Bull. Soc. R. Sci. Liège, 2026, **94**(2), 23–27 *Extended conference abstract*
doi:10.25518/0037-9565.12707

La supraconductivité : d'une tentative de geler des électrons à l'avènement de l'IRM et de l'informatique quantique

Nicolas Rotheudt

Département d'Électricité, Électronique et Informatique,
Université de Liège, Allée de la Découverte, 10, B–4000 Liège
Correspondance à : nicolas.rotheudt@uliege.be

Article publié selon les termes et conditions de la licence Creative Commons CC BY 4.0.

Communication invitée présentée au colloque annuel de la Société Royale des Sciences de Liège sur « Explorations scientifiques : hasard et sérendipité », Université de Liège (Belgique), 27 novembre 2026.

Résumé

La supraconductivité est un phénomène étrange, fascinant et passionnant qui a marqué de son empreinte la physique contemporaine du XX^e^ siècle et intrigué de nombreux scientifiques de renom. Si ce phénomène est aujourd'hui exploité dans plusieurs dizaines de milliers d'appareils d'IRM à travers le monde et ouvre des perspectives prometteuses dans des domaines aussi variés que l'aéronautique, le transport de l'énergie ou l'informatique quantique, son histoire a été jalonnée de découvertes parfois fortuites, de grands espoirs et de quelques déceptions. Ce travail vise à retracer, de manière simplifiée, quelques-uns des grands épisodes de cette histoire mouvementée, en mettant en lumière le rôle parfois déterminant du hasard dans sa découverte, ainsi que la complicité souvent inévitable entre la recherche scientifique et la sérendipité.

1. Le contexte : la quête des basses températures

En faisant quelques recherches sur la découverte de la supraconductivité, on remarque rapidement qu'elle est, à de nombreuses reprises, qualifiée de *serendipitous* dans la littérature. Pour comprendre pourquoi, il faut se plonger dans une quête qui a animé bien des scientifiques à la fin du XIX^e^ siècle : la quête des basses températures.

Grâce aux travaux de William Thomson, connu par la suite sous le nom de Lord Kelvin, on sait dès le milieu du XIX^e^ siècle qu'il existe une limite inférieure absolue de température, à −273,15 °C (0 K). À mesure que l'on s'approche de telles températures, tous les gaz finissent par se liquéfier, et une véritable « course à la liquéfaction des gaz » s'engage alors entre les physiciens et chimistes les plus brillants de l'époque. Le gaz qui résiste le plus longtemps à cette course est l'hélium, un gaz détecté pour la première fois en 1868 dans le spectre solaire (*helios*) par Joseph Norman Lockyer et, indépendamment, par Pierre Jules Janssen, puis isolé sur Terre en 1895 par William Ramsay. Le 10 juillet 1908, le dernier des gaz permanents finit à son tour par céder en passant sous les 4,2 K, grâce au génie expérimental et aux prouesses technologiques de Heike Kamerlingh Onnes, à Leyde, aux Pays-Bas.

Pour atteindre de telles températures (moins de 2 K furent atteints ce jour-là), Heike Kamerlingh Onnes a adopté une approche presque « industrielle », en mettant sur pied un vaste laboratoire cryogénique, moderne et international, où se côtoient des équipes hautement qualifiées de techniciens, d'ingénieurs et de souffleurs de verre. Une fois l'exploit de la liquéfaction de l'hélium accompli, le laboratoire de Leyde dispose désormais d'infrastructures et de capacités cryogéniques uniques, ouvrant la voie à de nouvelles explorations. Kamerlingh Onnes et ses collègues se tournent ainsi naturellement vers un autre sujet particulièrement en vogue à l'époque : l'étude des propriétés électriques de la matière à très basse température.

2. La découverte : *Kwik nagenoeg nul*

En particulier, une question qui préoccupe et divise plusieurs physiciens concerne le comportement de la résistance électrique des métaux lorsque la température tend vers 0 K. De manière schématique, la résistance électrique d'un métal résulte (notamment) de l'interaction entre les vibrations du réseau cristallin (les *phonons*) et les électrons de conduction. Ces vibrations diffusent les électrons et perturbent leur mouvement collectif, donnant ainsi naissance à une résistance électrique qui se traduit macroscopiquement par une dissipation de l'énergie électrique. Lorsque la température diminue, l'amplitude des vibrations thermiques du réseau cristallin décroît, réduisant progressivement la résistance électrique.

Cependant, au début du XX^{e} siècle, personne ne sait ce qu'il se passe lorsque la température s'approche du zéro absolu, et deux hypothèses s'opposent. La première prédit que les vibrations thermiques continuent de diminuer, entraînant une décroissance de la résistance électrique jusqu'à son annulation à 0 K. La seconde, notamment défendue par Lord Kelvin, envisage au contraire que la résistance atteigne un minimum avant d'augmenter brusquement et de tendre vers l'infini à 0 K. Cette augmentation traduirait le fait que le nombre d'électrons de conduction diminue fortement avec la température, comme si les électrons « gelaient » à très basse température.

Désireux de lever le voile sur ce mystère, Kamerlingh Onnes et son équipe, en particulier Gilles Holst, entreprennent de mesurer la résistance de fils d'or et de platine à température cryogénique. Leurs premiers résultats, déjà, sont surprenants : bien que la résistance électrique diminue avec la température, elle atteint un plateau à quelques degrés au-dessus de 0 K. Rapidement, Kamerlingh Onnes et Holst comprennent deux éléments essentiels. D'une part, la résistance ne tend pas vers l'infini, contrairement à ce que prévoyait Lord Kelvin. D'autre part, si la résistance ne décroît pas jusqu'à 0, cela s'explique sans doute par la présence d'impuretés dans les échantillons métalliques, responsables d'une petite résistance résiduelle indépendante de la température. Kamerlingh Onnes postule alors que, dans un métal suffisamment pur, cette résistance devrait s'annuler à mesure que la température tend vers 0 K. Pour vérifier cette hypothèse, il lui faut donc disposer d'un métal parfaitement pur. Son choix se porte sur le mercure : liquide à température ambiante, celui-ci peut être purifié relativement facilement par distillations successives.

Le 8 avril 1911, Gilles Holst observe que la résistance du mercure chute extrêmement rapi-

dement lorsqu'il est refroidi à très basse température, devenant même pratiquement indétectable (dans la limite de précision des appareils de mesure). Kamerlingh Onnes consigne alors dans son carnet trois mots restés célèbres : *Kwik nagenoeg nul*, autrement dit, « Mercure presque nul » (à 3 K ce jour-là). C'est la première observation du phénomène extraordinaire qu'est la supraconductivité ! Kamerlingh Onnes, intrigué et très surpris par ce phénomène inattendu et encore totalement incompris, réitère plusieurs fois des expériences similaires dans les mois qui suivent, en améliorant progressivement la précision et la résolution de ses mesures. Le 26 octobre 1911, ses mesures lui permettent de caractériser clairement la transition du mercure : autour de 4,2 K, la résistance chute brusquement de 0,1 Ω à moins de 10^{-5} Ω (limite de détection) en l'espace de 0,01 K seulement [1]. L'ère de la supraconductivité est née !

3. L'effet Meissner : une avancée majeure

Pendant plusieurs décennies, les scientifiques s'attellent à identifier d'autres supraconducteurs, à élaborer des modèles théoriques visant à expliquer la supraconductivité et à mettre en évidence diverses propriétés caractéristiques de ces matériaux supraconducteurs. L'une des avancées majeures dans ce dernier domaine est due à Walther Meissner.

En 1933, Meissner étudie, avec Robert Ochsenfeld, le comportement magnétique de matériaux supraconducteurs et observe que le flux magnétique est exclu de l'intérieur du matériau lorsque celui-ci passe à l'état supraconducteur. Ce phénomène se manifeste que le champ magnétique soit appliqué avant ou après le refroidissement du supraconducteur. Cette observation implique qu'un matériau dans l'état supraconducteur n'est pas simplement un conducteur parfait, caractérisé par une résistance électrique nulle, mais présente aussi un diamagnétisme parfait, caractérisé par l'expulsion du champ magnétique de son volume (ceci étant dû à l'apparition de boucles de courant d'écrantage macroscopiques). Cette expulsion du flux magnétique prendra par la suite le nom d'effet Meissner, ou effet Meissner–Ochsenfeld. Il est intéressant de remarquer que la mise en évidence de cet effet provient aussi d'un choix extrêmement judicieux (ou peut-être un peu chanceux ?) de la géométrie des échantillons supraconducteurs. Meissner utilisant notamment des cylindres pleins, l'expulsion du flux magnétique était relativement simple à observer. À l'inverse, l'utilisation de cylindres creux (comme dans certaines expériences menées par Willem Tuyn à Leyde) pouvait considérablement compliquer l'interprétation des mesures, puisque le champ magnétique pouvait subsister dans la cavité centrale des tubes, bien qu'étant expulsé de leurs parois supraconductrices.

4. La supraconductivité à haute température : malchance et sérendipité

Alors que les avancées théoriques et expérimentales se poursuivent pendant une grande partie du XX^{e} siècle, une question demeure en suspens et freine toujours les perspectives d'application des supraconducteurs : la supraconductivité est-elle confinée au monde des très basses températures (typiquement inférieures à 25–30 K) ? Autrement dit, existe-t-il des matériaux dont la transition vers l'état supraconducteur s'effectue à des températures supérieures au point d'ébullition de l'azote liquide (77 K) ? Ce dernier présente en effet de nombreux avantages par

rapport à l'hélium liquide (4,2 K) et à l'hydrogène liquide (20 K) : entre autres, il est peu coûteux, non explosif et abondant.

Un des acteurs quelque peu malchanceux de cette course aux supraconducteurs à « haute température » est Bernard Raveau (Caen, France). Raveau n'étudie pas du tout les supraconducteurs ; il s'intéresse plutôt à des conducteurs fortement anisotropes pouvant facilement piéger des atomes d'oxygène afin de développer des capteurs. Dans cette optique, il explore les propriétés des pérovskites, des céramiques à structure stratifiée, dans lesquels il introduit notamment des atomes de cuivre. En 1985, il publie une communication décrivant un nouveau composé [2] : le $BaLa_4Cu_5O_{13.4}$, dont il étudie les propriétés électriques et magnétiques jusqu'à environ 80 K. Ce que Raveau ignore alors, malheureusement, c'est que les pérovskites qu'il a modifiées cachent d'autres secrets, qui ne se révèlent qu'à des températures encore plus basses.

Quelques mois plus tard, Georg Bednorz et Alex Müller (Zurich, Suisse), à la recherche de nouveaux supraconducteurs et intrigués par les pérovskites de Raveau, explorent à leur tour le système Ba–La–Cu–O. La chance leur sourit alors : au lieu d'obtenir exactement le composé étudié par Raveau, comme prévu, ils synthétisent un mélange de plusieurs phases, dont l'une s'avère être supraconductrice à une température légèrement supérieure à 30 K [3]. Le plafond des 30 K est brisé ! Dès 1987, Maw-Kuen Wu (Huntsville, USA) et Paul Chu (Houston, USA) franchissent une nouvelle étape en identifiant un supraconducteur à 93 K [4], ce qui ouvre définitivement la porte aux applications utilisant l'azote liquide.

Remerciements

Nicolas Rotheudt, l'auteur, tient à remercier les Professeurs Philippe Vanderbemden et Benoît Vanderheyden pour l'opportunité de réaliser ce travail, ainsi que leurs précieux conseils et références. L'auteur remercie également le Fonds de la Recherche Scientifique - FNRS de financer son travail.

Informations supplémentaires

Identifiant ORCID de l'auteur

0000-0001-5164-703X (Nicolas ROTHEUDT)

Conflits d'intérêt

L'auteur déclare qu'il n'y a pas de conflit d'intérêts.

Références

[1] Kamerlingh Onnes, H. (1912) Further experiments with liquid helium. G. On the electrical resistance of pure metals etc. VI. On the sudden change in the rate at which the resistance of

mercury disappears. *Koninklijke Akademie van Wetenschappen te Amsterdam : Proceedings of the Section of Sciences*, **14**, 818–821. Communication N°. 124c from the Physical Laboratory at Leiden. Texte intégral disponible dans la *KNAW Digital Library* sous https://dwc.knaw.nl/toegangen/digital-library-knaw/?pagetype=publDetail&pId=PU00013242.

[2] Michel, C., Er-Rakho, L., et Raveau, B. (1985) The oxygen defect perovskite $BaLa_4Cu_5O_{13.4}$, a metallic conductor. *Materials Research Bulletin*, **20**(6), 667–671. https://doi.org/10.1016/0025-5408(85)90144-8.

[3] Bednorz, J. G. et Müller, K. A. (1986) Possible high T_c superconductivity in the Ba–La–Cu–O system. *Zeitschrift für Physik B – Condensed Matter*, **64**(2), 189–193. https://doi.org/10.1007/BF01303701.

[4] Wu, M. K., Ashburn, J. R., Torng, C. J., Hor, P. H., Meng, R. L., Gao, L., Huang, Z. J., Wang, Y. Q., et Chu, C. W. (1987) Superconductivity at 93 K in a new mixed-phase Y-Ba-Cu-O compound system at ambient pressure. *Physical Review Letters*, **58**(9), 908–910. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.58.908.

De plus, la structure de ce travail et une grande partie de son contenu sont inspirées de

Ortoli, S. et Klein, J. (1989) *Histoire et légendes de la supraconduction*, Calmann-Lévy, Paris (France), 215 pages.

Rogalla, H. et Kes, P. H. (Réds.) (2011) *100 Years of Superconductivity*, CRC Press, Boca Raton (FL, États-Unis), 864 pages. https://doi.org/10.1201/b11312.