

Des arborescences magnétiques

Les supraconducteurs n'aiment pas les champs magnétiques. C'est même l'un des principaux obstacles à l'utilisation pratique de ces matériaux d'où la résistance électrique est absente. Ainsi, dans le diborure de magnésium, un supraconducteur découvert récemment, le magnétisme provoque la formation d'étranges arbres.

e flux magnétique pénètre la surface, s'infiltre, puis s'enfonce soudainement comme dans un craquement, éclatant en multiples embranchements. En quelques fractions de seconde, il envahit une grande partie du film.

Les supraconducteurs conduisent le courant électrique sans dissipation au-dessous d'une température critique, mais ils ont un talon d'Achille: si l'on tente de faire circuler un courant électrique très intense dans un supraconducteur, comme l'absence de résistance semble pouvoir le permettre, on crée du même coup un champ magnétique si intense qu'il détruit la supraconductivité. C'est ce phénomène qui empêcha Heike Kamerlingh Onnes, découvreur de la supraconductivité en 1911 dans son laboratoire de Leyde, aux Pays-Bas, d'en tirer la moindre application pratique, malgré tous ses efforts.

Tant que le courant électrique est faible, le champ magnétique induit en vertu des lois de l'électromagnétisme reste peu intense, et il est littéralement « expulsé » hors du matériau. Mais lorsque l'intensité du champ magnétique augmente, il finit inéluctablement par pénétrer dans le matériau.

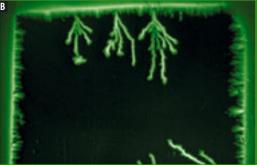
Certains supraconducteurs, dits de type II, résistent mieux

que les autres à cette pénétration : le champ magnétique les traverse, certes, mais seulement dans des zones bien délimitées, des tubes circulaires microscopiques à travers lesquels le flux magnétique est quantifié. Autour de chacun de ces tubes circule un courant électrique qui se comporte comme l'eau dans un tourbillon, d'où le nom de vortex (tourbillon en anglais) donné à ces structures. L'existence de ces vortex a été proposée en 1957 par le Russe Alexei Abrikosov, qui vient d'être récompensé pour cette théorie en 2003, par le prix Nobel de physique [1]. Dans la plupart des matériaux, en présence d'un champ magnétique, des vortex se forment à des intervalles réguliers. S'ils restent immobiles lorsque l'on fait circuler un courant électrique, leur rôle est bénéfique : ils canalisent le champ magnétique, l'empêchant d'envahir tout l'échantillon et de détruire la supraconductivité. En revanche, s'ils se déplacent avec le courant, ils dissipent de l'énergie : le matériau devient résistant. Pour résoudre cette difficulté, ainsi que préserver la supraconductivité, les physiciens ont imaginé de fixer ces vortex dans le matériau, généralement en incorporant des défauts, qui jouent le rôle d'ancrage pour ces minuscules tourbillons. Cependant, certains supraconducteurs de type II présentent ⇒

Cécile Michaut, journaliste scientifique.

[1] Alexandre Bouzdine, « L'héritage de Lev Landau », *La Recherche,* janvier 2004, D. 63.



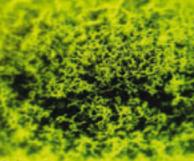




QUAND EST APPLIQUÉ UN CHAMP MAGNÉTIQUE EXTERNE de 3,4 milliteslas (environ cent mille fois le champ magnétique terrestre) perpendiculairement au film

supraconducteur de diborure de magnésium, il ne pénètre pas celui-ci, qui reste opaque (A). À mesure que l'intensité du champ croît, des dendrites commencent à

LES JOINTS ENTRE LES GRAINS D'UN FILM polycristallin d'un flux magnésupraconducteur qui est de la famille des



Des milliers de tubes magnétiques interagissent et s'assemblent pour former d'énigmatiques arborescences

© D.M FELDMANN AND D.C. LARBALESITER/UNIVERSITY OF WISCONSIN/MADISON

⇒ un comportement original, et problématique. C'est le cas par exemple du diborure de magnésium, dont les propriétés supraconductrices au-dessous de 39 kelvins ont été découvertes en 2001 [2]. Dans un film de quelques dixièmes de micromètre d'épaisseur de ce matériau, le flux magnétique forme des motifs arborescents qui sont baptisés dendrites, étrangement semblables aux fissures d'une vitre brisée. Lorsque des dendrites se forments, cela perturbe le passage du courant électrique supraconducteur.

[2] D. Roditchev, J. Klein et W. Sacks, « Le premier supraconducteur double ». La Recherche, novembre 2003, p. 40.

Un phénomène très stable

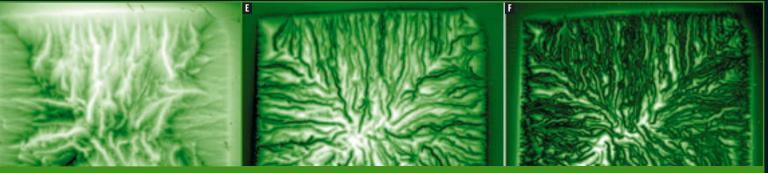
Pour lutter contre ce phénomène et améliorer les propriétés de ces films supraconducteurs, il faut d'abord comprendre comment et pourquoi ces dendrites se forment. C'est la tâche à laquelle s'est attelé Tom H. Johansen, de l'université d'Oslo, en Norvège, à l'aide d'une technique de mesure magnéto-optique, dans laquelle la lumière transmise dépend du champ magnétique local. Pour simplifier la situation, il a placé ses films de diborure de magnésium dans un champ magnétique créé de l'extérieur, orienté perpendiculairement à leur surface. Et, faute de pouvoir observer la formation même des dendrites lors de l'apparition du champ magnétique, dans la mesure où elle est trop rapide, il a examiné leur forme finale.

Premier résultat : plus le champ magnétique est intense, plus le flux magnétique pénètre vers l'intérieur du film, formant de plus en plus de dendrites. Elles sont très stables. Une fois formées, elles ne bougent plus. Si

l'on augmente l'intensité du champ, de nouvelles dendrites se développent, celles existantes restant inchangées. De plus, lorsque le champ magnétique externe est coupé, elles subsistent très longtemps, piégeant une aimantation rémanente. Il faut réchauffer l'échantillon au-dessus de sa température critique pour pouvoir éliminer ces dendrites.

Tom H. Johansen et son équipe ont aussi remarqué que la forme des dendrites dépend de la température. Vers 3 ou 4 kelvins, les dendrites sont fines et linéaires. Plus l'échantillon est chaud, plus les dendrites sont nombreuses et ramifiées. Enfin, au-dessus de 10 kelvins, elles disparaissent : on retrouve alors des vortex bien espacés.

Dans certains supraconducteurs de type II, par exemple ceux de la famille des cuprates, qui sont supraconducteurs jusqu'à des températures de plus de 100 kelvins, les vortex se forment préférentiellement à la périphérie du film. Il en apparaît au milieu du film seulement quand le champ magnétique devient très intense, et il faut appliquer des champs magnétiques colossaux pour détruire toute trace de supraconductivité. Dans le diborure de magnésium, au contraire, des milliers de vortex interagissent les uns avec les autres et s'assemblent pour former les dendrites qui pénètrent vers le centre de l'échantillon. « La croissance des dendrites ressemble à la percolation de l'eau à travers un système poreux, observe Alexandre



se former en partant des bords. Puis elles deviennent de plus en plus longues et nombreuses. Quand le champ atteint 60 milliteslas, elles envahissent tout l'échan-

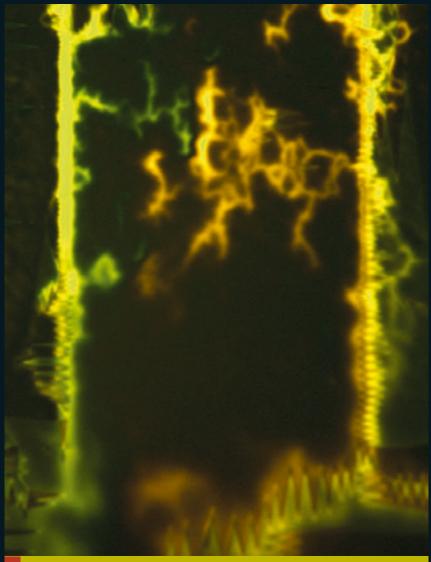
tillon (D). Quand le champ est coupé (F), les dendrites restent figées, emprisonnant un flux magnétique rémanant indéfiniment, sauf si l'on réchauffe l'échantillon.

Bouzdine, professeur de physique de l'université Bordeaux-1. Le motif formé est difficile à décrire : les milliers de vortex qui composent les dendrites interagissent entre eux, avec les défauts du matériau et avec le champ magnétique. »

Le rôle clé de la chaleur

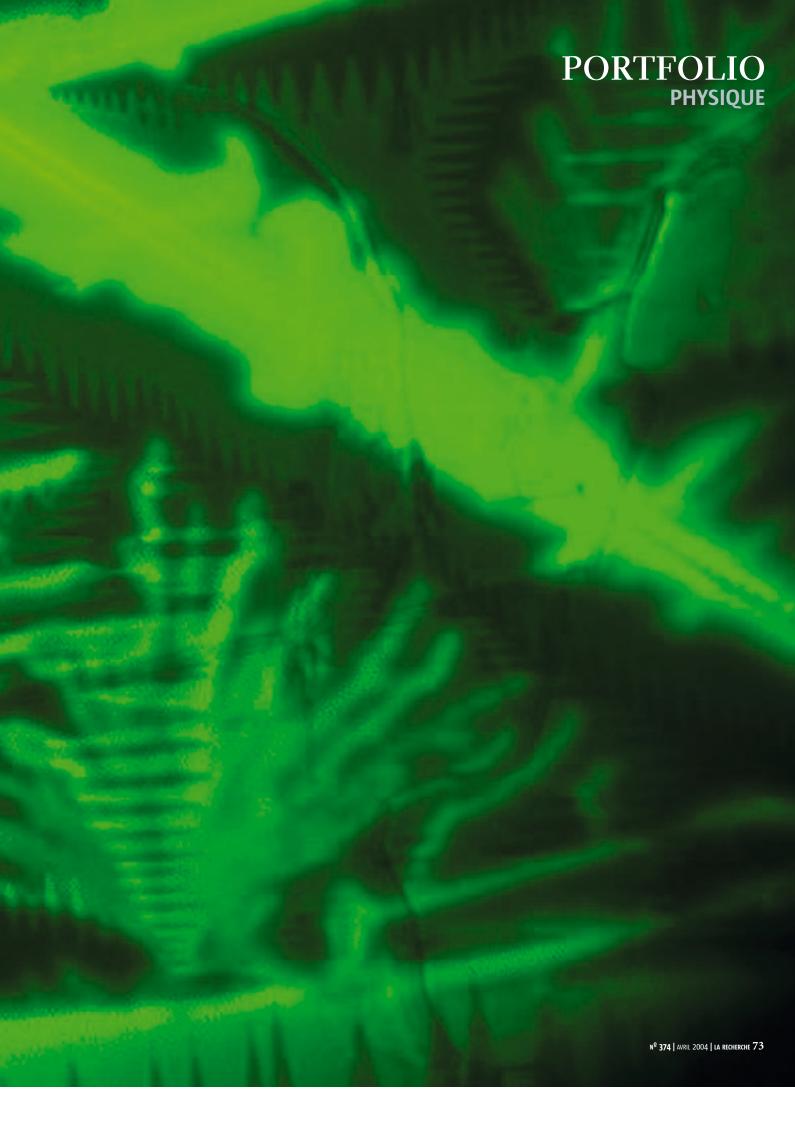
« Il n'existe aucun modèle quantitatif permettant d'expliquer comment les dendrites se forment dans le matériau et pourquoi elles existent dans certains supraconducteurs et non dans d'autres », note Tom H. Johansen. Quelques observations permettent cependant d'y voir plus clair. « La croissance des dendrites n'est pas exclusivement liée aux défauts des matériaux, explique le physicien. En effet, lorsque l'on effectue deux fois la même expérience sur le même échantillon, les dendrites ne sont pas identiques. » Il n'y a donc pas un chemin préférentiel pour les vortex dans le matériau. En revanche, le point de départ des dendrites sur le bord de l'échantillon est souvent identique. Il s'agit probablement de défauts du supraconducteur, qui servent d'initiateurs pour leur croissance.

L'équipe de Tom H. Johansen a effectué des simulations afin de mieux comprendre l'instant fugace pendant lequel les dendrites se forment dans le film supraconducteur. Les vortex se forment d'abord à la périphérie du film mince, et ne s'immobilisent pas immédiatement. « L'idée centrale est que lorsqu'un vortex se déplace dans le supraconducteur, il dissipe de la chaleur. Celle-ci tend à décoincer les vortex placés près de sa trajectoire, entraînant un déplacement en chaîne d'un grand nombre d'entre eux. De fait, nos simulations montrent un tel comportement. Elles reproduisent également l'aspect linéaire des dendrites à basse température et leur tendance à multiplier les branches lorsque la température augmente. »



SI L'ON FAIT CIRCULER UN COURANT dans un film supraconducteur polycristallin de type cuprate, à 77 kelvins, des joints entre les grains cristallins sont le lieu de dissipations localisées (zones brillantes), visibles par imagerie magnéto-optique. Ce phénomène s'oppose à la circulation du courant. © D.M. FELDMANN AND D.C. LARBALESITER/UNIVERSITY OF WISCONSIN/MADISON







Observée sur le diborure de magnésium, la formation des dendrites existe aussi avec d'autres supraconducteurs

⇒ Puisque l'échauffement semble jouer un rôle clé dans la croissance des dendrites, Tom H. Johansen et ses collègues ont eu l'idée de jouer sur ce paramètre pour modifier le comportement du supraconducteur. Ils ont tout simplement disposé sur ce dernier une feuille d'aluminium, qui conduit bien la chaleur. Les résultats sont immédiats : sur la moitié du supraconducteur recouvert par l'aluminium, les dendrites ne se forment que sous un champ magnétique bien plus élevé que dans l'autre moitié test (sans aluminium), et elles sont beaucoup plus petites. Pouvait-on imaginer plus simple méthode pour améliorer l'imperméabilité magnétique des films supraconducteurs ?

Un modèle quantitatif à inventer

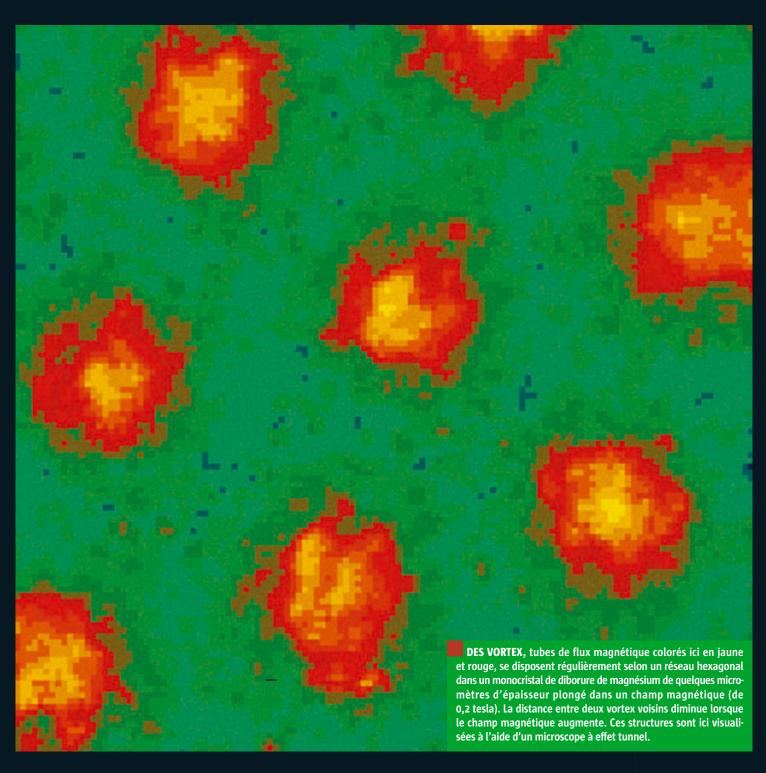
D'autres physiciens doutent cependant que l'effet de la feuille d'aluminium soit d'évacuer la chaleur. En effet, des recherches récentes ont montré que, durant les quelques millisecondes pendant lesquelles les dendrites se forment, leur vitesse de croissance était proche de 100 kilomètres par seconde. Or, on ne connaît pas le mécanisme de transfert de chaleur à une telle vitesse. Selon une autre hypothèse, on envisage qu'au sein de l'aluminium, qui est un bon conducteur électrique, le déplacement rapide des vortex créerait des courants électriques qui modifieraient localement le champ magnétique et s'opposeraient à ces mouvements.

Les recherches n'en sont qu'à leurs débuts. « Notre modèle de la formation des dendrites reste très qualitatif, constate Tom H. Johansen. Un bon modèle devrait être capable de déterminer les différents paramètres permettant l'existence des dendrites, ainsi que leur vitesse, leur taille, etc.

On en est loin!»

La découverte fortuite de la supraconductivité du diborure de magnésium, en 2001, avait échauffé les esprits des physiciens: peu coûteux et facile à fabriquer, ce supraconducteur à la température critique relativement élevée semblait promis rapidement à des applications pratiques. Ils ont déchanté rapidement de ce point de vue, notamment à cause des faibles densités de courant que peut supporter le matériau sans que sa supraconductivité disparaisse: ses applications resteront pro-

CETTE SIMULATION NUMÉRIQUE, qui a été menée par l'équipe de Tom H. Johansen à l'université d'Oslo, en Norvège, reproduit la formation des dendrites. Lors de l'établissement du champ magnétique, de minuscules tubes de flux magnétique apparaissent, d'abord au bord de l'échantillon : ce sont les vortex (points blancs). En bougeant légèrement, ils créent un échauffement qui décoince les autres vortex placés sur leur trajectoire. Ce mouvement entraîne la formation des dendrites.



bablement limitées à quelques niches. Toutefois, et l'exemple des dendrites magnétiques le montre, les études du diborure de magnésium ont permis de découvrir des phénomènes nouveaux d'un point de vue fondamental. Après les avoir observées sur le diborure de magnésium, Tom H. Johansen et son équipe ont recherché des dendrites dans des films d'autres supraconducteurs. Or, ils en ont trouvé. Par exemple dans le nitrure de

niobium, ou dans un alliage niobium-étain, dans lequel elles ressemblent à de superbes cristaux de glace. ■■
C. M.

POUR EN SAVOIR PLUS

www.nobel.se/physics/laureates/2003/index.html www.fys.uio.no/super/dend/