

Si petits, si différents !

Les nanotechnologies permettent bien sûr la miniaturisation de dispositifs divers, au premier rang desquels l'électronique. Mais elles nous plongent aussi dans un univers bien différent du nôtre: des propriétés, des phénomènes inconnus à notre échelle apparaissent en effet à l'échelle atomique, ouvrant la voie à une nouvelle révolution industrielle. Des physiciens de l'Université de Liège et de la KU Leuven viennent d'en faire l'expérience avec des supraconducteurs, établissant une limite en-deçà de laquelle des nanofils perdent définitivement leur qualité supraconductrice, même à très basse température

Xavier Baumans, premier auteur de l'article, jeune assistant au département de physique de l'Université de Liège (pôle des matériaux, professeur Alejandro Silhanek) l'avoue sans ambages: parvenir à publier le premier article de sa carrière dans *Nature Communications* (1) est une remarquable reconnaissance... qu'il lui sera difficile de surpasser. Mais l'exploit réalisé par les physiciens liégeois et louvanistes (pour l'essentiel) mérite assurément une telle reconnaissance.

Leur recherche porte en effet sur le comportement de circuits électroniques

supraconducteurs de très petite taille. «Très petit» signifie ici de 100 nanomètres (100 nm ou 100 millièmes de mètre) jusqu'à... quelques atomes. Des circuits très prisés puisqu'ils interviennent dans la composition des ordinateurs quantiques. *«Il y a de nombreuses années que les chercheurs ont prédit puis constaté un phénomène étrange, explique Xavier Baumans: si on réduit trop la taille des dispositifs, l'effet supraconducteur peut disparaître ! En fait, c'est un double phénomène qui a été observé: les fluctuations du paramètre d'ordre (le basculement entre le caractère supraconducteur ou non) sont de 2 natures, thermiques et quantiques. Comme leur nom l'indique, ces dernières ne sont pas dues à la température mais à la taille, au fait qu'on est à l'échelle de l'atome. On ne sait donc pas les combattre car elles sont intrinsèques au système: même en réduisant la température au 0 absolu, elles sont toujours présentes.»*

Les observations réalisées jusqu'à aujourd'hui avaient cependant des

limites. L'une est relative à la taille des fils étudiés: guère moins de 30 nm. Une autre est le fait que les observations ont été réalisées sur plusieurs échantillons différents: les chercheurs prenaient un fil de 90 nm, puis un autre de 60 et ainsi de suite, avant d'estimer une fourchette dans laquelle le caractère supraconducteur disparaissait.

TOUT EN FINESSE

Le but de la recherche dont les résultats viennent d'être publiés a donc été de déterminer précisément à quelle taille le matériau perd ses propriétés supra et où se situe la transition entre fluctuations thermiques et fluctuations quantiques. Pour y arriver, et c'est une grande innovation de cette recherche, Xavier Baumans et ses collègues ont d'abord repoussé la limite de fabrication des fils jusqu'à moins d'1 nanomètre ! *«Il faut savoir qu'un atome, s'enthousiasme le jeune*

Texte: **Henri DUPUIS** • dupuis.h@belgacom.net
Photos: **Baumans, ULg**/photo microscope (p.43)

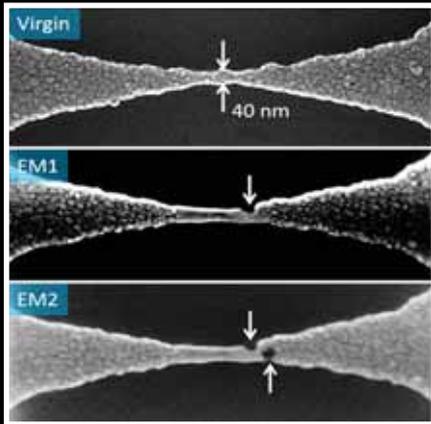


Photo au microscope électronique du fil en aluminium, avec zoom sur la partie centrale plus étroite. La première est l'échantillon intact, tel qu'il est au départ. Les deux suivantes ont été prises après respectivement 1 et 2 électromigrations qui ont créé deux vacances (trous), ce qui rend le fil plus mince à cet endroit. (Baumans, ULg)

LA LIMITE DES 10 NM

chercheur, c'est un dixième de nanomètre; un fil de 10 nm, c'est 100 atomes et un fil de 1 nm, c'est environ 10 atomes de large !» Comment y parvient-on ? Grâce au phénomène d'électromigration, phénomène destructif mais retourné ici à l'avantage des chercheurs.

Il apparaît quand on applique un courant à des fils conducteurs; dans le cas présent, un fil d'aluminium. Le passage du courant provoque une migration des ions métalliques à l'intérieur du fil et le phénomène s'autoalimente et s'emballe. Plus la taille du fil se réduit, plus le courant chauffe le fil puisqu'il est plus mince et donc les ions migrent plus, donc la taille se réduit encore et ainsi de suite. Ce phénomène limite la durée de vie des circuits électroniques. «Nous l'avons utilisé à notre avantage, explique Xavier Baumans, on l'a domestiqué en évitant l'emballement. Un petit courant va commencer à faire migrer les ions et à diminuer la taille du fil. Si on n'y prend pas garde, en quelques secondes, le fil peut casser. Grâce à un contrôle par ordinateur, nous parvenons à réguler le courant dans le fil de telle sorte que si on observe des indices d'emballement, on réagit en moins d'un millième de seconde en baissant la valeur du courant dans le fil; ce faisant, on réduit la migration et l'amincissement du fil. Il faut donc toujours maintenir un courant suffisant pour que les ions migrent (sinon il n'y a pas de diminution du fil) mais pas trop grand pour que la réaction ne s'emballe pas (sinon il y a cassure du fil).» C'est un apport important de la recherche: une maîtrise parfaite du processus d'amoindrissement en continu d'un fil conducteur.

Une maîtrise qui a une conséquence immédiate, deuxième résultat important de la recherche: les mesures sont réalisées sur un seul échantillon ! L'expérience démarre avec un fil de taille bien supérieure à la limite estimée (c'est-à-dire qu'il est supraconducteur), réduite ensuite en plusieurs étapes, par paliers. «Nous sommes ainsi passés d'une largeur de fil d'environ 70 nm jusqu'à moins de 10 nm et on a fait mieux que cela puisqu'une fois, on a réduit la taille du fil à 1 atome de large, donc un dixième de nano !» Les courbes de résultat (voir figure) montrent que le fil a une certaine résistance dans son état normal. Quand on atteint la température de transition, la résistance chute jusqu'à une valeur nulle (supraconductivité, cas du fil à 70 nm).

Pour des largeurs inférieures, on voit que la température de transition n'est plus si bien définie. La résistance décroît moins vite. Plus le fil s'amincit, moins la résistance décroît vite jusqu'à arriver à un endroit où certes elle décroît, mais n'atteint plus jamais 0. Donc le fil n'est plus jamais supraconducteur. Ce phénomène se produit pour une largeur d'environ 10 nm. «C'est la limite entre les fluctuations thermiques et quantiques, explique Xavier Baumans. À partir de cette limite, les fluctuations prépondérantes sont de type quantique. On a beau refroidir un maximum le circuit, cela ne sert à rien: le caractère supra va s'estomper et disparaître. Définitivement».

La détermination précise de la valeur du seuil en deçà duquel cesse la supraconductivité est un troisième apport important du travail du chercheur liégeois. Car les circuits supra-

conducteurs sont prisés par les concepteurs des futurs ordinateurs quantiques. «Nos recherches servent d'abord d'aver-tissement, explique Xavier Baumans. Le caractère supra est essentiel mais si on réduit trop la taille des circuits, cette caractéristique se perd... On a introduit une limite. Même si j'imagine qu'on trouvera comment contourner cette limite.» ■

(1) Thermal and quantum depletion of superconductivity in narrow junctions created by controlled electromigration, Xavier D.A. Baumans et al. NATURE COMMUNICATIONS | 7:10560 | DOI: 10.1038/ncomms10560 |

La courbe noire est celle de l'échantillon de départ: une résistance à haute température (partie plate à droite du graphique) puis une chute qui commence à une température donnée (la température critique du supraconducteur, nanofil d'aluminium = 1.32 K) pour rapidement tomber à une résistance nulle (0 Ohm = 0 Ω). Les courbes suivantes sont prises après les électromigrations successives (qui ont pour effet de rendre le fil plus fin): la résistance commence à chuter au même endroit mais décroît plus lentement ! Elle finit même par ne plus atteindre 0 mais une valeur non nulle qui est de plus en plus élevée. Le fil n'est plus supraconducteur même si on descend à 0.3K (à peine au-dessus du zéro absolu).

