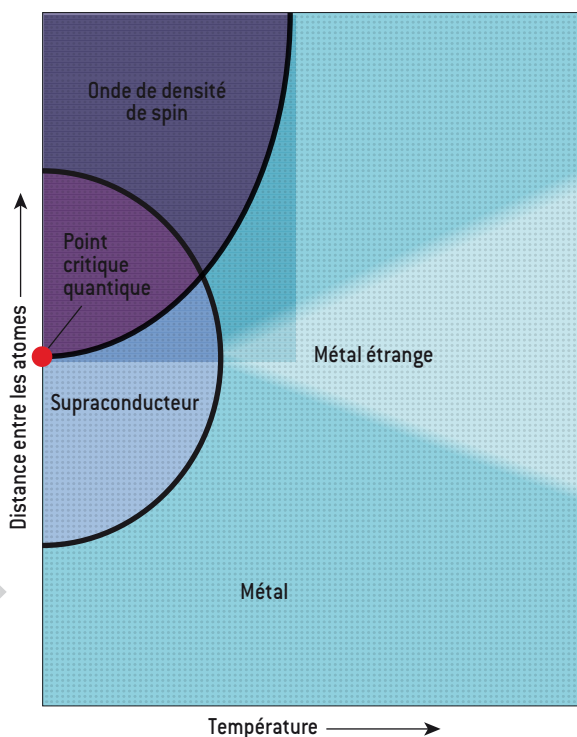
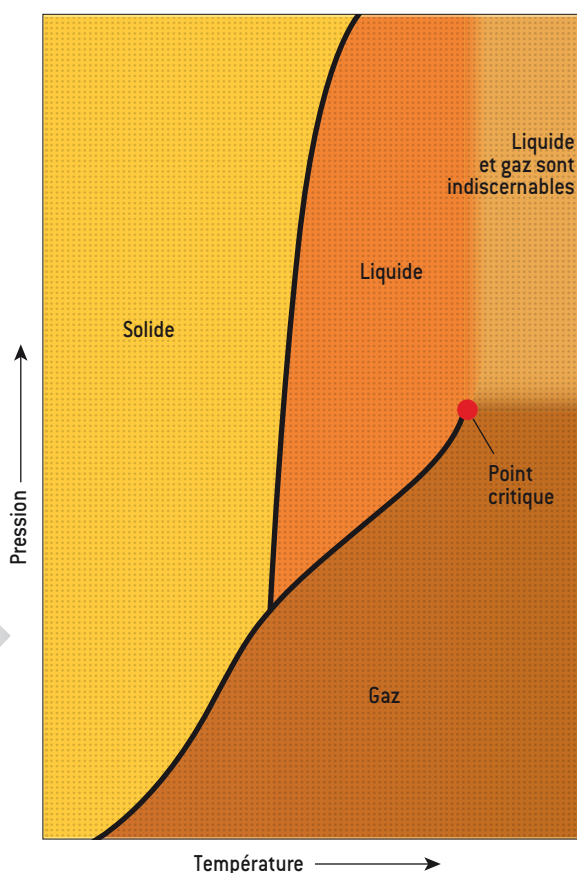




Une partie des électrons errent dans tout le cristal et, quand nous relions le solide à une pile, un courant électrique s'établit. Dans à peu près tous les matériaux, le courant électrique suit la loi d'Ohm : son intensité est égale à la tension divisée par la résistance. Les isolants électriques tels que le téflon ont une résistance élevée ; les métaux conducteurs tels que le cuivre, une résistance faible. La résistance est associée à l'effet Joule, un phénomène de perte d'énergie par dissipation de chaleur. Les supraconducteurs ont une résistance quasi nulle, ce qui leur procure un grand intérêt et d'importantes applications industrielles. Ils ont été découverts en 1911 par le physicien néerlandais Heike Kamerlingh Onnes qui étudiait le mercure refroidi au-dessous de -269°C . Aujourd'hui, nous connaissons des matériaux qui sont supraconducteurs aux températures (relativement) élevées de -138°C .

Les conducteurs, les isolants et les supraconducteurs correspondent à diverses phases de la matière. Dans chaque cas, l'essaim électronique revêt une forme différente. Ces deux dernières décennies, les physiciens ont découvert encore d'autres phases électroniques dans les solides. Un exemple, pourtant très intéressant, n'a même pas de nom : par défaut, les physiciens le nomment « le métal étrange ». Il est caractérisé par une résistance électrique qui varie de façon inhabituelle avec la température par rapport aux métaux ordinaires.

Des ondes dans la matière

Les différences entre ces phases résultent du comportement collectif des électrons et de leurs propriétés. Si le mouvement des atomes dans les solides, les liquides et les gaz peut être décrit par la mécanique classique, le comportement des électrons est purement quantique. Les principes clefs qui régissent l'état des électrons d'un solide sont des versions à plus grande échelle de ceux que suivent les électrons au sein d'un atome. Un électron lié à un noyau est décrit comme une onde. Il est caractérisé par plusieurs propriétés, telles que son énergie et son spin – un moment cinétique quantique. Le spin confère un moment magnétique à l'électron, qui se comporte comme un petit aimant ; il existe dans deux états de base possibles notés « haut » et « bas ».

La principale règle gouvernant les électrons des atomes – et toutes les particules de matière nommées fermions – est le principe d'exclusion de Pauli : deux électrons ne peuvent pas occuper le même état quantique. Dans un atome, les électrons occupent d'abord les états disponibles de plus basse énergie, puis remplissent les niveaux supérieurs, comme un verre se remplit d'eau de bas en haut.

Dans un morceau de métal contenant 10^{23} électrons, le raisonnement est le même. Les électrons les moins liés à leur atome d'origine occupent des états qui s'étendent dans le cristal entier. On peut se

représenter ces états comme des ondes sinusoïdales, dont la longueur d'onde est reliée à l'énergie des électrons. Les électrons occupent les états de plus basse énergie possible compte tenu du principe d'exclusion. Ensemble, ils remplissent en général tous les états jusqu'à une énergie inférieure à un certain seuil, l'«énergie de Fermi» (voir l'encadré pages 38 et 39).

L'application au métal d'une tension électrique confère à certains électrons suffisamment d'énergie pour passer d'un état occupé à un état vacant dont l'énergie est supérieure au niveau de Fermi. Ces électrons peuvent alors circuler librement. Dans un isolant, la densité des électrons est telle que tous les états accessibles sont déjà occupés, l'accès aux états libres nécessitant trop d'énergie; même en appliquant une tension, un électron n'a nulle part où aller, et aucun courant ne circule.

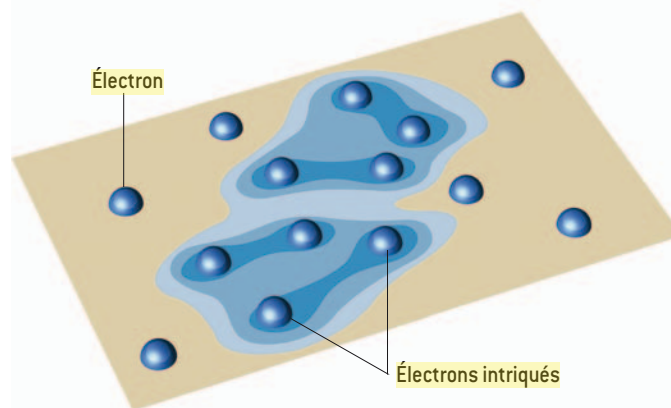
Supraconducteurs : des paires d'électrons

Dans les supraconducteurs, les choses se compliquent. Les électrons ne peuvent pas être décrits de façon individuelle. Ils se lient par paires, comme le décrit la théorie de la supraconductivité développée en 1957 par les physiciens américains John Bardeen, Leon Cooper et John Robert Schrieffer (BCS). Au premier abord, ce système de couples peut sembler étrange: deux électrons devraient se repousser, car ils ont la même charge électrique. En fait, les vibrations du réseau cristallin créent indirectement une force attractive entre les électrons, qui l'emporte sur leur répulsion naturelle. Chaque paire se comporte non pas comme un fermion, mais comme un boson, type de particule quantique qui n'obéit pas au principe d'exclusion de Pauli. Les paires d'électrons peuvent toutes se condenser dans le même état avec l'énergie la plus faible possible, un phénomène nommé condensation de Bose-Einstein. Dans l'analogie du verre d'eau, cela reviendrait à verser de l'eau qui, au lieu de remplir le verre, va former au fond une mince couche capable d'absorber toute l'eau sans s'évaporer.

Si l'on applique une tension à un tel matériau, les électrons passent dans un état d'énergie supérieure, ce qui produit un courant: rien ne gêne la circulation des électrons appariés. Ainsi, un supra-

UN ÉCHEVEAU D'INTRICATION

Pour des raisons que les physiciens n'ont pas encore élucidées, les phases quantiques de la matière présentent, de façon implicite, une dimension spatiale qui se révèle au moment des transitions de phase ou dans certains états de la matière. Cette dimension se manifeste dans la description mathématique de cette relation particulière entre particules qu'est l'intrication.



Intrication des électrons

L'intrication signifie que plusieurs particules quantiques agissent de concert comme un tout indissociable. Les physiciens étudient plus souvent l'intrication de deux particules, voire de quelques-unes, mais dans les matériaux qui subissent une transition d'une phase quantique à une autre, un très grand nombre d'électrons sont intriqués.

conducteur transmet un courant avec une résistance nulle.

Ces succès de la physique quantique pour expliquer le comportement des métaux, des isolants, des supraconducteurs et d'autres matériaux tels que les semi-conducteurs (à l'origine de l'électronique moderne) ont conduit de nombreux physiciens du début des années 1980 à conclure qu'ils s'approchaient d'une compréhension

NOUS CRAIGNIONS QU'UNE THÉORIE des phases quantiques de la matière nous échappe à jamais... jusqu'à ce que nous prenions conscience des possibilités offertes par la théorie des cordes.

complète des électrons dans les solides, et que toutes les découvertes majeures étaient derrière eux. Cette assurance a volé en éclats avec la découverte des supraconducteurs à haute température.

La théorie BCS n'explique pas comment ces matériaux deviennent supraconducteurs. Plus étonnant, il est possible d'observer une transition de phase à zéro kelvin, entre l'état supraconducteur et un état nommé «onde

de densité de spin» (voir l'encadré page 43). En se plaçant au point de transition de phase – en dopant le matériau ou en exerçant sur lui une pression pour changer la distance entre les atomes –, le point critique quantique, on peut obtenir un nouvel état si l'on augmente la température: le métal étrange.

Le principe physique permettant de décrire le point critique quantique, les supraconducteurs et les métaux étranges

associés est précisément la caractéristique de la mécanique quantique qui dérangeait tant Einstein, Podolsky et Rosen: l'intrication. Pour comprendre ce phénomène, considérons une paire d'électrons intriqués, dont les spins sont anti-

corrélés. Si un électron a un spin *haut*, l'autre a forcément un spin *bas*. Il n'est cependant pas possible de dire *a priori* quel électron est doté de quel spin.

À première vue, cela pourrait sembler banal. L'anticorrélation se rencontre souvent: si vous avez une paire de chaussures et que vous en mettez une près de la porte d'entrée et l'autre près de la porte de derrière, alors, quand vous trouvez une chaussure gauche