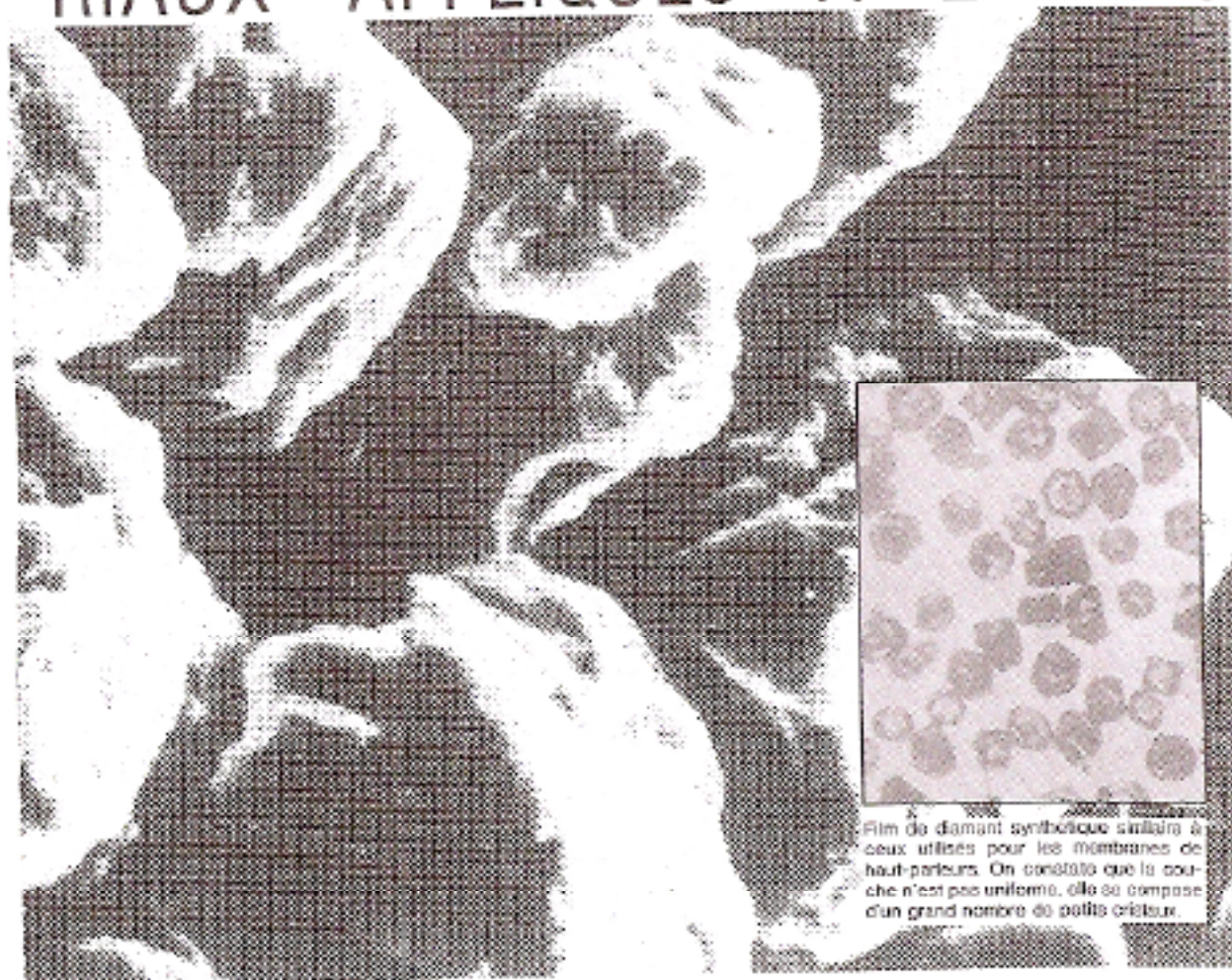


## LES NOUVEAUX MATE

*Jean-Paul Biberian*

**D**ans la première partie de cet article, parue dans le numéro précédent, nous avons passé en revue les différents aspects de la physique de base des matériaux : thermodynamiques, cristallographie, réactivité, permettant de comprendre les mécanismes à l'origine de leurs propriétés. Nous avons vu que ceux-ci n'étaient pas parfaits et présentaient des points faibles qui limitaient leurs applications. Ce qui caractérise les nouveaux matériaux par rapport aux anciens, c'est leur haut degré de non-équilibre thermodynamique. Ils sont fabriqués dans des conditions très éloignées des conditions ambiantes, ce qui en fait des matériaux instables. Ils sont donc à la fois très performants, mais très difficiles à réaliser.

# RIAUX APPLIQUES A L'AUDIO



Film de diamant synthétique similaire à ceux utilisés pour les membranes de haut-parleurs. On constate que la couche n'est pas uniforme, elle se compose d'un grand nombre de petits cristaux.

Nous allons voir maintenant comment faire pour optimiser l'emploi des matériaux en leur faisant subir des traitements spécifiques qui leur confèrent les propriétés souhaitées pour les applications audio. Nous allons passer en revue la majorité des éléments constitutifs d'une chaîne Hi-Fi et nous mettrons en relief les propriétés des matériaux utilisés. Nous verrons les raisons des choix faits et les limites physico-chimiques.

## 1. Les enceintes acoustiques

Il semble intéressant de commencer par cet élément, car ici

intervient plus qu'ailleurs le paramètre mécanique. Dans un haut-parleur, on veut transformer un signal électrique en un signal acoustique et ce, avec une bande passante de 20 kHz et une dynamique de 90 dB, ces contraintes sont beaucoup plus critiques que ce qu'il apparaît au premier abord, surtout pour un équipement non professionnel. La membrane du haut-parleur doit transmettre fidèlement les mouvements produits par l'électroaimant. Elle doit être légère pour ne pas créer d'inertie qui s'oppose à l'excitation de la bobine qui produirait un déphasage variable avec l'amplitude et la fréquence du signal, ce qui

détruirait évidemment la qualité de la reproduction. La membrane doit cependant être rigide pour ne pas se déformer au cours du fonctionnement et apporter des distorsions inacceptables. Ce compromis est difficile à réaliser mais, récemment, il a été possible de fabriquer des membranes de haut-parleurs recouvertes d'un film de diamant. Nous avons vu dans la première partie que le carbone avait deux structures cristallines : la structure diamant avec un atome de carbone à chaque sommet d'un tétraèdre, c'est-à-dire une pyramide à quatre faces et un atome au centre, et la structure graphite en forme de feuillets hexagonaux.

La première est très rigide, difficilement déformable, c'est une forme quasiment triangulée comme toutes les structures métalliques rigides : grues, ponts, la Tour Eiffel. Par contre, la deuxième est tendre, à cause de la structure en feuillets qui, comme une pâtisserie bien connue, se détruit facilement sous contrainte mécanique.

Malheureusement, la difficulté consiste à fabriquer des films de diamant. Jusqu'à très récemment, on ne savait produire du diamant synthétique que dans des presses à très haute pression qui simulaient ce qui se produit naturellement au centre de la terre car, comme nous l'avons vu précédemment, le diamant est instable dans les conditions habituelles de température et de pression.

De nombreuses tentatives avaient eu lieu pour fabriquer du diamant synthétique à basse pression. Récemment, une équipe soviétique a réussi à le faire par une méthode connue sous le nom de « dépôt plasma ». Dans une telle réalisation, on introduit un gaz contenant du carbone, par exemple le méthane, à basse pression, c'est-à-dire quelques millièmes de la pression atmosphérique, dans une enceinte close où règne un champ électrique alternatif (voir figure 1). Les électrons entourant les molécules de gaz sont secoués par le champ électrique et s'en détachent. On se retrouve alors dans le quatrième état de la matière : le plasma, où électrons et molécules ionisées coexistent. C'est ce qui se produit dans le soleil et, plus près de nous, dans les tubes fluorescents. Ces espèces chimiques ionisées sont plus actives que les molécules de gaz neutres. Elles atteignent la surface d'une des électrodes produisant la décharge électrique et forment une couche qui, dans certaines conditions, est du diamant. Les films ainsi obtenus sont très minces, de l'ordre du

micron, c'est-à-dire un millième de millimètre, et discontinus, ce sont de petites pyramides jointives d'environ un micron de base également, comme montré sur la figure 2.

Ces films ne sont pas encore excellents, mais ils semblent très prometteurs pour l'avenir, aussi bien dans le domaine des membranes de haut-parleur que pour de nombreuses autres applications industrielles.

En ce qui concerne les membranes plus traditionnelles utilisées actuellement, il est clair que les conditions d'humidité ont un grand rôle à jouer car, même si elles sont recouvertes d'une couche de protection, celle-ci se craquelle au fur et à mesure du fonctionnement et l'humidité peut pénétrer dans le volume du

matériau. La membrane humide aura des caractéristiques mécaniques différentes de celles des membranes sèches.

Une alternative intéressante à l'utilisation des films de diamant est l'emploi de matériaux composites. Ceux-ci sont en général formés soit avec des fibres de verre, soit des fibres de carbone. Ces fibres noyées dans une matrice sont extrêmement anisotropes, c'est-à-dire n'ont pas la même réaction mécanique dans le sens de la fibre et perpendiculairement à la fibre. Les propriétés mécaniques des membranes de haut-parleur fabriquées ainsi peuvent donc en théorie être excellentes. Malheureusement, il existe une quasi-infinité de matériaux composites et les possibilités de chacun sont différentes.

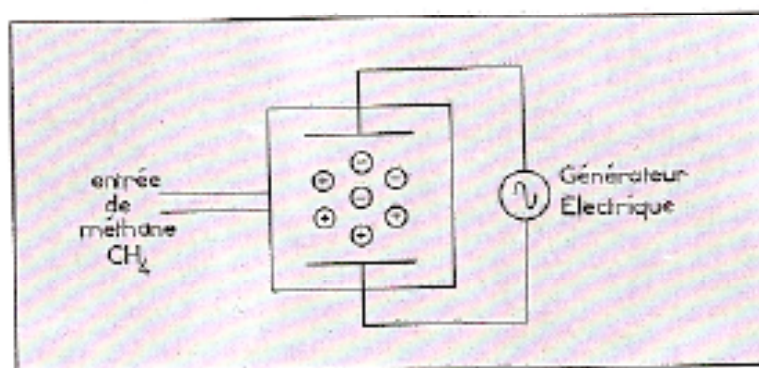


Fig. 1 : La méthode du dépôt plasma pour la réalisation de diamants synthétiques. L'ionisation d'un gaz tel que le méthane s'accompagne sous certaines conditions du dépôt de diamant sur l'une des électrodes.

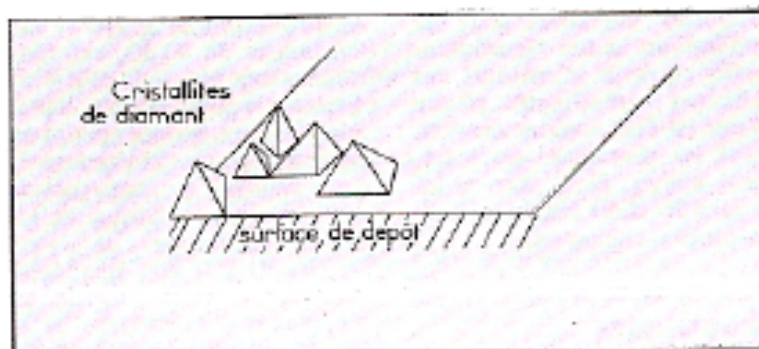


Fig. 2 : Les films de diamant synthétique sont extrêmement minces, de l'ordre du micron, et constitués de petites pyramides jointives de diamant.

On doit être très prudent, mais c'est une solution prometteuse.

## 2. Les composants passifs

Nous avons vu qu'une chaîne Hi-Fi était composée d'éléments passifs et actifs. Nous allons tout d'abord passer en revue les premiers que sont principalement les résistances, condensateurs, bobines, transformateurs et fils de connexion.

### 2.1. Les résistances

Il en existe de différents types : bobinées, en couches minces métalliques ou carbone. Le passage du courant électrique dans ces composants a différentes conséquences.

Dans les résistances bobinées, l'effet secondaire produit est selfique, la résistance a un comportement de bobine et sa valeur varie avec la fréquence. Particulièrement pour les résistances de puissance, où le courant qui circule est important, il se produit un échauffement et par conséquent, comme nous l'avons vu, une évolution plus rapide de la structure du fil qui la constitue.

Avec le temps, et surtout à haute température, la taille des grains va varier, l'oxygène de l'air ou la vapeur d'eau ambiante vont réagir avec le métal pour former en surface et aux joints de grain un oxyde isolant. Cette couche d'oxyde a un double effet : d'une part une augmentation de la valeur réelle de la résistance car l'oxyde est moins conducteur que le métal et d'autre part un effet capacitif puisqu'une couche isolante très mince comprise entre deux cristaux métalliques forment un condensateur. La résistance va donc avoir en plus de l'effet selfique secondaire connu initialement mais constant, un effet capacitif qui évoluera au cours de l'utilisation. Ces effets ne sont pas du tout négligeables puisque, dans certains cas on aboutit à la destruc-

tion complète du composant.

Une autre cause d'accélération de ce processus est la ségrégation de surface. Les résistances sont composées d'alliages métalliques dont la composition précise est importante, or, sous l'effet de la température et de l'oxydation que nous venons de voir, un des éléments de l'alliage peut diffuser plus rapidement qu'un autre à l'interface entre les joints de grain. La constitution du fil n'est donc plus uniforme et la résistance change de valeur et ce, indépendamment du phénomène lié à l'oxydation. La figure 3 montre cet effet de ségrégation et d'oxydation pour les fils constituant les résistances.

La situation est la même ou presque avec les résistances en couches minces. Dans ce cas,

l'effet selfique est quasi-inexistant puisqu'il n'y pas de bobinage. Par contre, l'effet d'oxydation et de ségrégation est accentué car le film de couche mince est obtenu par des techniques de dépôt qui créent de nombreux défauts dans la couche. Probablement les couches au carbone sont-elles moins sensibles aux effets de l'oxydation que les couches métalliques, mais elles sont quand même sujettes aux problèmes de modification de la taille des grains. Les couches de carbone ont une structure graphitique qui, comme nous l'avons vu, est anisotrope aussi bien mécaniquement qu'électriquement. La résistance au passage du courant n'est pas la même dans le sens des feuillets et dans celui perpen-

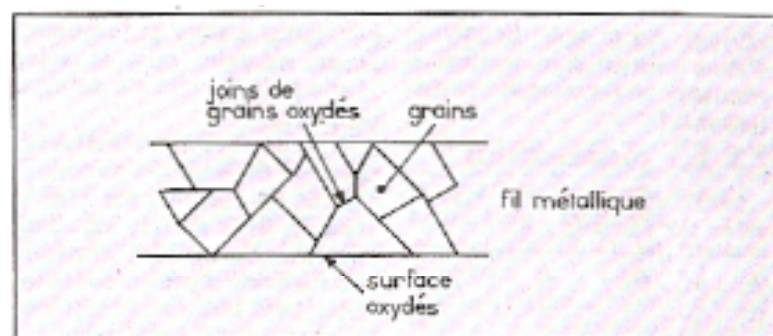


Fig. 3 : L'effet d'oxydation et de ségrégation en surface et aux joints de grain altèrent les caractéristiques du fil constituant les résistances bobinées. A noter que dans le cas des résistances à couche, des phénomènes semblables se produisent.

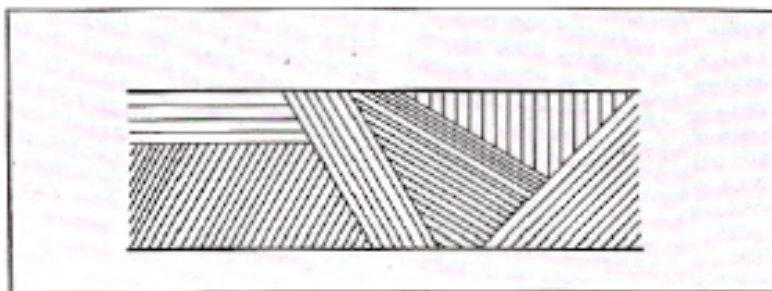


Fig. 4 : Cas d'une résistance à couche carbone. Au cours du temps, le nombre et donc la taille des cristallites de graphite varient, s'accompagnant d'une variation de la résistance de contact entre cristallites. La résistance au passage du courant n'est pas la même dans le sens des feuillets de graphite ou perpendiculairement.

diculaire au feuillet. Dans un cristallite de graphite, le courant va donc s'écouler dans le sens des feuillets. A la jonction avec un autre cristallite forcément orienté différemment par rapport au précédent, se produit une rupture des plans cristallographiques et le courant passe moins facilement. La résistance de contact entre cristallites joue donc un rôle important. Si, au cours du temps, le nombre et donc la taille des cristallites varient, la résistance totale du film changera. La figure 4 montre comment la variation de taille des cristallites de graphite va changer la résistance du film.

Nous venons de voir que bien que ce soient des éléments passifs, les résistances évoluent avec l'usage. Entre une résistance neuve aux caractéristiques nominales et une résistance hors d'usage, toute une déclinaison d'états existent dans lesquels la résistance ne fonctionne que partiellement.

## 2.2. Les condensateurs

Ils sont constitués de deux plaques conductrices métalliques séparées par un diélectrique isolant. La valeur d'un condensateur est proportionnelle à la surface des conducteurs et inversement proportionnelle à l'épaisseur de la couche isolante. On a donc développé des condensateurs très performants avec des couches diélectriques très minces, de l'ordre du micron, c'est-à-dire du millième de millimètre ! Par exemple, c'est fait en oxydant la surface d'une feuille de tantale puis en l'enroulant sur elle-même. L'oxyde de tantale est un bon isolant, on réalise ainsi d'excellents condensateurs.

En fait, tout condensateur a des limites de fonctionnement essentiellement dues à la tenue de la couche isolante. Plus l'épaisseur du diélectrique isolant est faible, plus le champ électrique appliqué entre les deux armatures du condensateur est

grand. La couche isolante n'étant pas parfaite, plusieurs effets se conjuguent pour détériorer ses qualités isolantes.

En premier lieu, des impuretés localisées à l'intérieur du film d'oxyde peuvent se déplacer sous l'effet du champ électrique et ainsi transporter du courant, alors qu'un condensateur est supposé ne pas en laisser passer. Ce courant de fuite change les caractéristiques nominales du condensateur qui dépendront de l'amplitude et de la fréquence du signal.

Si le courant transporté est important, le passage des ions par effet de champ pourra former un court-circuit réel, soit permanent, endommageant complètement le condensateur, soit sporadique, le court-circuit n'étant présent qu'au-dessus d'une certaine tension. Le condensateur a alors un fonctionnement aléatoire dont la valeur varie avec l'amplitude du signal appliqué.

Une autre cause de destruction partielle ou définitive du condensateur est produite par effet de champ. Si la surface métallique constituant une des armatures est rugueuse et présente des aspérités, pour une tension appliquée le champ local est d'autant plus intense que la courbure de la surface est importante, c'est l'effet de pointe expliqué avec plus de détails dans L'Audiophile n° 4. Cet effet est utilisé couramment pour les paratonnerres. Le champ électrique près d'une aspérité d'une des plaques du condensateur étant plus important que le champ moyen, la couche d'oxyde isolante n'est pas suffisante et une rupture locale du diélectrique se produit. Celle-ci est soit permanente soit erratique comme décrit précédemment.

Une troisième cause de disfonctionnement du condensateur est la structure de la couche d'oxyde isolante elle-même. Celle-ci doit en effet être uni-

forme car autrement des champs électriques importants apparaissent aux zones plus minces créant des conditions favorables au développement de problèmes identiques à ceux décrits précédemment. Egalement la composition de la couche doit être uniforme pour que de la même manière le champ électrique soit constant et ne crée pas de zones à champ anormalement élevé.

La figure 5 montre les trois types de détérioration du diélectrique décrits ci-dessus. Dans tous ces cas, entre un condensateur en parfait état et un autre détérioré, existent toutes les autres possibilités avec un fonctionnement défectueux.

## 2.3. Les transformateurs

Un transformateur est un élément constitué d'un bobinage primaire qui induit un champ magnétique variable guidé par un circuit magnétique. Ce champ magnétique créant dans un bobinage secondaire une tension alternative induite. Les matériaux interviennent ici à trois niveaux : le fil des bobinages, le circuit magnétique et l'isolation entre bobinages primaire et secondaire.

En ce qui concerne le fil du bobinage, les problèmes sont identiques à ceux décrits pour les résistances bobinées, nous ne reviendrons donc pas sur ce point.

Le circuit magnétique est en général constitué de plaques de fer doux imbriquées les unes dans les autres pour éliminer les courants dits de Foucault induits par le champ magnétique. Le circuit magnétique sert à faire circuler le champ magnétique mais pas les courants induits. C'est pour cela que l'on utilise des plaques de fer isolées électriquement mais pas magnétiquement, les unes des autres. Or, nous avons vu que plus le matériau avait de défauts plus il avait de la difficulté à laisser passer le courant. Un cas limite est celui où il

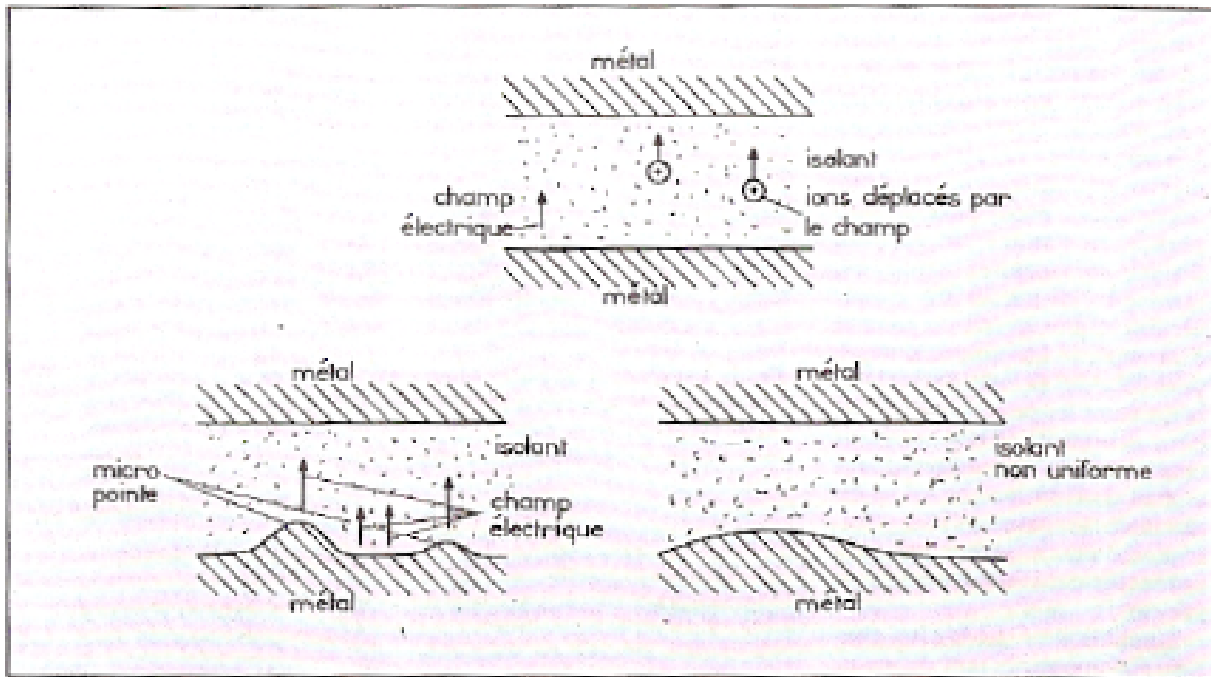


Fig. 5 : Les trois types de détérioration d'un diélectrique de condensateur : effet de court-circuit dû au passage d'ions, aspérités sur les armatures engendrant un effet de pointe, manque d'uniformité de la couche isolante.

n'y aurait que des défauts, c'est-à-dire sans structure cristalline. On connaît tout cela dans les verres qui sont fabriqués par refroidissement rapide de la silice. Si on refroidit lentement la silice, les atomes d'oxygène et de silicium ont le temps de se réorganiser et de prendre une structure cristalline. Par contre, si le refroidissement est rapide, on obtient une structure désordonnée, amorphe : un verre. Aussi surprenant que cela puisse paraître, dans le cas des métaux, on produit toujours une structure cristalline. Ce n'est que très récemment que l'on a pu fabriquer des verres métalliques en faisant une hyper-trempe, avec un refroidissement de plusieurs millions de degrés par seconde. La figure 6 montre une vue schématique d'un verre à deux dimensions. Ces verres métalliques conduisent mal l'électricité et sont donc utilisés pour la fabrication de circuits magnétiques de transformateurs.

Le dernier point où interviennent les matériaux dans les transformateurs est celui de l'isolation dans le même bobinage et entre bobinages. Les fils sont isolés par un vernis, mais des microcoupures peuvent engendrer des claquages et des fuites électriques.

#### 2.4. La connectique

Elle intervient à deux niveaux,

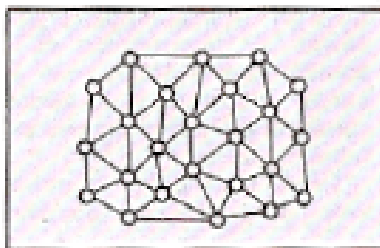


Fig. 6 : Vue schématique d'un verre métallique, l'absence de structure cristalline ordonnée s'accompagne d'une très mauvaise conduction de l'électricité tout en ayant d'excellentes qualités magnétiques. Ce nouveau type de matériau est donc particulièrement intéressant pour la réalisation de circuits magnétiques de transformateurs.

d'une part interne, c'est-à-dire les liaisons à l'intérieur de chaque élément de la chaîne, et d'autre part externe avec les liaisons entre éléments.

A première vue, il semblerait que le meilleur choix soit celui du câble de connexion de gros diamètre et bon conducteur afin de diminuer au maximum la résistance du fil. Il n'en est rien pour plusieurs raisons. Tout d'abord le courant continu et le courant alternatif ne se comportent pas de la même manière. Plus la fréquence du courant est élevée, plus le courant a tendance à circuler à la surface et non pas dans le volume du conducteur. C'est pour cela que l'on utilise de préférence des câbles multi-brins qui, pour une section globale donnée, présentent un maximum de surface par rapport au volume. La réponse en fréquence d'un câble dépend de sa structure.

On peut descendre un degré en dessous et voir l'influence de la

structure cristalline elle-même puisque nous avons vu qu'en réalité chaque cristallite jouait le rôle d'un micro-conducteur, relativement isolé des autres. L'orientation, la taille de ces micro-cristallites sont donc importants. Plus ceux-ci sont grands et moins ils auront d'effets secondaires capacitifs, mais plus ils seront de grande section et plus l'effet de peau se fera sentir. La solution étant peut-être le fil multibrins, les brins étant les plus fins possible, pour diminuer l'effet de peau, et constitués de cristallites longs alignés dans le sens du fil, pour diminuer le parcours des électrons et éviter les effets capacitifs et résistifs parasites des joints de grains.

Le choix du matériau est également important, tant du point de vue de la résistivité que de celui de la réactivité du métal : la facilité à former des oxydes est un handicap sérieux car l'oxyde qui se localise en surface et aux joints de grain augmente les effets capacitifs.

La figure 7 montre une vue schématique d'un conducteur idéal fabriqué en or, car c'est un très bon conducteur de courant, et inerte aux gaz ambiants tels que l'oxygène.

## 2.5. Les contacts

C'est une des sources de problèmes les plus grands en électricité et en électronique. Nous avons vu en détail les difficultés à réaliser des bons conducteurs, que ce soit pour en faire des résistances, des transformateurs ou des câbles de connexion. Le contact est la calamité trop souvent ignorée en électronique analogique et pourtant si connue en digital. De temps en temps, il fallait réappuyer sur les circuits et mémoires des Apple II pour qu'ils fonctionnent normalement. Heureusement, mais en réalité malheureusement il n'en est pas de même avec l'analogique car la panne n'est pas fran-

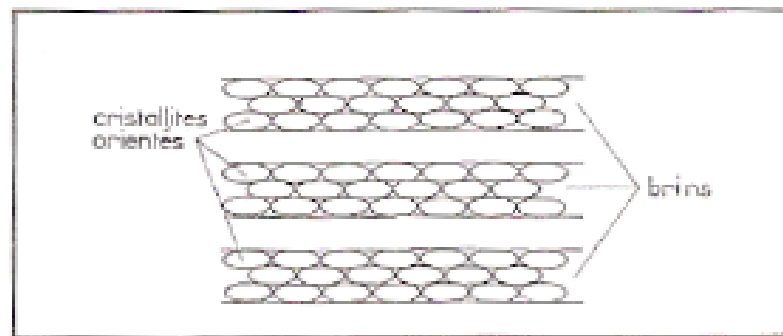


Fig. 7 : Vue schématique d'un conducteur idéal... en or ! Structure multibrins pour diminuer l'effet de peau avec de longs cristallites orientés pour limiter l'effet capacitif, en or pour s'affranchir des problèmes d'oxydation.

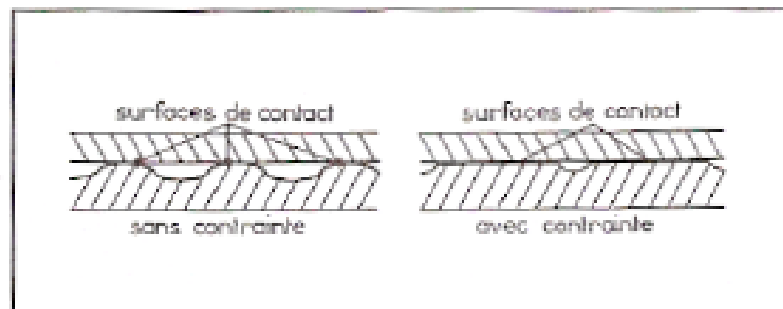


Fig. 8 : La qualité d'un contact du point de vue mécanique implique une surface de contact la plus grande possible. Il est donc essentiel que l'une des surfaces soit déformable afin d'augmenter la surface de contact sous l'effet d'une contrainte.

che, il y a simplement dégradation de la qualité.

Les contacts sont présents partout ; le composant sur support : transistor, circuit intégré, tube à vide, les connecteurs internes reliant différentes cartes de circuit imprimé entre elles. Les prises et fiches reliant extérieurement les différents éléments de la chaîne, les interrupteurs et les commutateurs. Dans tous les cas, le problème est le même : comment faire une bonne continuité électrique.

Deux contraintes apparaissent, d'un côté un problème mécanique et de l'autre un problème de constitution du matériau.

Du point de vue mécanique, on veut une surface de contact la plus grande possible entre les deux parties. Il faut donc qu'au moins une des pièces soit élastique pour épouser la forme de l'autre. Mais ce n'est pas suffi-

sant car les surfaces en contact ne sont pas exactement identiques, chacune présente des micro-aspérités qui font que la liaison ne se produit pas sur toute la surface espérée mais seulement sur une petite partie, en limitant ainsi la véritable surface de contact. Il faut donc qu'au moins une des deux pièces soit aussi déformable, soit à cause de la nature du matériau, soit parce que les pièces sont soumises à une forte pression, par exemple avec une vis de serrage. La figure 8 montre comment les matériaux se déforment sous l'effet de la contrainte.

Du point de vue de la réactivité, il s'agit d'éliminer au maximum les effets d'oxydation de surface qui forment une couche isolante, à la fois résistive, capacitive et de redressement. L'effet résistif provient de la forte résistivité des oxydes métalliques, l'effet capacitif du condensateur

formé par les deux conducteurs séparés par une couche isolante et le phénomène de redressement est semblable au détecteur à galène de la T.S.F.

Afin de minimiser ces problèmes, il est préférable d'utiliser des matériaux inertes. On choisit donc de préférence des contacts dorés inaltérables. Cependant les frottements répétés créés à chaque branchement-débranchement finissent par arracher la couche d'or de surface, enlevant ainsi la couche de protection.

### 3. Les composants actifs

Ce sont les diodes, transistors, circuits intégrés et tubes à vide.

#### 3.1. Les semi-conducteurs

Les semi-conducteurs sont spécialement sensibles à de nombreuses agressions qui vont des rayons cosmiques qui créent les paires d'électrons-trous non souhaités aux effets de la température qui favorise la diffusion des impuretés savamment dosées pour obtenir les caractéristiques souhaitées. Nous ne pouvons pas, dans le cadre de cet article, passer en revue tous les problèmes de matériaux des semi-conducteurs car ils sont beaucoup trop nombreux. Ces types de composants étant très complexes et fabriqués dans des conditions très éloignées de l'équilibre thermodynamique. En particulier, l'effet de la température est important. Un composant qui chauffe s'use plus vite.

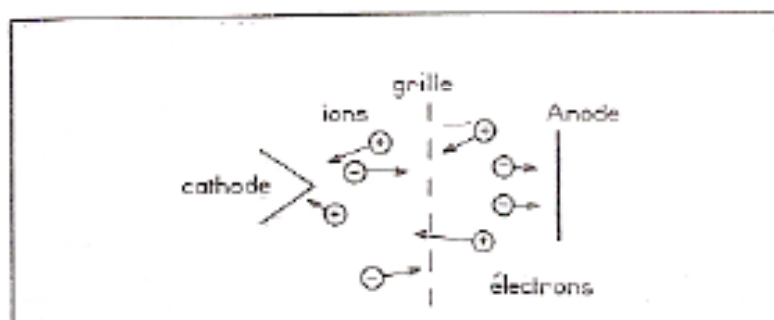


Fig. 9 : Le mécanisme de pulvérisation cathodique dans les tubes à vide s'accompagne d'un dépôt métallique conducteur sur la surface du tube et détériore l'isolement.

#### 3.2. Les tubes à vide

De leur côté, les tubes à vide ne sont pas exempts de problèmes de matériaux. Le vide n'est pas absolu et les électrons qui se déplacent de la cathode à l'anode ionisent au passage des molécules de gaz qui se chargent positivement. Sous l'effet du champ électrique, les ions suivent un trajet inverse de celui des électrons et viennent bombarder la cathode. Ce bombardement ionique arrache des atomes à la surface de la cathode, qui se déposent dans l'ensemble du tube, en particulier sur les isolants. Le film métallique créé finit par éventuellement court-circuiter l'isolant et empêche le fonctionnement correct du tube. La figure 9 décrit ce mécanisme de pulvérisation cathodique.

### 4. Conclusion

Au cours de cette série de deux articles, nous avons examiné d'une manière qualitative la

structure des matériaux en général et en audio en particulier. Ceci n'est évidemment pas exhaustif mais constitue une tentative d'expliquer certains phénomènes connus et aussi de proposer des idées directrices d'explications d'autres phénomènes. Il n'y a pas ici de vérité absolue ni d'estimations d'ordre de grandeur. Peut-être que certains des phénomènes abordés sont totalement négligeables, mais peut-être pas, les explications sont très difficiles à trouver en audio !

Je voudrais simplement signaler que j'ai pris un grand plaisir à essayer d'entrer dans un domaine dont je ne suis pas spécialiste, l'audio, avec l'œil d'un spécialiste d'une autre branche, les matériaux. Cet exercice périlleux est cependant très enrichissant pour moi. Si j'ai pu vous apporter un éclaircissement sur un seul point, ma mission aura été remplie, sinon dommage... mais ça valait la peine d'essayer. Merci.

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