



Souvenirs d'un cryodinosauure

NICHOLAS KURTI

L'aube du refroidissement magnétique.

La désaimantation adiabatique, une méthode qui permet d'atteindre des températures de quelques millièmes de degré au-dessus du zéro absolu ($-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$), est née de l'erreur théorique de deux physiciens qui furent pourtant lauréats du prix Nobel. Étonné de leurs analyses erronées, le physicien allemand Franz Eugen Simon me poussa à des vérifications expérimentales qui nous conduisirent à la découverte de cette méthode, en 1956. L'évocation de nos études éclaire les débuts de la physique des basses températures, qui a récemment fleuri avec les explorations de la supraconduction.

Je me suis intéressé à la physique des basses températures en 1929, après ma licence, à la Sorbonne. Quand j'arrivais à Berlin, avec une lettre de recommandation pour Simon, la physique des basses températures était en plein essor.

Ce dernier avait commencé, très exactement, dans l'après-midi du 24 décembre 1877 : le chimiste Jean-Baptiste Dumas annonça à l'Académie

des sciences que l'oxygène venait d'être liquéfié, presque simultanément, mais indépendamment, par Louis Cailletet, à Châtillon-sur-Seine, et par Raoul Pictet, à Genève. C'était un événement, car l'oxygène était alors un gaz prétendu «permanent», c'est-à-dire qu'on pensait impossible à liquéfier ; Cailletet et Pictet avaient obtenu l'oxygène liquide parce qu'ils avaient atteint une température plus basse que leurs prédécesseurs, de $-183\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Puis la physique des basses températures avait connu un autre grand moment en 1898, quand James Dewar, à Londres, avait liquéfié l'hydrogène, à $-252\text{ }^{\circ}\text{C}$. En 1908, l'hélium liquide fut obtenu par H. Kammerlingh Onnes, à Leyde, à $-268,9\text{ }^{\circ}\text{C}$; et, en 1932, William Keesom, également à Leyde, obtint un record de basse température de 0,7 kelvin (soit 0,7 degré au-dessus du zéro absolu) en faisant bouillir de l'hélium liquide sous vide : la réduction de la pression, au-dessus du liquide, facilite l'évaporation, ce qui abaisse la température

d'ébullition (en vertu du même phénomène, l'eau bout à des températures inférieures à $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, en altitude).

Alors que les expérimentateurs atteignaient ainsi des températures de plus en plus basses, les théoriciens cherchaient à interpréter les phénomènes étranges qui apparaissaient dans ce monde où la matière s'immobilise progressivement.

À l'Université de Leipzig, notamment, Peter Debye avait proposé théoriquement une nouvelle méthode de «refroidissement par désaimantation adiabatique» afin d'atteindre des températures encore inférieures : en décembre 1926, il publie dans les *Annalen der Physik* un article intitulé «Quelques remarques sur l'aimantation à basse température». Il se fonde sur des résultats obtenus trois ans plus tôt par Onnes et par H. Woltjer, qui avaient montré que l'aimantation d'un sel, le sulfate de gadolinium, varie en fonction du champ magnétique et de la température, conformément à une formule établie par Paul Langevin.

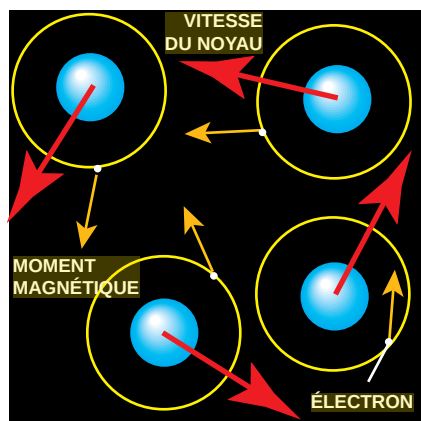
Appliquant les lois de la thermodynamique à la formule de Langevin, Debye calcule qu'aux températures où l'hélium est liquide, des champs magnétiques de quelques dixièmes de tesla ordonnent puissamment les moments magnétiques des électrons (responsables de l'aimantation) du sulfate de gadolinium.

Que se passe-t-il si l'on aimante d'abord le sulfate de gadolinium de façon isotherme, c'est-à-dire à température constante, puis si l'on réduit ensuite lentement le champ magnétique, la substance étant isolée thermiquement de son environnement ? Lors de la désaimantation, réversible et adiabatique (c'est-à-dire sans échange de chaleur entre l'échantillon et son environnement), l'entropie (le désordre) est constante : à mesure que les moments magnétiques des électrons se désordonnent, leur entropie augmente, mais le désordre des atomes doit diminuer d'autant ; comme la température dépend du mouvement des atomes, le cristal de sulfate de gadolinium doit donc refroidir (voir la figure 2).



Photographie de N. Kurti

1. Ce générateur électrique alimentait les bobines qui engendraient les champs magnétiques de trois teslas, en 1956, à Oxford.



2. Le principe de la désaimantation adiabatique électronique. En maintenant la température constante, on applique un champ magnétique (au centre) qui aligne les aimantations des électrons (flèches orange). Puis on supprime le champ magnétique (à droite) : le désordre créé par la désorganisation des aimantations des électrons est

compensé par un ordre accru des noyaux atomiques (les flèches sur les noyaux représentent leur vitesse). L'augmentation de l'ordre atomique correspond à un refroidissement. L'auteur et ses collègues d'Oxford ont testé cette même méthode, mais en utilisant l'aimantation des noyaux atomiques au lieu de l'aimantation des électrons.

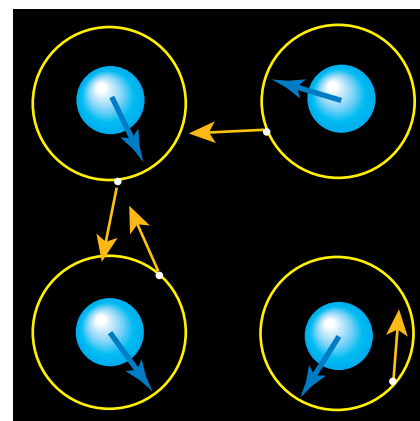
Ayant estimé la chaleur spécifique du réseau (la quantité de chaleur qu'il faut fournir pour chauffer de un degré un gramme de sulfate de gadolinium), Debye calcule qu'à la température de quatre kelvins une désaimantation à partir d'un champ magnétique même faible doit amener l'échantillon à la température du zéro absolu. Toutefois, Debye connaît le troisième principe de la thermodynamique, qui stipule que la température du zéro absolu est inaccessible, et il rejette son calcul : « Il faut conclure que la formule de Langevin n'est plus valable à ces températures » ; il n'explique pas pourquoi.

Huit mois plus tard, à Berkeley, William Francis Giauque publie un autre

article sur le même sujet, sous un titre analogue. L'article ayant été reçu par l'éditeur le 14 décembre 1926, il a certainement été écrit avant la publication de l'article de Debye : ce n'est pas un plagiat. Dans une note de bas de page, Giauque explique qu'il a discuté de ses idées avec des collègues depuis 1924, et il mentionne la première annonce publique du résultat, faite à une réunion de la Société américaine de chimie, en avril 1926, c'est-à-dire six mois avant la remise du manuscrit de Debye.

En appliquant les lois de la thermodynamique à la formule de Langevin, comme le fait Debye après lui, Giauque envisage tout d'abord un réfrigérateur magnétique fondé sur des cycles magnétiques (une alternance de phases adiabatiques et de phases isothermes), répétés aux températures inférieures à un kelvin, puis il signale qu'une seule désaimantation adiabatique électronique devrait conduire à de très basses températures.

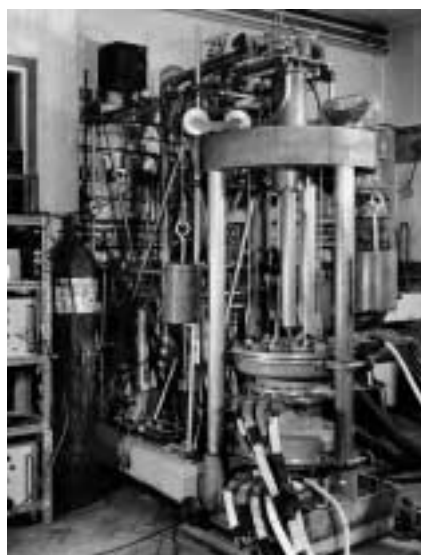
C'est à ce moment que j'arrive à Berlin : au cours de l'été 1929, j'appelle Simon pour lui demander de faire ma thèse sous sa direction dans le domaine du magnétisme et des basses températures. Il accepte et me propose de tester expérimentalement la prévision théorique de désaimantation adiabatique. Nous examinons les articles de Debye et de Giauque, et Simon fait le raisonnement suivant : dans une substance obéissant à la loi de Langevin, les moments magnétiques des électrons sont orientés au hasard, en l'absence d'un champ magnétique extérieur ; l'entropie magnétique est notable. D'autre part, selon le troisième principe de la thermodynamique, l'entropie est nulle à la température du zéro absolu. Or le passage



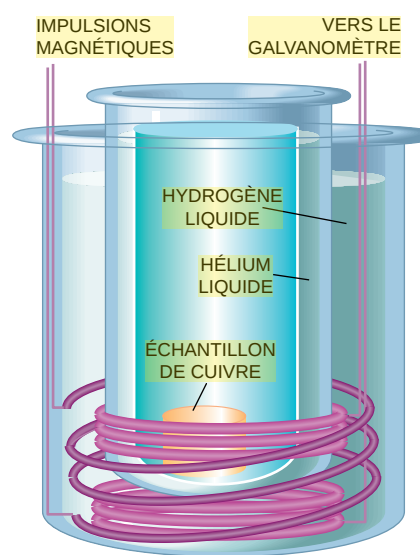
d'une température à l'autre s'accompagne d'absorption d'énergie : cette augmentation d'énergie correspond à une forte chaleur spécifique magnétique, que Simon me propose de mesurer.

À cette époque, le gadolinium est une denrée rare, mais Georges Urbain, pionnier de la chimie des terres rares, nous confie 500 milligrammes de sulfate de gadolinium. Sur cet échantillon minuscule, nous vérifions la prévision de Simon. Nos mesures permettent de prévoir les résultats des désaimantations adiabatiques électroniques : les premières expériences de Giauque, en 1933, montrent que nos prévisions sont exactes.

Ainsi deux futurs prix Nobel (Debye et Giauque) ont prévu théoriquement le



3. L'appareil qui permet d'observer la première désaimantation adiabatique nucléaire renfermait un échantillon de cuivre, dans un système de bobines qui détectaient le refroidissement. L'ensemble était successivement refroidi par de l'hydrogène liquide et par de l'hélium liquide.



4. La mesure de la température de l'échantillon refroidi (du cuivre) était assurée par un système de trois bobines. L'une, externe, assurait la désaimantation, tandis que deux bobines internes, identiques, étaient reliées à un galvanomètre. L'aimantation de l'échantillon provoquait la déviation du galvanomètre.

PART C From Art Spohr's lab Notebook

04450' Current on to 200 amper./sec

51.50 Begin reducing.

52.00 Demagnetize

15 B 1.15 26/100 = A ?

30 1.00 141

45 0.61 122

55 0.39 120

55 10" 0.39 12

50 0.39

1000 reduction

2-29

This is it!

NOTE ADDED in 1990.

Experiment done during the night

6-7 June 1956.

N. Spohr

5. Le carnet de laboratoire qui consigne les résultats de la première expérience de désaimantation adiabatique nucléaire, à l'Université d'Oxford.



6. Francis Simon (à gauche), Art Spohr (au centre) et Neville Robinson (à droite) travaillent avec l'auteur, en 1956.

refroidissement par désaimantation adiabatique électronique, mais leur raisonnement était faux, parce qu'il supposait implicitement que l'on pourrait atteindre la température du zéro absolu.

Où était l'erreur? Même si l'on annule le champ magnétique externe, chaque moment magnétique reste dans un champ magnétique local (qui peut d'ailleurs varier selon les points de l'échantillon), dû aux moments magnétiques voisins. Une désaimantation complète est donc impossible, et la température minimale que l'on peut atteindre est déterminée par l'intensité du champ local.

Comment obtenir des températures encore inférieures? L'explication précédente fournit la réponse : on doit utiliser des substances où le champ magnétique local est inférieur. Ces substances sont celles dont le magnétisme est dû aux moments magnétiques des noyaux atomiques, qui sont 1 000 fois inférieurs à ceux des électrons.

Les tests expérimentaux de désaimantation nucléaire ne commencent qu'au début de 1955 : avec Neville Robinson, Simon et Art Spohr, nous utilisons du cuivre métallique, à une température

initiale de 10 millikelvins, produite par désaimantation électronique. Un solénoïde alimenté par une puissance de deux mégawatts exerce un champ magnétique maximal de trois teslas.

Pour déterminer la température atteinte, nous mesurons l'aimantation à l'aide d'un système composé de deux bobines enroulées en opposition ; l'échantillon est dans une seule des bobines, et tout le système baigne dans l'hydrogène liquide, qui entoure le cryostat à bain d'hélium liquide. Quand la bobine extérieure produit un petit champ magnétique de dix milliteslas, l'aimantation de l'échantillon provoque un déséquilibre du circuit électrique composé par les deux bobines ; un galvanomètre balistique mesure ce déséquilibre.

Toutefois, lors de nos premières expériences de refroidissement nucléaire, en mars 1956, nous n'observons aucune déviation du galvanomètre : nous ne pouvons donc pas savoir si nous avons obtenu un refroidissement de l'échantillon.

C'est seulement dans la nuit du 6 au 7 juin 1956, vers trois heures du matin, qu'en désespoir de cause, je me tourne vers A. Spohr et lui dis : «Art, nous avons tenté tout ce qui était raisonnable, mais

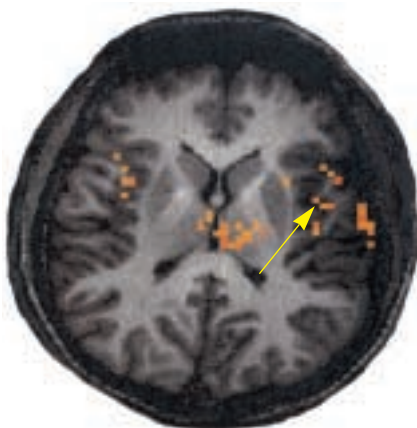
nous n'avons eu aucun résultat. Je propose donc de faire un peu n'importe quoi, pour voir ce que ça va donner. Par exemple, au lieu d'inverser le champ primaire entre plus dix milliteslas et moins dix milliteslas, si nous tentions une valeur de un millitesla?» Nous faisons l'essai, et, après des mois de travail, nous observons une déviation du galvanomètre qui correspond à une température d'environ dix microkelvins. Une autre désaimantation confirme le résultat. A. Spohr écrit dans le cahier de laboratoire, à côté du compte rendu d'expérience : «Nous y voilà!!??». C'est le premier refroidissement par désaimantation adiabatique nucléaire.

Nous comprenons ultérieurement la raison de nos échecs répétés. Le courant dans la bobine primaire est lancé juste après la désaimantation, mais la première observation du galvanomètre n'est faite que lors de l'inversion du courant. Or l'établissement du courant dans la bobine primaire induit des courants de Foucault qui chauffent momentanément l'échantillon à quelques dixièmes de kelvins. En réduisant le champ de la bobine primaire de 10 à 1 milliteslas, on réduit ce chauffage d'un facteur 100.

En 1960, quelques années après ces premières expériences, la BBC présente quelques travaux effectués au Laboratoire Clarendon d'Oxford et, notamment, une expérience de désaimantation adiabatique nucléaire. À la fin de l'émission, le présentateur remarqua que ces expériences battaient le record des basses températures, et je répondis : «Je n'aime pas l'expression "records de basses températures". Il serait insensé que des physiciens des basses températures courent après le zéro absolu, qui est inaccessible. Ces expériences sont importantes parce qu'elles nous ont amené au seuil de régions de températures nouvelles, et j'espère seulement que nous serons désormais capable d'explorer ce pays d'ordre et de calme, ce monde sans chaos.»

Depuis, notre «record» a été largement battu, et plusieurs expériences allant même au-dessous de un nanokelvin ont prouvé qu'il existe des oasis dans le désert glacial des microkelvins, nanokelvins et picokelvins.

Nicholas KURTI était professeur de physique à l'Université d'Oxford et membre de la Royal Society ; il a travaillé au Laboratoire Clarendon jusqu'à sa mort, en novembre 1998.



La saveur dans le cerveau

HERVÉ THIS

Par résonance magnétique nucléaire, on identifie les aires activées lors de la perception des saveurs.

« **C**omme jusqu'ici ne s'est encore présentée aucune circonstance où quelque saveur ait dû être appréciée avec une exactitude rigoureuse, on a été forcé de s'en tenir à un petit nombre d'expressions générales, telles que doux, sucré acide, acerbé, et autres pareilles, qui s'expriment, en dernière analyse, par les deux suivantes : agréable ou désagréable au goût. Ceux qui viendront après nous en sauront davantage. »

Jean-Anthelme Brillat-Savarin était prescient, puisque les neurobiologistes sont aujourd'hui sur la piste des molécules réceptrices des saveurs, à la surface des cellules des papilles. Simultanément, les techniques d'imagerie par résonance magnétique nucléaire (IRM) révèlent comment l'information perçue par les capteurs du goût monte au cerveau, où elle est alors traitée.

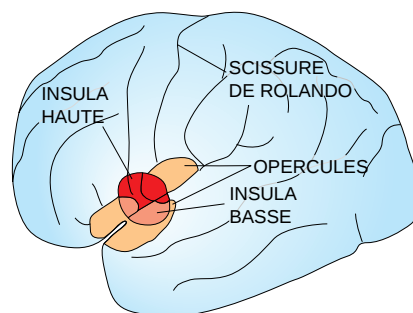
Depuis la mise au point de ces techniques, qui enregistrent l'activité des aires cérébrales en détectant les modifications du débit sanguin dans ces zones, les neurobiologistes ont surtout étudié des activités cognitives comme le langage, le calcul, la mémorisation. En revanche, l'olfaction a été peu explorée, et la perception des saveurs complètement oubliée (on la note gustation, mais, comme le goût est la sensation générale donnée par la dégustation d'un mets, on devrait plutôt la nommer « sapiction »). Barbara Cerf et Annick Faurion, du Laboratoire de neurobiologie sensorielle de Massy, et Denis Le Bihan, du Centre hospitalier d'Orsay, ont identifié les aires cérébrales activées par les molécules sapides.

Les connaissances de base étaient rudimentaires. On savait seulement, par l'observation de personnes dont une partie du cerveau avait été détruite, au cours de la Seconde Guerre mondiale, que l'opercule pariétal, près de la scissure de Rolando, avaient sans doute une fonction dans la gustation. Toutefois des études d'électrophysiologie donnaient des résultats contradictoires : elles incriminaient plutôt une autre aire, localisée dans le lobe de l'insula.

Les explorations par IRM imposent d'allonger les sujets testés dans un tube de deux mètres de long, et, de ce fait, de les alimenter par des solutions transmises par des tuyaux souples. Ces contraintes ont déterminé le type de produits sapides qui ont été testés : les sujets recevaient des solutions d'aspartame (un édulcorant), de chlorure de sodium, de quinine (amère), d'acide glycyrrhizique (une saveur « réglisse »), de guanosine monophosphate (la saveur umami, proche de celle du monoglutamate de sodium, employé dans la cuisine asiatique) et de d-thréonine (une saveur indescriptible, je vous recommande l'expérience !). Les expérimentateurs envoyaient d'abord aux sujets de l'eau, puis des solutions sapides, puis de nouveau de l'eau, et ainsi de suite, afin d'éviter les adaptations tout en maintenant des stimulations durant plusieurs dizaines de secondes, le temps que l'appareil d'IRM puisse acquérir suffisamment de signal.

Les sujets qui recevaient ces solutions avaient pour mission de se concentrer sur leur saveur, afin d'éviter des activations parasites du cerveau. Ils décrivaient l'intensité de leurs sensations à l'aide d'un curseur qu'ils déplaçaient plus ou moins le long d'une règlette. Les neurobiologistes ont calculé des corrélations entre les profils perceptifs et les activations des diverses zones du cerveau. Ils ont ainsi déterminé les activations liées à la perception des saveurs : les différences entre individus sont considérables, et les images sont bruitées, de sorte que l'on doit analyser de nombreuses expériences afin de connaître les aires qui seraient spécifiques de la perception de la saveur.

Les premières études ont montré que quatre aires cérébrales ont des activations suscitées par les solutions sapides : le lobe de l'insula et les opercules frontal, pariétal, temporal qui l'entourent (voir la figure ci-dessus). Il n'existe ainsi pas un unique « centre cérébral de la saveur » ni d'aires cérébrales spécifiques des diverses saveurs. D'autre part, certaines des aires qui n'étaient pas systématique-



Les aires cérébrales stimulées lors de la perception des saveurs.

ment activées participent à la compréhension du langage : d'où l'hypothèse que la détection de la saveur soit associée à sa nomination.

Une deuxième étude, qui comparait cinq gauchers et cinq droitiers, a montré que les quatre aires cérébrales de la saveur n'étaient pas systématiquement inversées dans les deux groupes. En revanche, l'insula réagissait différemment chez les divers individus (voir la figure en haut à gauche). Cette aire est composée de deux régions : la partie haute est activée dans les deux hémisphères, pour les droitiers comme pour les gauchers ; la partie basse s'active plutôt de façon unilatérale dans l'hémisphère dominant des sujets (flèche). Il existe ainsi une latéralisation de la perception de la saveur analogue à celle du langage ou de la motricité.

Une troisième série d'études a comparé la réaction à des molécules uniquement sapides, et la réaction à des molécules à la fois sapides et astringentes ou piquantes. Cette fois, les aires activées étaient analogues, ce qui explique pourquoi le goût, la sensation générale obtenue lors de la dégustation d'un mets, est une sensation si globale et si difficile à analyser : le cerveau construit une sensation globale, par synthèse des signaux provenant des divers types de récepteurs.

Prochain rendez-vous France Info et Pour la Science le 27 avril 1999, avec la chronique Info Sciences de Marie-Odile Monchicourt.