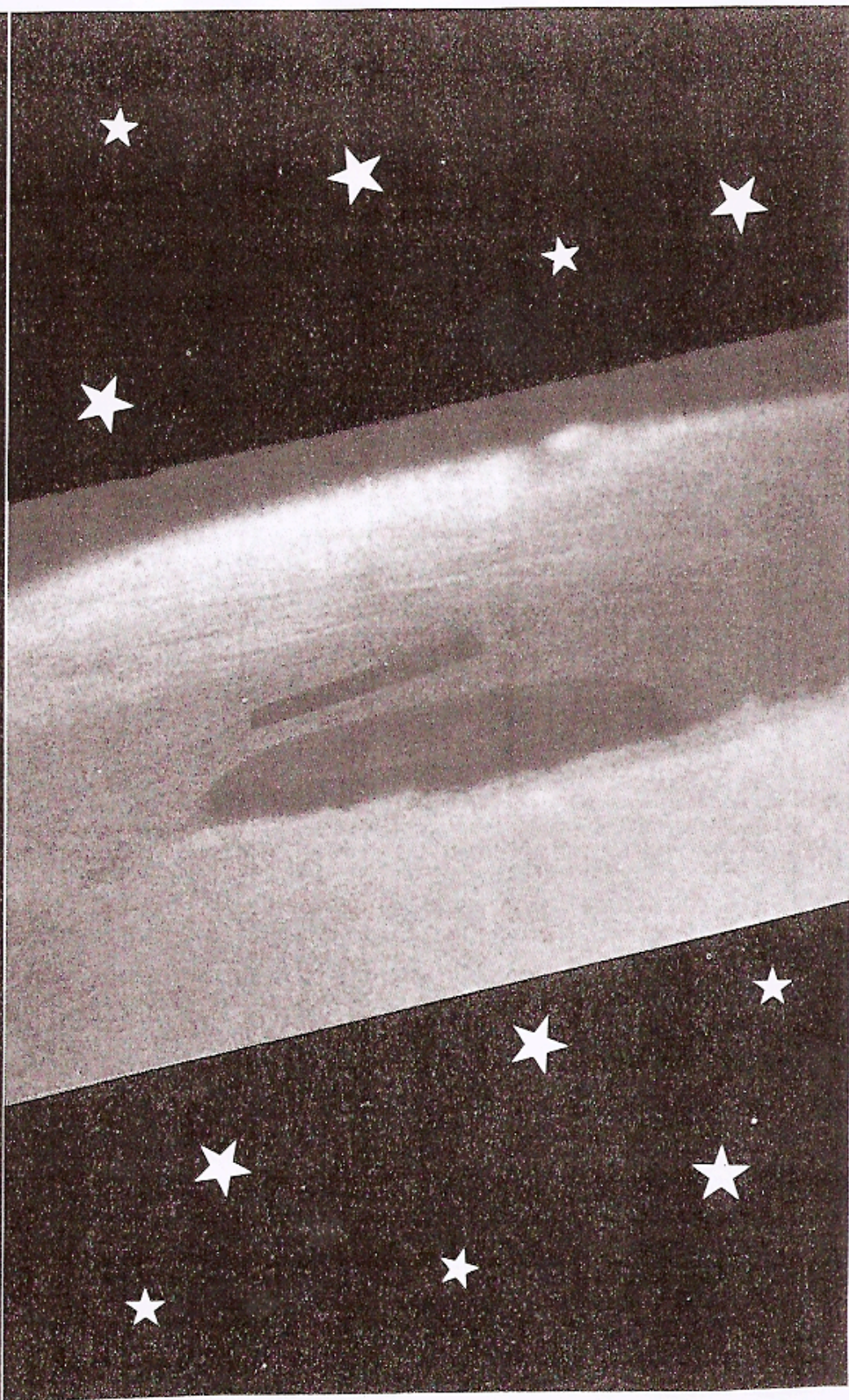


# NOUVELLES TECHNOLOGIES





# LA SUPRACONDUCTIVITE

## Haute température

Jean-Paul Biberian

**E**

*n mars 1987, une équipe de recherche américaine de l'Université de Houston au Texas, dirigée par le professeur Chu, annonçait qu'elle venait de découvrir un matériau supraconducteur à  $-183^{\circ}\text{C}$ . Ces travaux faisaient suite à des résultats nouveaux obtenus par l'équipe Müller-Bednorz du laboratoire IBM de Zurich en Suisse, qui obtinrent le prix Nobel de physique cette même année. Cette nouvelle fit l'effet d'un ouragan dans les milieux scientifiques de toute la planète.*

*A la réunion de l'American Physical Society de mars 87, c'est un véritable happening qui se produit. La salle de 1 200 places de l'hôtel Hilton de New York est prise d'assaut par 3 000 personnes ! Pour le commun des mortels, cela ne signifiait pas grand chose, mais pour de nombreux scientifiques, c'était un mythe qui venait de disparaître. Dans cet article, nous allons voir l'importance de la supraconductivité et ses développements récents. Nous essayerons également de percevoir des applications possibles en audio.*

### La conductibilité électrique

Avant de comprendre la supraconductivité, nous allons analyser le problème de la conductibilité et donc de la résistance électrique. La conduction du courant électrique dans un conducteur est un phénomène complexe, mais nous allons le

simplifier pour comprendre les causes essentielles de la résistance d'un conducteur au passage d'un courant.

En première approximation, dans un conducteur métallique, ce sont les électrons libres, d'ailleurs appelés électrons de conduction qui assurent le passage du courant électrique. On sait maintenant que le courant élec-

trique se propage à la vitesse de la lumière mais les électrons se déplacent à une vitesse bien plus faible. Les électrons sont attirés par la différence de potentiel aux bornes du conducteur et le champ électrique ainsi créé les accélère. Puisque le champ est constant, l'accélération est constante et, en conséquence, la vitesse des électrons pourrait

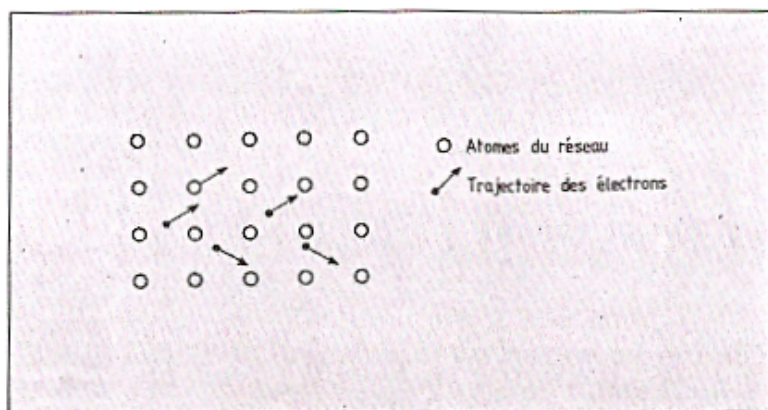


Fig. 1 : Le frottement des électrons s'accompagne de chaleur, c'est la loi de Joule.

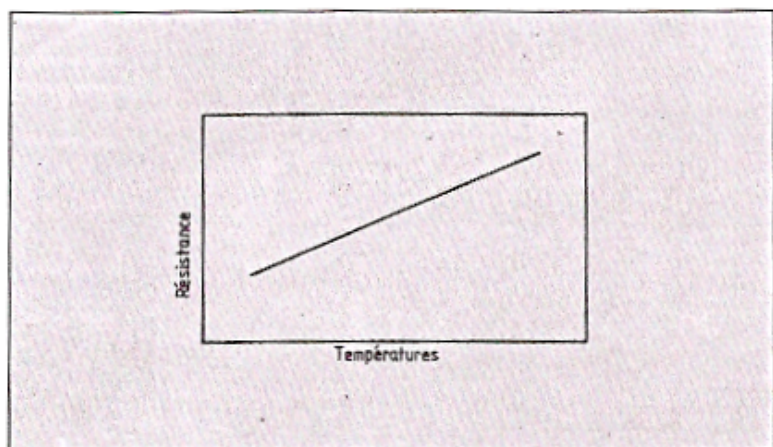


Fig. 2 : La résistance d'un conducteur augmente avec la température.

devenir infinie ou au moins très grande. Cela ne se produit pas, d'une part la théorie de la relativité interdit les vitesses supérieures à celle de la lumière mais, dans les cas habituels, cet effet est négligeable et, d'autre part, les chocs entre électrons limitent cette vitesse. C'est un phénomène de frottement analogue à celui des gouttes de pluie qui sont freinées par l'atmosphère et qui atteignent une vitesse limite quelle que soit l'altitude d'où tombe la pluie. Ce frottement produit de la chaleur, c'est ce que l'on appelle la loi de Joule. La figure 1 décrit ce phénomène.

L'effet Joule est utile dans de nombreux cas pratiques, chaque fois que l'on veut utiliser un effet thermique. Par contre, il est

gênant dans d'autres applications : transport électrique, bobine pour réaliser des champs magnétiques intenses, etc. Pour pallier ce problème, on utilise des matériaux les plus conducteurs possibles, par exemple du cuivre. Par ailleurs, la résistivité d'un matériau varie avec la température. Pour les conducteurs, elle augmente avec la température. Le filament d'une lampe à incandescence ou d'un tube électronique a une plus faible résistance à froid avant la mise en route qu'à chaud après utilisation. La puissance dissipée dans une résistance étant inversement proportionnelle à la résistance, à froid la puissance dissipée est beaucoup plus grande, ce qui est une source de risque de sur-

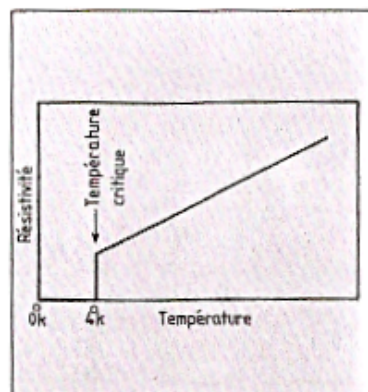


Fig. 3 : Dans le cas du mercure, la résistivité devient nulle à  $0^{\circ} \text{K}$ .

chauffe momentanée à l'allumage. Une lampe ou un tube s'usera donc beaucoup plus si les marches/arrêts sont fréquents. D'ailleurs, nous avons tous l'expérience de lampes qui grilent à la mise en marche. C'est une raison de plus de ne pas éteindre les amples à tubes ! La figure 2 montre la dépendance de la résistivité d'un conducteur en fonction de la température.

## La découverte de la supraconductivité basse température

Nous venons de voir que la résistivité électrique variait avec la température. En 1911, H.K. Onnes traçait cette courbe pour le mercure et il s'aperçut que brutalement la résistivité devenait nulle vers  $4^{\circ} \text{Kelvin}$ , c'est à dire 4 degrés absolus, soit  $-269^{\circ} \text{C}$ . La figure 3 montre cette courbe de variation de la résistivité.

C'était une découverte absolument surprenante et inexplicable avec les théories de l'époque. On découvrit que ce phénomène était général et de nombreux métaux avaient un comportement semblable. Si on faisait circuler un courant dans une boucle fermée, celui-ci tournait indéfiniment sans décroître ! Cet effet était fabuleux mais présentait un très grave inconvénient : c'est qu'il nécessitait des très basses



températures correspondant à celle de l'hélium liquide. C'étaient donc des techniques très lourdes à mettre en œuvre. Néanmoins, au cours des années, les techniques des basses températures se sont sensiblement améliorées et on a été capable de trouver des applications essentiellement pour la création de champs magnétiques puissants. Par exemple, à Cadarache est installée une machine de fusion contrôlée équipée d'aimants supraconducteurs. Les Allemands et les Japonais travaillent sur des trains à suspension magnétique dont les champs magnétiques sont créés par des bobines supraconductrices refroidies à l'hélium liquide.

Finalement, ce n'est que dans les années 60 que trois physiciens américains, Bardeen, Cooper et Schrieffer ont développé une théorie permettant, avec l'aide de la mécanique quantique, de comprendre la supraconductivité. Dans leur théorie, connue depuis comme le modèle BCS, ils expliquent la formation de paires d'électrons qui, étant dans un état quantique différent, n'interagissent plus les uns avec les autres. Tout cela paraît un peu mystérieux car la mécanique quantique n'a pas d'équivalent dans notre monde habituel. Cependant, déjà dans un atome les électrons restent séparés les uns des autres sans interaction et tournent sans fin autour du noyau. Les chocs entre électrons ne sont donc pas inévitables.

Pendant de nombreuses années, on s'est penché sur le problème de la température critique à laquelle un matériau devient supraconducteur et de nombreux alliages ont été essayés. Mais ce n'est que très lentement que celle-ci a évolué. Jusqu'au début des années 80, on dépassait à peine les 20° K. D'ailleurs, plusieurs théories prédisaient que la limite maximale était peu élevée ! Cela découragea de nombreuses équi-

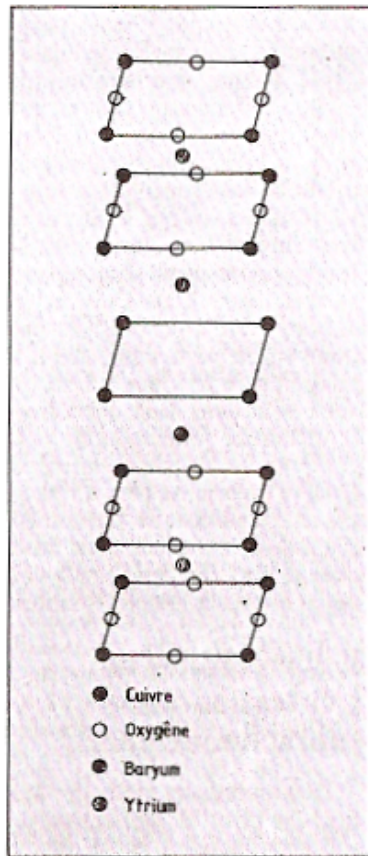


Fig. 4 : Structure cristalline des nouveaux composés supraconducteurs.

pes et peu de gens travaillaient au début des années 80 sur la supraconductivité. C'était devenu un sujet technologique de fabrication de conducteurs de bonne qualité refroidis à l'hélium liquide et plus tellement un sujet de recherche fondamentale. Pourtant, le rêve de nombreuses personnes était de trouver des matériaux supraconducteurs à la température ambiante ou au moins à 77° K (-196° C), la température de l'azote liquide beaucoup plus facile à réaliser industriellement.

### La découverte de la supraconductivité haute température

Les choses semblaient en rester là lorsque, en mars 86, Müller

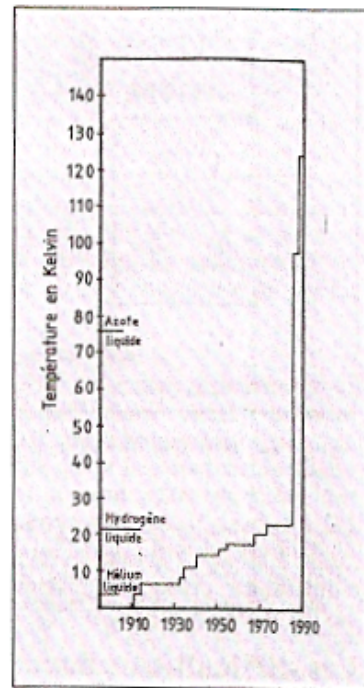


Fig. 5 : Evolution de la température critique depuis le début du siècle.

et Bednorz essayèrent des nouveaux matériaux découverts par une équipe française de Caen dirigée par Bernard Raveau. C'étaient des oxydes, donc a priori des isolants et ces nouveaux composés présentaient des signes de supraconductivité aux environs de 35° K. C'était un progrès important, d'autant plus que c'était une nouvelle catégorie de composés. De nouvelles potentialités étaient ouvertes. Un an plus tard, C.W. Chu fabriqua un supraconducteur ayant une température critique de 90° K, c'est à dire au dessus des 77° K de la température de l'azote liquide. Ce matériau de composition  $YBa_2Cu_3O$  est un oxyde d'yttrium, de baryum et de cuivre. Sa structure cristalline est montrée sur la figure 4. Elle est composée de feuillets de cuivre et d'oxygène.

Depuis, des améliorations ont été apportées et on sait maintenant fabriquer des composés à base de thallium ayant une tem-



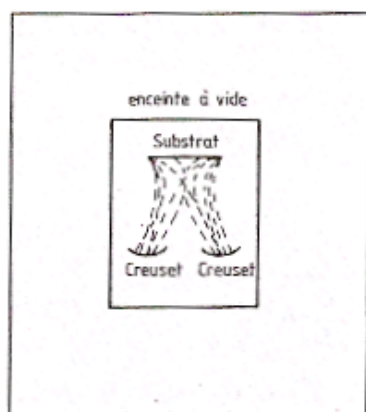


Fig. 6 : La technique du dépôt sous vide.

température critique de 125° K. La figure 5 montre l'évolution de la température critique au cours des 70 dernières années.

### Les difficultés

Ce qu'il y a de surprenant avec ces nouveaux supraconducteurs haute température, c'est leur facilité de fabrication. On n'a pas besoin de gros équipements, c'est un produit réalisable dans sa cuisine. Cependant, entre l'expérience de laboratoire et le produit industriel, le chemin est long. De nombreux laboratoires publics et privés se sont jetés sur ce sujet d'étude tant sont importantes les applications potentielles. Mais ce matériau présente le grave inconvénient d'être très fragile. C'est une céramique, donc très cassant et on ne peut pas directement en fabriquer des fils. On s'est donc orienté vers le dépôt d'un film très mince, de quelques microns d'épaisseur, sur un ruban métallique (comme l'argent). On sait depuis peu fabriquer des fils de plusieurs mètres de long laissant passer des courants importants.

Bien que la reproductibilité de fabrication de l'YBaCuO soit très grande, plusieurs laboratoires ont signalé des résultats non reproductibles de températures de transition beaucoup plus élevées avec d'autres compositions.

Plusieurs équipes pensaient avoir atteint la température ambiante. Mais aucune confirmation n'a pu être obtenue, on peut en conclure que : soit le produit formé était instable, soit une erreur de méthode expérimentale a faussé les résultats, ce qui n'est pas du tout impossible. Néanmoins les travaux continuent intensément, surtout aux Etats-Unis et au Japon, pour améliorer ces produits et, en particulier, élever la température critique. Les travaux vont dans deux directions : la recherche fondamentale pour comprendre les mécanismes, car aucune théorie ne peut à l'heure actuelle expliquer ce phénomène et l'industrialisation, pour fabriquer le plus rapidement possible des produits commercialisables.

### Les méthodes de fabrication des supraconducteurs

De nombreuses méthodes sont utilisées pour la fabrication des supraconducteurs haute température. Le moyen le plus simple est celui utilisé aux origines de leur découverte où les différents constituants sont mélangés ensemble, puis mis sous pression. Des recuits sous oxygène à haute température sont ensuite nécessaires pour que le matériau devienne semiconducteur. Cette technique a le gros avantage de la facilité de réalisation mais présente le grave défaut de produire des matériaux très peu souples. On ne peut pas facilement les transformer en fils nécessaires à de nombreuses applications.

On s'est orienté vers d'autres technologies telles que le dépôt sous vide qui permet de faire évaporer séparément les différents constituants à partir de creusets. Cette technique « propre » autorise un contrôle excellent de la composition du produit final. La figure 6 montre le schéma d'un tel appareillage. Evidemment, cela n'autorise que la formation

de films très minces de quelques  $\mu\text{m}$  d'épaisseur. Néanmoins, cette méthode permet la réalisation de couches sur substrat métalliques souples. Il est à noter que dans le domaine de la supraconductivité, un métal même bon conducteur est isolant en comparaison de la couche supraconductrice.

D'autres techniques sont étudiées qui ressemblent à cette dernière, en particulier la pulvérisation laser, où un faisceau laser pulvérise sous vide le matériau qui se dépose sur un substrat.

### Les applications de la supraconductivité

La supraconductivité, quelle soit à haute ou à basse température, a de nombreuses applications. On pense évidemment en premier lieu au transport de l'électricité qui coûte 10 % de pertes, c'est à dire pour la France seule l'équivalent d'une dizaine de centrales nucléaires ! Evidemment refroidir des câbles électriques sur des milliers de kilomètres à la température de l'hélium liquide et même à la température de l'azote liquide, est quasi impossible.

Un autre point important est celui du stockage de l'électricité qui est une des grandes difficultés actuelles car il est difficile d'adapter la production à la consommation. Or, avec un système de bobines supraconductrices, on peut faire tourner presque indéfiniment du courant alternatif que l'on réutilise au moment du besoin. Avec des matériaux supras à haute température, cela devient tout à fait réalisable car il est facile d'obtenir la température de l'azote liquide.

La fabrication de moteurs électriques pourrait être aussi grandement facilitée par l'utilisation de matériaux supras haute température. Des prototypes ont déjà été réalisés.

Les trains à sustentation magnétique sont un autre

domaine très important, Allemands et Japonais ont déjà réalisé des prototypes refroidis à l'hélium liquide. L'arrivée des supraconducteurs à haute température pourrait révolutionner les transports de l'avenir, surtout sur les distances moyennes. Cette technologie pourrait utiliser la propriété des supraconducteurs de repousser les champs magnétiques. C'est l'expérience bien connue maintenant de l'aimant qui flotte au dessus d'un supraconducteur.

Les applications légères sont déjà en cours de réalisation. On trouve déjà sur le marché des détecteurs de champ magnétique faible, appelés Squid, refroidis à l'hélium ou à l'azote liquide. Ces détecteurs ont déjà permis de faire une cartographie magnétique du cerveau.

IBM a travaillé pendant de nombreuses années sur les ordinateurs fonctionnant grâce à un effet quantique connu sous le nom d'« effet Josephson » qui permet par effet tunnel le passage de courant à travers une barrière isolante très mince. Cette société avait arrêté les travaux peu de temps avant la découverte des nouveaux matériaux. Ces travaux ont maintenant repris principalement au Japon. On devrait, avec cette technologie, réaliser des ordinateurs extrêmement rapides.

Les convertisseurs analogiques-numériques très rapides sont aussi une autre application importante.

On envisage également la fabrication de réseaux de détec-

teurs infra-rouges permettant de faire de l'imagerie IR.

Enfin, la propriété des supraconducteurs de repousser les champs magnétiques pourrait dans un avenir prochain permettre de créer des enceintes sans champ magnétique.

### Les applications audio

On peut se demander à juste titre s'il existe des applications pratiques de la supraconductivité en audio. De toute évidence, dans l'état actuel de nos connaissances, la réponse est non. Bien que l'azote liquide soit couramment utilisée en laboratoire et en milieu industriel, son emploi est très problématique dans le domaine grand public.

Néanmoins, les conditions seraient tout à fait différentes si on arrivait à atteindre la température ambiante. Dans ce cas, les applications seraient nombreuses.

### Les blindages magnétiques

Nous vivons dans un environnement électromagnétique intense, en particulier le 50 Hz est présent partout. On peut envisager des coffrets protégeant entièrement l'électronique du parasitage électromagnétique externe.

### Les transformateurs

Les bobinages des transformateurs peuvent être fabriqués à partir de fils supraconducteurs, ce qui limiterait énormément

l'échauffement, surtout pour les amplis fonctionnant en classe A.

### Les haut-parleurs

On peut sérieusement envisager la fabrication de bobines supraconductrices pour les haut-parleurs. L'aimant permanent pourrait être aussi remplacé par un bobinage. Ce qui se traduirait par un gain important de poids.

### Les câbles

Un câble sans résistivité serait probablement idéal, puisque tous les phénomènes parasites sont dus à la structure du fil, ce qui a pour effet de créer des composants passifs indésirables sur la ligne. La suppression de la résistance du fil devrait les faire disparaître pratiquement tous.

### Conclusion

Nous venons de voir que la découverte récente de la supraconductivité était un phénomène d'un intérêt capital. Il est probable que, dès le début du siècle prochain, des applications pratiques verront le jour. Si l'évolution ne se fait pas rapidement vers des températures de transition plus élevées, il est quasi certain qu'elles se limiteront aux domaines scientifiques et industriels. Par contre, s'il est possible de réaliser des supraconducteurs à haute température, alors les applications grand public deviennent innombrables et les conséquences pour l'audio seront certainement très importantes et, sans aucun doute, les premières mises en œuvre.

**ABONNEZ-VOUS A L'AUDIOPHILE**  
**HAUTE FIDÉLITÉ PLUS!**