supérieure, il y est nommé assistant de Weiss. Il prépare sa thèse sur le comportement des corps ferromagnétiques au voisinage de la température de Curie. Parmi les travaux de recherche qu'il poursuit ensuite, l'un des plus remarquables est la découverte de l'antiferromagnétisme.

Avec l'avènement de la mécanique quantique, on avait compris que l'électron, en plus de son mouvement orbital autour du noyau atomique, a un moment ciné-

tique intrinsèque (le spin), auquel est associé un moment magnétique. Selon le principe d'exclusion de Pauli, deux électrons dont les spins sont parallèles ne peuvent se rapprocher trop l'un de l'autre. L'énergie de répulsion électrostatique entre deux électrons est donc moins forte quand leurs spins sont parallèles que quand ils sont tête-bêche. En 1926, Werner Heisenberg comprend que les moments magnétiques s'alignent dans un même domaine de Weiss, à cause de ce «couplage d'échange».

PLUSIEURS MAGNÉTISMES

En 1936, la communauté des physiciens est convaincue que le couplage d'échange favorisant le parallélisme des spins, dit positif, est le seul possible. Toutefois, L. Néel propose une interaction d'échange négative pour expliquer que certains corps, tel le manganèse et ses oxydes, ont un paramagnétisme indépendant de la température. Pour comprendre son raisonnement, imaginons que les atomes des corps antiferromagnétiques occupent les cases d'un grand échiquier. Supposons que les interactions d'échange couplent entre eux les atomes placés sur des cases ayant une arête en commun (les atomes qui n'ont qu'un sommet en commun ne sont pas couplés). Si le couplage d'échange est positif, les spins tendent à être parallèles et le corps est ferromagnétique, tel que Weiss l'a décrit. Si le couplage est négatif, l'énergie est minimale quand les spins des atomes qui occupent les cases blanches sont orientés dans la direction opposée à celle des spins des atomes qui occupent les cases noires. On a alors un corps antiferromagnétique, tel que L. Néel l'a décrit.

Les atomes des solides étant organisés en réseau cristallin, l'aimantation tend à s'aligner selon certains axes dits de facile aimantation. Revenons à notre échiquier : supposons que l'axe de facile

aimantation lui soit perpendiculaire. Soumettons le à un champ magnétique parallèle à cette direction : le couplage est positif avec les atomes des cases noires et négatif avec les atomes des cases blanches (ou inversement). Au total, le couplage est nul et aucun magnétisme global n'apparaît. En revanche, si le champ est parallèle au plan de l'échiquier, il fait pencher tous les spins dans sa direction : un paramagnétisme apparaît, qui semble indépendant de la température. Bien que ce modèle s'appuie sur des expériences réalisées avec des cristaux, seule

une poignée de physiciens s'y rallient. La communauté scientifique attendra plus de dix ans pour reconnaître la validité de ce modèle, quand la diffraction des neutrons confirmera l'orientation des moments magnétiques atomiques.

Pendant la guerre, L. Néel, professeur à Strasbourg, est mobilisé. On le charge de trouver un moyen de protéger les navires de la flotte française contre les mines magnétiques ennemies. Il utilise les lois de l'hystérésis magnétique en champ faible, connues depuis le XIX^e siècle, pour appliquer aux navires un champ magnétique qui détruit l'aimantation globale des coques métalliques, de sorte qu'elles n'attirent plus les mines dévastatrices.

L'ARRIVÉE À GRENOBLE

Après l'annexion de l'Alsace par l'Allemagne, L. Néel cherche un nouveau laboratoire d'accueil. À Grenoble, le doyen de la Faculté des sciences avait obtenu du Front populaire la construction d'un bâtiment pour les physiciens et les mathématiciens ; L. Néel y obtient sa mutation, mais les lois raciales du régime de Vichy interdisent à son élève, Louis Weil, d'être universitaire. Bien qu'il soit professeur d'université, L. Néel tisse alors des liens étroits avec les industriels et obtient que la société Ugine embauche Weil. En retour, cette société va prendre le marché des aimants destinés, à l'époque, aux dynamos des vélos, grâce aux travaux de Weil sur les poudres métalliques. Ce dernier utilise les résultats des recherches que L. Néel a entreprises pour mieux comprendre les phénomènes d'hystérésis qu'il a utilisés lorsqu'il a désaimanté les bateaux. L. Néel explique comment l'état d'un système magnétique dépend des diffé-



Le premier grand rassemblement international sur le magnétisme eut lieu juste après la Seconde Guerre mondiale, à Grenoble. Louis Néel, qui en fut le moteur, est le quatrième à partir de la droite, au premier rang.

rentes configurations dans lesquelles il s'est trouvé. Il comprend que l'hystérésis est due au fait que, dans les champs faibles, les parois entre domaines de Weiss se déplacent et que, dans les champs forts, la structure de la décomposition en domaines est modifiée. Dans le cas de grains magnétiques assez petits, il n'y a plus qu'un seul domaine : la séparation en domaines abaisse l'énergie du matériau, mais ce gain de stabilité est inférieur au coût énergétique de la création d'une paroi. En utilisant des poudres métalliques qu'elle oriente puis qu'elle compacte, la société Ugine fabrique des aimants dont l'aimantation est plus stable que s'il s'agissait d'un matériau massif.

En 1942, L. Néel devient directeur d'un laboratoire de l'Institut électrotechnique de Grenoble dédié à des essais pour les industriels. Puis, juste après la guerre, il crée le Laboratoire d'électrostatique et de physique du métal. À cette époque, les besoins de l'électronique imposent l'étude du magnétisme des ferrites, oxydes mixtes de deux ou trois métaux, dont l'un au moins est aimanté. On s'aperçoit que la variation de leur aimantation avec la température diffère de celle des corps ferromagnétiques. Pour expliquer ce comportement, L. Néel généralise alors son modèle d'antiferromagnétisme au cas où les atomes couplés négativement sont de natures différentes. Dans un matériau antiferromagnétique, les atomes des cases noires de l'échiquier et ceux des cases blanches sont identiques chimiquement et ont des moments magnétiques de même amplitude, qui s'annule en l'absence de champ extérieur. Dans les ferrites et dans les corps ferromagnétiques en général, les atomes des cases noires et ceux des cases blanches sont d'espèces chimiques dif-

férentes : les deux sous réseaux ne se compensent plus, et un magnétisme macroscopique apparaît.

Les travaux de L. Néel ont également servi en géophysique : certaines ferrites naturelles évoluent lentement sur des échelles de temps géologiques. Les laves qui en contiennent s'aimantent en refroidissant. Grâce à ces boussoles fossiles, on reconstitue l'histoire du champ magnétique terrestre dont la direction varie au cours du temps. On doit alors tenir compte de la dérive des continents. Les travaux de L. Néel ont ainsi

indirectement permis d'utiliser la «mémoire magnétique» des roches pour reconstituer l'histoire de la dérive des continents.

Pour poursuivre des recherches en magnétisme, les physiciens ont besoin d'instruments de plus en plus variés : Weil construit des liquéfacteurs d'hydrogène, puis d'hélium pour atteindre les basses températures nécessaires à l'étude du magnétisme des ferrites. Une équipe de chercheurs spécialistes de la résonance magnétique s'implante à Grenoble pour étudier les effets magnétiques dynamiques. L. Néel cherche un réacteur nucléaire comme source de neutrons (diffractés par la matière et sensibles aux orientations des moments magnétiques, ils permettent de visualiser l'antiferromagnétisme). Il contacte le Commissariat à l'énergie atomique au moment où ce dernier cherche à créer un troisième centre en province. À la fin de l'année 1955, L. Néel devient directeur du Centre d'études nucléaires de Grenoble : les capacités de recherche de la ville doublent avec ces nouveaux laboratoires. Il s'y développe une synergie entre la recherche universitaire et l'industrie. En 1970, L. Néel reçoit le prix Nobel de physique qui couronne sa carrière, consacrée au magnétisme. Grenoble lui doit en partie son statut de centre scientifique européen et de pôle de l'industrie électronique.

Pierre AVERBUCH est physicien honoraire au Centre de recherche sur les très basses températures, à Grenoble.

Pierre AVERBUCH, *Les débuts du magnétisme grenoblois*, in *Bulletin de la Société française de physique*, n° 125, p. 16, juillet 2000.