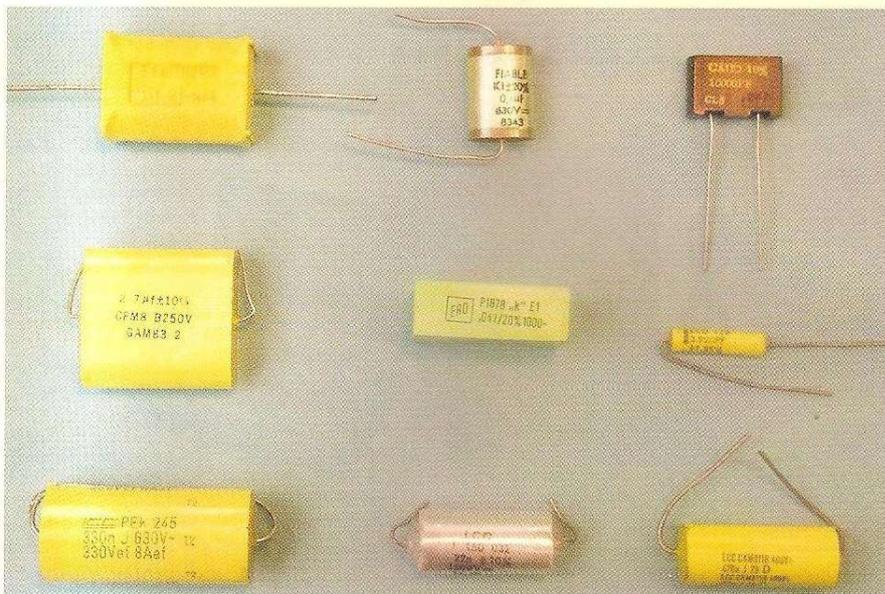


## LES CONDENSATEURS EN AUDIO



Voilà plusieurs mois que je veux vous parler des condensateurs, ce sera ici chose faite... Mon esprit cartésien est longtemps resté emprunt de scepticisme sur le sujet. En effet, j'ai longtemps cru qu'un condensateur n'était qu'un condensateur, ni plus ni moins. Les dires des gourous et la lecture de catalogues où étaient référencés des modèles à quelque deux cents euros la centaine de nanofarads ne faisait que renforcer ma méfiance et me laissait penser que les seules différences existantes ne pouvaient être que des écarts de prix...

**C**'est à un ami de formation littéraire que je dois mon intérêt pour les condensateurs et la reproduction sonore en général. Il y a plus de dix ans, c'est sur ses conseils que j'ai changé les condensateurs au polyester de mon premier amplificateur à tubes contre des papiers huilés qu'il m'avait donnés pour l'occasion : « Vous allez voir M. Gest... » Et j'ai vu, ou plutôt entendu. L'amplificateur était un mono-triode de

6336 avec transformateur Millerieux, construit sur plan. J'avais fabriqué cet appareil pour m'amuser, considérant alors que l'audio était à l'électronicien ce que l'œuf au plat est à la gastronomie. Trop simple pour s'y intéresser... Et pourtant, ce changement de « capa » m'a convaincu que l'audio n'était pas un parent pauvre et qu'elle méritait tous mes égards ! L'ampli qui fonctionnait bien, tout juste, avec des aiguës légèrement agressifs et des basses trop pré-

# UNE LIAISON IMPORTANTE

sentes s'était équilibré, transformé...  
Moi qui ne croyais pas à tout cela, j'étais convaincu.  
Et pourtant, aucune différence n'était mesurable au distorsiomètre...  
Depuis, l'esprit cartésien a repris le dessus et j'ai analysé avec le plus d'objectivité possible les phénomènes qui pouvaient être à l'origine des différences obtenues. C'est le fruit de ces constatations qui vous est livré aujourd'hui.

## NOTIONS FONDAMENTALES

Mais avant toute chose, laissez moi vous rappeler quelques notions fondamentales sur ce qu'est un condensateur et sur les grandeurs qui y sont liées.  
En fait, un condensateur est un élément très simple dans sa construction : c'est un système à deux armatures en matériau conducteur séparées sur toute leur surface par un isolant de faible épaisseur, le diélectrique (**figure 1**).  
Outre les dimensions des armatures et la distance les séparant, c'est le diélectrique qui est le facteur déterminant des caractéristiques du condensateur.

### RAPPEL DE FORMULE

Capacité d'un condensateur à armatures planes :

$$C = \epsilon \cdot \frac{S}{e}$$

où :  $\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$

$\epsilon_0$  : permittivité du vide =  $8,85 \cdot 10^{-12}$

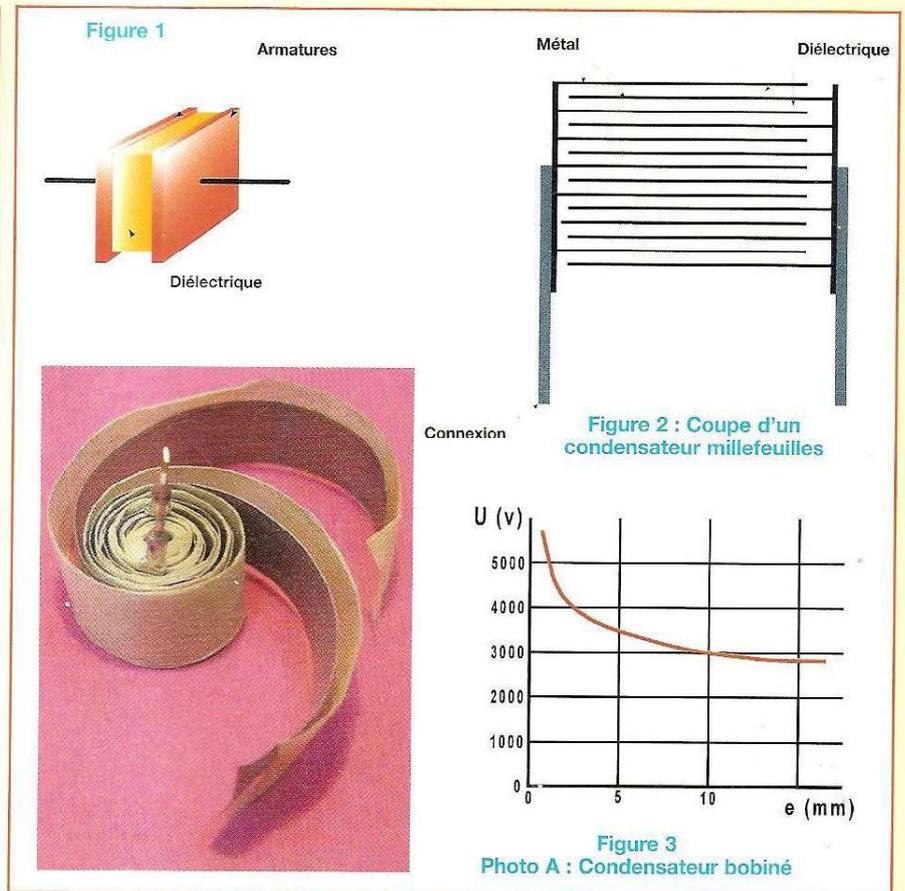
$\epsilon_r$  : permittivité relative (fonction du diélectrique choisi)

S : surface des armatures en  $m^2$

e : épaisseur du diélectrique en m

C : capacité en farad

On tire de cette formule que « C » croît avec « S » et décroît en fonction de « e ». De ce fait, du point de vue capacité, on aura toujours intérêt à augmenter « S » en enroulant les armatures ou en adoptant une structure « millefeuilles » (voir **figure 2** et **photo A**) et à diminuer « e », toutefois en prenant garde à maintenir une tenue en tension suffisante.



En effet, plus l'épaisseur du diélectrique est faible, moins la couche isolante supporte les hautes tensions.

La tension pour laquelle le diélectrique claque est appelée « tension disruptive ». Il se produit alors de véritables petits arcs électriques qui vaporisent localement la couche métallique et l'isolant... Et je vous assure que cela s'entend !

Toutes proportions gardées, les faibles épaisseurs supportent mieux la tension que les épaisseurs plus fortes.

En d'autres termes, la tension disruptive n'est pas inversement proportionnelle à l'épaisseur du diélectrique, mais suit une loi ayant l'allure de la courbe représentée en **figure 3**.

Détail important : certains condensateurs sont dits « auto cicatrisants », c'est-à-dire qu'en cas de claquage de l'isolant, une couche de cicatrisation composée d'oxyde métallique produit par l'étincelle

se dépose à l'endroit même où celle-ci a jailli. L'oxyde métallique issu de la vaporisation de la couche conductrice étant un bon isolant (oxyde de zinc, d'aluminium...), il n'apparaît pas de point conducteur entre les armatures et le condensateur peut continuer à vivre au sein de nos chers amplificateurs...

Ces propriétés d'auto cicatrisation sont le fait d'un grand nombre de condensateurs à film plastique métallisé.

Il faut en effet que l'épaisseur de la couche de métal soit très faible pour permettre la vaporisation, ce que n'autorisent pas les armatures métalliques.

**Attention** : si ces condensateurs sont pratiquement inclaquables, il est nécessaire de garder une bonne marge de sécurité pour éviter tout problème... Imaginez l'effet d'un claquage qui porterait une grille ou une « gate » à un potentiel élevé, même de façon très brève.

# ET SI ON PARLAIT « CONDENSATEURS »

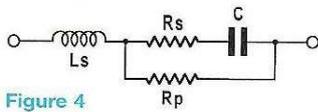


Figure 4

Photo B

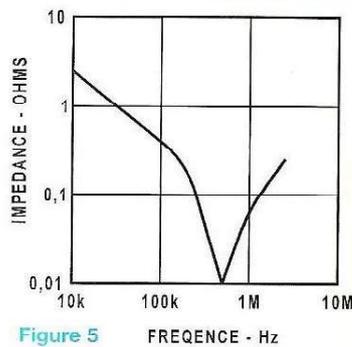


Figure 5

## LOIS D'ASSOCIATION

En parallèle :

$$C = C_1 + C_2$$

En série :

$$C = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$$

## SCHÉMA ÉQUIVALENT

Du fait de leur constitution même, les condensateurs ne sont jamais parfaits...

En effet, l'isolant n'est jamais parfaitement isolant, les armatures ne sont jamais totalement conductrices... et le condensateur jamais vraiment capacitif ! Si l'on considère un condensateur bobiné, on comprend bien vite que celui-ci va posséder une composante inductive non négligeable, conséquence même du bobinage...

Pour être bref, les condensateurs parfaits n'existent pas. Il faut en fait considérer un condensateur réel comme une association de composants parfaits correspondants à la **figure 4**.

«  $L_s$  » est l'inductance parasite due à la construction du condensateur.

«  $R_p$  » représente les défauts d'isolement entre les armatures.

«  $R_s$  » est la résistance série trouvant son origine dans la résistance non nulle des armatures et des connexions.

Et «  $C$  » est le condensateur parfait de valeur égale à celle du condensateur réel considéré...

En tenant compte de ce schéma équivalent, on comprend que la loi bien connue liant la tension aux bornes du condensateur et le courant le traversant, soit :

$$I = C \cdot \frac{du}{dt}$$

est fautive, ou du moins ne s'applique que pour un condensateur parfait.

La formule donnant l'impédance d'un condensateur qui en découle directement, soit :

$$Z = \frac{1}{C\omega}$$

appelle la même remarque.

Si cette formule était applicable en réalité, un condensateur se comporterait en véritable court-circuit en HF ( $Z \rightarrow 0$  quand  $f \rightarrow \infty$ ).

Or, il n'en est rien...

Eh oui ! La formule s'appliquant aux éléments réels est issue directement du schéma équivalent, soit :

$$Z = \sqrt{R_s^2 + \left( L_s \cdot \omega - \frac{1}{C \cdot \omega} \right)^2}$$

(en négligeant  $R_p$ ).

Que constate-t-on ?

Qu'à une certaine pulsation

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_s \cdot C}}$$

qui correspond à la fréquence

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_s \cdot C}}$$

(comme tout le monde le sait :  $\omega = 2\pi \cdot f$ ) le deuxième terme sous la racine

$$\left( L_s \cdot \omega - \frac{1}{C \cdot \omega} \right)^2$$

devient égal à 0... et que  $Z = R_s$  !

Votre condensateur n'est plus un condensateur, mais seulement une résistance de très faible valeur !

Si vous croyez qu'une capacité est un élément purement réactif, vous vous trompez. Cela dépend, en fait, de la fréquence.

Il peut être purement résistif, voire inductif. C'est ce que nous allons voir maintenant.

Cette fréquence pour laquelle la capacité se comporte comme une résistance est appelée « fréquence de résonance ».

Si vous essayez d'utiliser votre condensateur au-delà de celle-ci, vous aurez une sacrée surprise : au lieu de voir son impédance baisser quand la fréquence s'accroît, vous la verrez au contraire augmenter, comme une inductance. Normal, à partir de  $f_0$ , c'est une inductance !

Le graphique en **figure 5** montre bien le phénomène : l'impédance du condensateur baisse dans un premier temps quand la fréquence augmente. Puis, après un point d'inflexion ( $f_0$ ), la courbe remonte et  $Z$  croît avec  $f$ . Ce n'est ni plus ni moins que la courbe d'un circuit résonnant série RLC réel.

Pour la petite histoire, certains fabricants de condensateurs inscrivaient en toutes lettres la valeur de la fréquence de résonance sur le corps de leurs éléments (**photo B**).

Voilà encore une excellente pratique que le temps a effacé. Dommage, cette indication est pourtant de la plus grande importance.

## ANGLE DE PERTE

L'angle de perte est une image des pertes introduites par la résistance série du modèle équivalent. Pourquoi un angle alors ?

Il est d'usage de qualifier « d'angle de perte » l'angle complémentaire de celui formé par les vecteurs représentant  $V$  et  $I$  sur le diagramme de Fresnel... Cela

# UNE LIAISON IMPORTANTE

vous rappelle de bons souvenirs, n'est-ce pas ? Si l'on calcule la tangente de cet angle, on trouve qu'elle n'est autre que l'inverse du coefficient de qualité Q du condensateur, soit :

$$\text{tang } \delta = R_s \cdot C \cdot \omega = \frac{1}{Q}$$

Je pense qu'il est plus facile pour le néophyte de se souvenir que l'angle de perte est l'inverse du coefficient de qualité, autrement dit que plus ce facteur est petit, plus grand est Q et donc meilleur sera le condensateur.

Toujours dans les rappels mathématiques, souvenez-vous que pour un angle très petit, on peut se permettre de confondre «  $\delta$  » avec sa tangente.

Pour vous en convaincre, il vous suffit de taper sur votre calculatrice « tang 0.1 » en ayant pris garde de vous mettre en mode Radian et non en degrés... Comme en pratique, la valeur de l'angle de perte est toujours très petite pour les condensateurs, l'approximation sera faite usuellement. Notez que tang  $\delta$  dépend de la fréquence à laquelle la mesure est faite, ce qui ne facilite pas toujours les comparaisons, les constructeurs ne choisissant pas tous les mêmes fréquences pour faire leurs mesures. D'ailleurs, avouons qu'il serait parfaitement idiot de vouloir choisir une unique fréquence pour des condensateurs de valeurs très différentes (ex : 100 kHz pour un pF...), ce qui reviendrait à faire des mesures inutiles puisque sans rapport avec la réalité.

En fait, tang  $\delta$  est une image de la qualité du diélectrique à une fréquence donnée. Il ne faut en effet jamais oublier que les pertes dans l'isolant sont proportionnelles à la fréquence du fait des frottements plus importants entre les molécules qui le composent (molécules et non atomes, les isolants usuels n'étant pas des constructions cristallines...).

Dans les facteurs d'augmentations des pertes diélectriques, on peut encore citer l'humidité, la présence d'impuretés et surtout l'augmentation du champ élec-

trique appliqué (pertes proportionnelles au carré du champ) qui provoque un arrachement des électrons périphériques des atomes constituant les molécules et donc une certaine conductibilité. Les phénomènes à l'origine des pertes diélectriques se traduisent par un échauffement de celui-ci, contribuant encore à la dégradation des caractéristiques.

Tout cela vous montre bien, une fois encore, que le schéma équivalent du condensateur n'est qu'un modèle simplifié qui permet de prévoir le comportement d'un condensateur réel et de calculer ses caractéristiques d'impédance à une fréquence donnée.

La réalité est tout autre puisque le terme «  $R_s$  » qui apparaît dans le modèle n'est pas constant et dépend d'un certain nombre de facteurs.

## L'ABSORPTION DIÉLECTRIQUE (AD)

Voilà un nom bien charmant : le diélectrique serait donc comme une éponge ? Ne riez pas, je croyais à mes débuts que ce paramètre avait rapport aux essais climatiques et d'humidité ! Eh oui !

Les isolants se comportent effectivement comme des éponges, mais vis-à-vis des charges électriques. Cela revient à dire que lorsque vous tentez de décharger un condensateur, vous ne pouvez jamais en extraire toutes les charges accumulées : un certain nombre de ces charges restent bloquées dans le diélectrique et ne sont restituées qu'avec retard.

Tentez l'expérience suivante : chargez un vieux condensateur de 1000  $\mu\text{F}$  sous 9 V et court-circuitez-le violemment...

Branchez votre voltmètre : vous constatez que vous ne trouvez pas 0V à ses bornes mais quelques dixièmes de volts et que cette tension monte ! Si vous le court-circuitez de nouveau, le phénomène se reproduit, ce qui peut vous amener à penser que ce satané condensateur est indéchargeable.

Cette valeur de 1000  $\mu\text{F}$  est choisie volontairement élevée afin de rendre le

phénomène observable de façon claire, mais celui-ci existe même pour les éléments de quelques picofarads, ce quelle que soit la technologie employée. Pour être parfaitement honnête, ce phénomène d'absorption diélectrique n'est pas totalement expliqué et ses effets sur la qualité sonore des condensateurs ne sont pas toujours aussi évidents qu'il y paraît... On a vu des condensateurs chimiques se comporter de façon remarquable en liaison sur des montages américains, alors que leur absorption diélectrique (AD) est considérable et souvent rédhibitoire. Toutefois, il faut retenir qu'en règle générale, plus faible est l'AD, meilleur sera le condensateur dans une utilisation audio. L'explication est triviale : plus un élément est capable de restituer des charges lorsqu'on le lui demande, plus fidèle sera la restitution sonore, surtout sur les transitoires.

Quels que soient les phénomènes d'hystérésis, il est important de constater qu'ils seront toujours néfastes, engendrant des retards dans les circuits. Pour information, un matériau comme le mica est pratiquement dépourvu de ces phénomènes d'hystérésis en tension, ce qui le rend non seulement excellent en HF, mais aussi en audio où il fait merveille dans le traitement des signaux complexes, riches en transitoires. Même pour les condensateurs de découplage, l'AD pose problème en rendant illusoire une véritable stabilité des circuits en signaux rapides et fronts raides.

Le meilleur matériau, du point de vue AD, est sans aucun doute le polystyrène. Oublions le Téflon, excellent lui aussi, mais extrêmement difficile à approvisionner pour l'amateur... et même le professionnel !

N'utilisons plus que du polystyrène, allez-vous me dire... Le problème est malheureusement plus subtil, car un autre phénomène va produire des effets à peu près semblables à l'AD, bien que trouvant ses origines non plus dans le diélectrique mais dans les armatures. Cela concerne essentiellement les

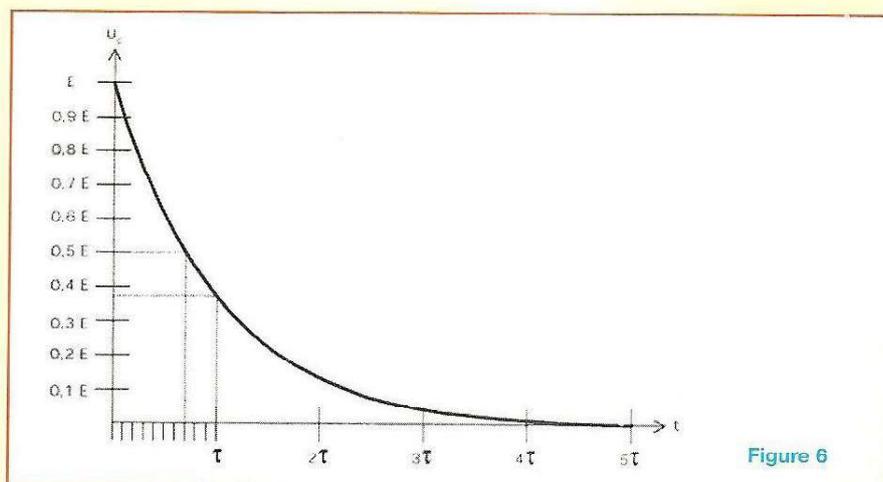


Figure 6

condensateurs à film métallique.

Dans ces éléments, les armatures ne sont pas constituées de feuilles de métal, mais d'une vaporisation métallique sur l'isolant lui-même. Dans un sens, cela est profitable puisque permettant d'accéder à de fortes valeurs pour un encombrement réduit. Mais tout se paye, en audio comme ailleurs...

Cette façon de faire présente un grave inconvénient : les armatures étant très fines (quelques  $\mu\text{m}$ ), leur résistance n'est plus négligeable comme celle des véritables armatures métalliques. On retrouve donc l'élément résistif série  $R_s$  du schéma équivalent du condensateur, élément qui va rendre impossible la décharge rapide (décharge selon une loi RC, figure 6).

Les conséquences vont être à peu près identiques à celles de l'AD, à savoir : difficulté à reproduire fidèlement les transitoires et une baisse de la capacité en HF. Si ce dernier phénomène passait quasiment inaperçu pour les condensateurs de filtrage, il n'en sera pas de même pour la résistance des armatures qui limitera le courant de décharge, le rendant inopérant lors des fortes sollicitations et donc des courants de crête. Moralité : doublez toujours vos condensateurs de filtrage par des modèles de plus faible valeur mais de haute qualité, possédant la résistance série la plus faible possible.

Si vous tentez l'expérience sur un ampli-

ificateur du commerce, vous constaterez sûrement une grande amélioration pour un coût très modique. Les modèles bobinés à armatures au polypropylène se prêtent très bien à cet usage et possèdent l'avantage d'être disponibles dans des valeurs relativement élevées, jusqu'à  $100 \mu\text{F}$ . Notez tout de même que la résistance des armatures peut varier d'un facteur 10 entre deux condensateurs au polypropylène, modèle à feuille et modèle à armatures...

Inutile de vous dire qu'en conditions réelles d'utilisations, les différences sont perceptibles. C'est pourquoi, même si le polystyrène est un excellent diélectrique, il ne faut pas en attendre des miracles... Je vous conseillerai souvent un polypropylène, même si ses caractéristiques sont un peu moins bonnes, mais du polypropylène emprisonné entre deux robustes armatures !

## PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES CONDENSATEURS

Bien qu'étant d'une importance capitale pour la qualité de la restitution sonore, les caractéristiques mécaniques des condensateurs sont souvent passées sous silence. Soyons clairs : le meilleur diélectrique possible pris en sandwich entre deux armatures métalliques trop fines et peu rigides ne constituera jamais un bon condensateur. En revanche, un

diélectrique sans prétention comme le mylar utilisé dans un assemblage mécanique sérieux, pourra se révéler très efficace en audio. Cela s'explique assez facilement : des armatures chargées de façon différente auront toujours tendance à s'attirer l'une l'autre. C'est là l'une des conséquences des lois de l'électrostatique. Au contraire, deux plaques portant des charges de même signe se repousseront énergiquement, toujours selon le même principe. Quelles conséquences vont bien pouvoir avoir ces lois sur le comportement mécanique des condensateurs ? Pour comprendre cela, reportons-nous à la figure 7 schématisant un condensateur de type « mille-feuilles ».

Que se passe-t-il donc lorsque nous appliquons une différence de potentiel entre les deux bornes de ce condensateur ? Les plaques vis-à-vis étant toujours de charge contraire, elles vont s'attirer les unes les autres et conduire, en quelque sorte, à une compression du condensateur. Il est tout à fait possible, à l'aide d'un microphone très sensible, de mettre en évidence ce phénomène qui se traduit par des craquements, preuve du travail mécanique se produisant au sein de notre élément capacitif.

Quelles seront les conséquences de ce phénomène ? Elles sont discutables et discutées... Certains répondront « aucune » et cela fait preuve d'une mauvaise compréhension des effets électrostatiques mis en jeu. D'autres diront « désastreuses » et ne jureront que par des montages à liaisons directes...

La vérité est forcément ailleurs et pour être pragmatiques, nous dirons que ces phénomènes étant inévitables, il faut s'en accommoder en essayant, autant que faire se peut, de les maintenir à un niveau suffisamment bas pour être peu gênants. En fait, les conséquences sont multiples : en effet, « compression » et « craquements » vont être tous deux néfastes, mais de façon bien différente. Commençons par le phénomène de compression. Comme nous avons pu le

# UNE LIAISON IMPORTANTE

voir dans notre brève approche théorique des condensateurs, la loi liant capacité et paramètres dimensionnels est :

$$C = \epsilon \frac{S}{e}$$

Lors de l'écrasement du condensateur, la variable « e » va décroître inmanquablement, puisque le phénomène induit un rapprochement des plaques de charges opposées... Conséquence, la capacité augmente de concert ! Cela n'est pas très grave, me direz-vous, peut-être serait-ce même un avantage.

Détrompez-vous, chers lecteurs, il vous faut décidément perdre cette fâcheuse habitude de raisonner en courant continu et penser en grandeur variable, essence même de l'audio ! En effet, si le phénomène passe totalement inaperçu en continu, il n'en sera rien en courant alternatif.

Pour vous en persuader, reportez-vous à la petite équation exposée ici,

$$i = C \frac{du}{dt} = C \frac{\Delta u}{\Delta t}$$

équation fondamentale liant « i », « u » et « C » dans un condensateur.

L'intensité traversant le condensateur est directement proportionnelle à sa capacité ainsi qu'à la dérivée de la tension appliquée à ses bornes, autrement dit de petites variations de cette tension sur une durée très courte. Si cette loi est valable avec un condensateur parfait, il n'en sera rien avec l'élément « x » acheté chez votre détaillant préféré. Hé oui ! La capacité étant variable en fonction de la charge présente sur ses plaques ou de la tension appliquée sur celles-ci si vous préférez, nous obtenons en fait une intensité qui devient non plus proportionnelle à,

$$C \frac{du}{dt}$$

mais à

$$\frac{du^2}{dt^2}$$

la capacité dépendant elle-même de la tension et du temps... Bref, de quoi faire frémir les oreilles les micux disposées !

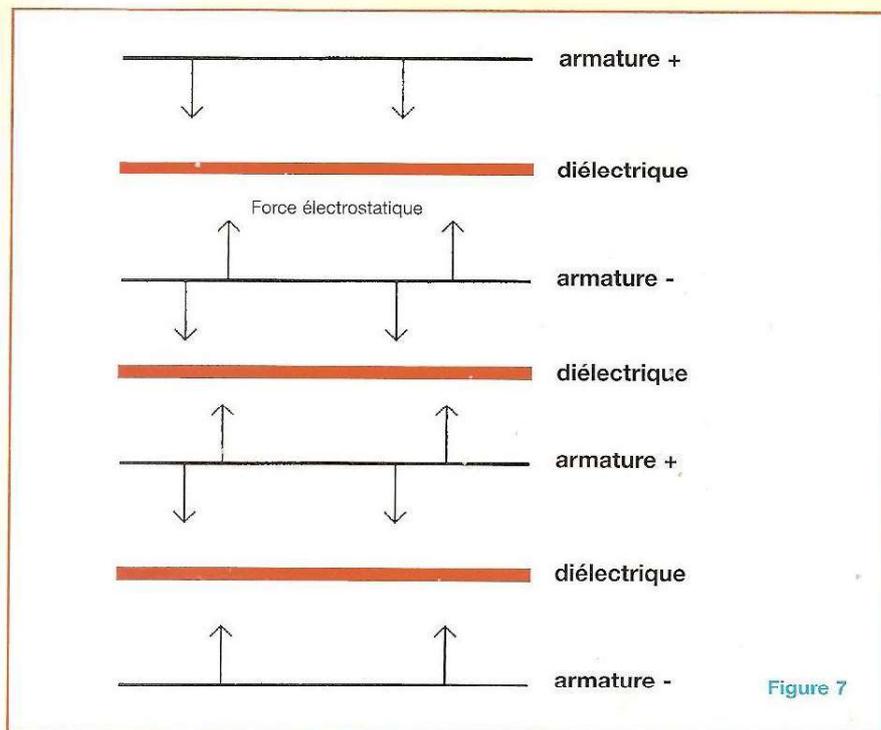


Figure 7

Mais ce n'est pas tout, puisque l'on pourrait aussi considérer des phénomènes de résonances mécaniques et même l'apparition de signaux électriques trouvant leurs origines dans le retour des plaques à leur position de repos... N'en jetez plus, la cour est pleine, laissons là ce tableau apocalyptique ! Sachez seulement que tout cela existe, mais essayez de l'oublier lorsque vous écoutez votre disque préféré...

Abordons maintenant le phénomène de craquement. En fait, je qualifie de « craquement » ce qui pourrait s'appeler « phénomène de transducteur électroacoustique ». Là encore, si nous nous limitons à observer ou plutôt à écouter ce qui se passe dans un condensateur lorsque nous appliquons à ses bornes une tension continue, nous n'obtiendrons que des craquements. En revanche, si nous appliquons un signal variable dans le temps, l'image électrique d'un morceau des Beatles par exemple, nous entendrons... les Beatles émis par notre brave condensateur.

Évidemment, me direz-vous, les arma-

tures vont se rapprocher et s'éloigner au rythme de la modulation et de la batterie de Ringo Star, et cela est bien vrai ! En quoi ce phénomène sera-t-il gênant ?

Si nous nous limitons à l'aspect énergétique des choses, vous vous doutez bien que nous pourrions noter de ce côté une légère déperdition, l'émission d'énergie acoustique s'accompagnant obligatoirement d'une consommation d'énergie électrique. Mais cela n'est pas très grave pour tout vous dire et le principal problème réside, en fait, dans le nom même du phénomène : « transducteur électroacoustique ».

Qu'est-ce qu'un transducteur ? C'est un élément chargé de convertir une forme d'énergie en une autre, par exemple de l'énergie électrique en énergie acoustique. Mais qui oserait affirmer, en ma présence, qu'un transducteur n'est pas réversible ? Certes, nombreux sont ceux qui ne le sont pas... La lampe de chevet qui vous permet de lire votre magazine *Led*, confortablement couché par exemple, est un exemple typique de transducteur non réversible, puisqu'elle

## ET SI ON PARLAIT « CONDENSATEURS »

convertit l'énergie électrique en énergie lumineuse et thermique, tout en étant incapable d'assurer la conversion inverse... Ce serait trop beau !

Mais dans le monde de l'audio, quasiment tous les transducteurs électroacoustiques fonctionnent dans les deux sens. Votre haut-parleur est non seulement un émetteur de sons, mais il est aussi capable d'en capter comme un microphone et d'en donner une image électrique. Bien sûr, il n'est pas optimisé pour cela et accuserait une sensibilité et une fidélité lamentables, mais cet effet existe bel et bien... Bell, justement, l'inventeur contesté du téléphone, utilisait un seul transducteur pour la parole et l'écoute, ce qui obligeait les rares utilisateurs à une acrobatie digne de celle que l'on connaît aujourd'hui avec des téléphones mobiles si petits qu'il faut se les coller tour à tour sur la bouche et l'oreille pour pouvoir tenir décentement une conversation. Je m'égare, mais ça va mieux en le disant !

Pardonnez-moi l'aparté, mais ce problème de réversibilité est extrêmement intéressant... Il a pourtant fait l'objet de fort peu d'études sérieuses. Peut-être un jour reparlerons-nous de cette sombre histoire dans laquelle nos pauvres amplificateurs envoient non seulement de l'énergie aux enceintes, mais en reçoivent aussi, mettant lourdement à contribution leurs circuits de contre-réaction, histoire dans laquelle le fameux taux d'amortissement prendra tout son sens... Mais ne nous arrêtons pas en si bon chemin.

Certains d'entre vous vont se dire « soit, le condensateur est un transducteur électroacoustique, mais en quoi cela dégradera-t-il ses qualités ? » Hé bien, votre condensateur étant justement un transducteur électroacoustique réversible, il va émettre et capter des sons. Pour votre information, sachez qu'il existe d'ailleurs des haut-parleurs (modèles électrostatiques) et des microphones d'usage très courant qui ne sont ni plus ni moins que des armatures mobiles dont l'écartement varie au rythme de la modu-

lation, électrique ou acoustique, autrement dit des condensateurs variables. Dans le cas de notre élément condensateur, cela est bigrement fâcheux : non seulement il va émettre des sons, mais aussi en capter, en particulier ceux dont il est lui-même à l'origine : cacophonie en perspective.

Tentez une petite expérience : branchez à la sortie d'un amplificateur un condensateur de quelques  $\mu\text{F}$  en série avec une résistance de  $8,2 \Omega$ . Glissez fébrilement dans votre lecteur de CD un disque de musique douce, Led Zeppelin par exemple. Appuyez sur « Play » en ayant pris garde de mettre le bouton de réglage de volume au minimum... Augmentez jusqu'à ce que vous entendiez « schtairway tchôou heavensch »... Ca y est, il parle ! Votre condensateur est devenu un très mauvais émetteur, vous le constatez vous-même !

Si par quelques heureux hasards vous n'entendiez rien, soit votre condensateur est mort, soit vous êtes en possession d'un spécimen méritant tous vos égards et qui vous assurera sûrement de bons et loyaux services en tant qu'élément de liaison dans votre futur amplificateur à tubes ! Vous remarquerez que dans le cas contraire, plus vous augmenterez le volume, plus le son sera distordu, conséquence des non-linéarités de la fonction liant tension appliquée et distance entre les armatures, votre condensateur n'étant pas compressible à l'infini.

Plus que les publicités ou les promesses de gourous, ce test vous indiquera de façon fiable si votre condensateur est bon ou pas. Les condensateurs émettant un son très faible et clair auront toutes les chances de se comporter dignement au sein d'un amplificateur. Quant aux autres... C'est pourquoi je pense qu'au-delà des paramètres purement électriques, la construction mécanique d'un condensateur doit attirer toute l'attention de l'amateur. La supériorité souvent constatée des éléments au papier huilé n'est pas liée à la qualité du diélectrique, médiocre soit dit en passant dans la plu-

part des cas, mais plutôt à la rigueur de construction et à la rigidité de leurs robustes armatures d'étain. Il est, en effet, plus difficile de se faire mouvoir des armatures de quelques dixièmes de millimètres que des films métallisés de quelques microns.

Pour tout vous avouer, je n'ai été que très rarement déçu par ces condensateurs et j'en garde jalousement quelques excellents exemplaires pour mes meilleures réalisations ! Mais rassurez-vous, des solutions de remplacement existent... Il y a longtemps que ces phénomènes mécaniques ont été constatés et je déplore qu'ils soient si souvent passés sous silence. Il y a vingt-cinq ans déjà, Jean Hiraga en parlait dans la défunte revue *L'audiophile*, et les remarques qui y étaient faites étaient frappées du sceau du bon sens.

D'autres condensateurs révèlent, en revanche, des comportements bien plus médiocres. Je pense en particulier aux condensateurs bobinés au polystyrène. Je ne sais si des raisons de faible résistance à la traction du film sont à l'origine de leur peu de tenue mécanique, mais j'ai souvent constaté que ceux-ci fonctionnaient beaucoup moins bien que ne devait leur permettre cet excellent diélectrique. En effet, souvenez-vous de ce qui a été dit précédemment : le polystyrène est l'un des matériaux présentant la plus faible absorption diélectrique, qualité importante s'il en est lorsque l'on veut reproduire fidèlement les transitoires.

Quoi qu'il en soit, si vous trouvez des modèles de ce type sérieusement construits, n'hésitez pas un seul instant : achetez ! Sans vouloir faire de la publicité, j'ai remarqué que les condensateurs du genre « millefeuilles » au polystyrène se comportaient mieux que leurs homologues bobinés... Inconvénients : pas de fortes valeurs disponibles, ce qui est souvent rédhibitoire pour une utilisation en tant qu'élément de liaison.

Notez tout de même qu'avec des Fets ou Mos qui s'accrochent sans peine de

# UNE LIAISON IMPORTANTE

résistances de fuite de gate de plusieurs  $M\Omega$ , des condensateurs de 47 à 100 nF peuvent faire l'affaire.

Le polystyrène sera là le meilleur choix possible grâce à sa très grande résistance d'isolement.

Dernier petit « truc » pour tirer la quintessence de vos chers condensateurs : ne les utilisez jamais sans qu'un potentiel continu ne leur soit appliqué, du moins quand la chose est possible. Cela permet, en effet, en mettant le condensateur sous tension électrique, de le mettre aussi sous tension mécanique. Ainsi, le potentiel variable superposé aura moins d'influence mécanique et le résultat sera meilleur. Cela s'applique surtout aux condensateurs d'entrées des amplificateurs à tubes. Il est d'usage, en effet, d'interposer cet élément de liaison afin de protéger la grille du premier tube contre un éventuel niveau continu.

Si vous êtes vraiment puriste, vous pouvez préférer au montage classique une mise en série de deux condensateurs dont le point commun sera porté à un potentiel continu quelconque, les 9 V d'une petite pile par exemple (figure 8). Cette façon de faire peut améliorer les choses, mais il ne faut pas perdre de vue que nous apportons non plus les défauts d'un, mais de deux condensateurs. Il nous faudra choisir pour ceux-ci des valeurs doubles à celle d'un condensateur unique. N'oubliez pas qu'en série, la formule s'applique.

Très honnêtement, je ne pense pas que cette façon de faire apporte plus de bénéfices que d'inconvénients. Pour ma part, j'ai coutume d'utiliser en entrée un condensateur haute tension même si cela ne se justifie guère électriquement, et ce afin de bénéficier de leurs robustes armatures et de leur tenue mécanique. Là encore, le papier huilé peut faire merveille mais son courant de fuite relativement élevé peut provoquer des instabilités en cas de très fortes valeurs de résistances de « grille » ou « gate », ce qui me fait souvent préférer un bon polypropylène bobiné. A vous de voir...

## DISTORSION ET BRUIT

Du fait de tous les phénomènes exposés plus haut, il n'est pas étonnant de constater que les condensateurs apportent leurs lots de distorsions diverses... Cependant, à l'exception des modèles chimiques et tantales, ces taux sont très faibles et, en tout cas, très inférieurs à ce que peut produire un bon amplificateur. Pourquoi en parler alors ?

Si ces taux sont faibles en signal sinusoïdal, on peut estimer qu'en régime transitoire, les déformations affligées au signal seront beaucoup plus fortes, bien que restant probablement à des niveaux inférieurs à 0,1 %. Même faibles, ces valeurs semblent apporter au condensateur une coloration plus ou moins forte, perceptible dans la plupart des cas...

Je ne m'attarderai pas davantage sur le sujet, les chiffres étant rares et les mesures totalement inaccessibles à l'amateur : des niveaux de l'ordre de -160 dB ne sont en effet pas facilement mesurables, même pour le laboratoire le mieux équipé. Et comme je fais un point d'honneur à étayer mes propos par des chiffres...

Pour ce qui est du bruit, il y a quelques notions à préciser. Si comme tout élément permettant le transfert de charges électriques, les condensateurs sont des générateurs de bruit (lire article TFB dans *Led* n°181), ce facteur ne sera jamais important, surtout en audio.

En effet, le bruit produit par les condensateurs est très faible, beaucoup plus faible que celui émis par les éléments actifs et même les résistances. Cela s'entend, du moins pour les condensateurs à film et non pour les modèles chimiques qui, eux, peuvent être à l'origine de perturbations diverses.

En fait, dans ces condensateurs, les courants de fuite entre les armatures peuvent varier dans de très fortes proportions, et ceci de façon totalement aléatoire dans le temps, autrement dit du bruit. Le phénomène sera d'autant plus

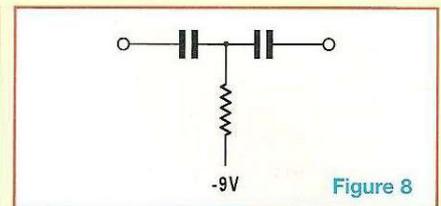


Figure 8

sensible que la tension appliquée s'approchera de la tension maximale indiquée par le constructeur et que la température s'élèvera. Dans les cas extrêmes, de véritables arcs peuvent survenir de façon sporadique entre les armatures, arcs à l'origine de craquements audibles dans les enceintes lorsque les condensateurs de filtrage de votre amplificateur vieillissent. Dans ce cas, méfiance, car cela peut conduire à leur mise en court-circuit pure et simple au bout d'un certain temps et donc à une panne grave...

Les condensateurs peuvent aussi être, non pas des générateurs de bruit, mais plutôt des capteurs de perturbations et du 50 Hz en particulier. Pour ma part, j'ai souvent constaté une dégradation du rapport S/B d'un amplificateur suite à l'adjonction d'un modèle non blindé en entrée.

Un examen attentif du bruit révélait toujours une composante à 50 Hz. Il faut effectivement se méfier de ce phénomène dans les circuits sensibles ou possédant des gains importants. Souvent, une simple inversion du sens du condensateur concerné peut améliorer les choses. Cela s'explique par le fait que l'armature reliée au point froid se trouve à la périphérie de l'élément, créant ainsi un blindage relativement efficace. En tout état de cause, je recommande d'utiliser, autant que possible, des modèles blindés et non en enrobage plastique. La mise à la masse du blindage est parfois nécessaire, mais prenez garde alors à ce que l'isolation soit parfaite entre les connexions et ce blindage.

Dans les montages mu-follower, le condensateur de liaison entre l'anode du tube inférieur et la grille du tube supérieur est particulièrement sensible au bruit, d'autant plus si les fils d'alimentation du

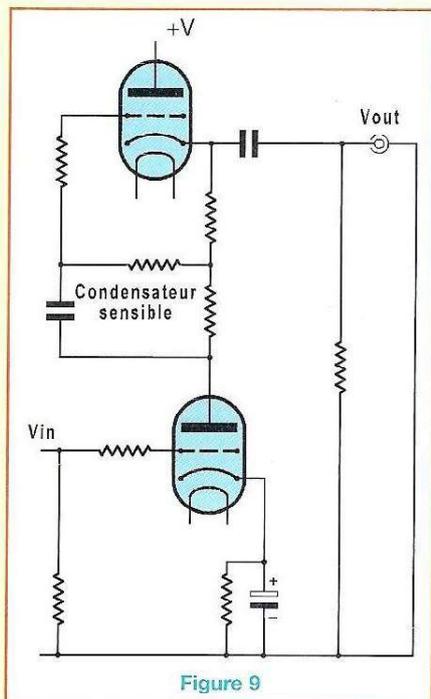


Figure 9

filament sont proches et parcourus par des courants alternatifs (figure 9).

Dans ce circuit, l'élément capacitif assure la liaison entre une grille et un point non référencé à la masse, ce qui aggrave le problème. Croyez-moi, l'utilisation d'un modèle blindé dans ce montage permet d'améliorer les choses dans des proportions non négligeables...

Si vous ne trouvez pas de condensateurs blindés de bonne qualité, vous pouvez très simplement adjoindre un feuillard de cuivre mis à la masse sur un modèle existant, bobiné de préférence (plus facile !). Bien que n'atteignant pas la qualité d'un condensateur blindé, vous constaterez sans aucun doute une amélioration significative du rapport S/B.

## LES CARACTÉRISTIQUES DES CONDENSATEURS UTILISÉS EN AUDIO

### POLYSTYRÈNE OU POLYSTYROL (MKS)

- $\epsilon_r \approx 2,5$
- $\delta \ll 5 \cdot 10^{-4}$  entre 50 Hz et 1 MHz
- Rigidité diélectrique > 200 kV/mm

- Résistance d'isolement >  $1.10^6 \text{ M}\Omega/\mu\text{F}$  à 25°C
- Coefficient de température =  $-120.10^{-6}/^\circ\text{C}$
- Tenue en température -55 à 70°C (voire 85°C)
- Absorption diélectrique  $\ll 0,01\%$
- Tension de fonctionnement : 63 à 1000V
- Valeurs comprises entre 100 pF et 1  $\mu\text{F}$

### Caractéristiques audio

- Excellent en impulsion, et donc l'un des meilleurs en audio.
- Très fin dans l'aigu.
- Excellent dans les filtres à fréquence de coupure précise.
- Recommandé en liaison, en raison de sa très faible fuite.
- Attention à la qualité mécanique.

### POLYESTER OU MYLAR (MKS)

- $\epsilon_r \approx 3,25$
- $\delta > 70.10^{-4}$  à 50 Hz et à 25°C, augmente avec la fréquence
- Rigidité diélectrique > 275 kV/mm
- Résistance d'isolement >  $5.10^4 \text{ M}\Omega/\mu\text{F}$  à 25°C
- Coefficient de température =  $-300.10^{-6}/^\circ\text{C}$
- Tenue en température - 40°C à 85°C voire - 55°C à 125°C
- Absorption diélectrique : 0,1 à 0,2%
- Tension de fonctionnement : 63 à 400V et 630 à 25 kV pour les modèles HT
- Valeurs comprises entre quelques nF et quelques  $\mu\text{F}$

### Caractéristiques audio

- Condensateur économique pouvant réserver de bonnes surprises.
- Certains modèles bien construits peuvent donner d'excellents résultats en liaison.
- A éviter en découplage de cathode si la tension est inférieure à 10 V.

### POLYCARBONATE (MKC)

- $\epsilon_r \approx 2,8$
- $\delta < 20.10^{-4}$  à 50 Hz et à 25°C
- Rigidité diélectrique > 180 kV/mm
- Résistance d'isolement >  $5.10^4 \text{ M}\Omega/\mu\text{F}$  à 25°C
- Coefficient de température =  $\pm 75.10^{-6}/^\circ\text{C}$

- Tenue en température - 55°C à 125°C
- Absorption diélectrique : 0,1 à 0,2 %
- Tension de fonctionnement : 40 à 630 V et 630 à 25 kV pour les modèles HT
- Valeurs comprises entre quelques nF et quelques  $\mu\text{F}$

### Caractéristiques audio

- A peu près identiques au polyester mais toujours de qualité professionnelle.
- Excellents pour les bases de temps en raison de leur grande stabilité.
- Recommandés en découplage de cathode en parallèle de modèles chimiques.
- Peuvent réserver de bonnes surprises en liaison grâce à leur qualité mécanique, mais difficiles à trouver dans le commerce.

### POLYPROPYLÈNE (MKP)

- $\epsilon_r \approx 2,2$
- $\delta < 10.10^{-4}$  à 50 Hz et à 25°C
- Rigidité diélectrique > 350 kV/mm
- Résistance d'isolement >  $1.10^5 \text{ M}\Omega/\mu\text{F}$  à 25°C
- Coefficient de température =  $- 50^\circ\text{C}$  à  $+ 250.10^{-6}/^\circ\text{C}$
- Tenue en température - 55°C à 85°C (voire 105°C)
- Absorption diélectrique : 0,1 %
- Tension de fonctionnement : 160 à 1000 V et même quelques kV pour les modèles HT
- Valeurs comprises entre 47nF et 100 $\mu\text{F}$  environ

### Caractéristiques audio

- Excellents en impulsion, vitesse de montée comprise entre 500 V et 1500 V/ $\mu\text{s}$ . Autrement dit, ces condensateurs sont capables de hautes performances en impulsions, pouvant fournir des crêtes de courant très élevées.
- Tout à fait adaptés à la mise en parallèle avec les condensateurs de filtrage des alimentations HT (entre 1 et 10 $\mu\text{F}$ ). Résultats garantis !
- Sur les préamplificateurs et les montages de faible puissance, le remplacement pur et simple des condensateurs chimiques par des modèles au polypropylène est tout à fait envisageable et

# UNE LIAISON IMPORTANTE

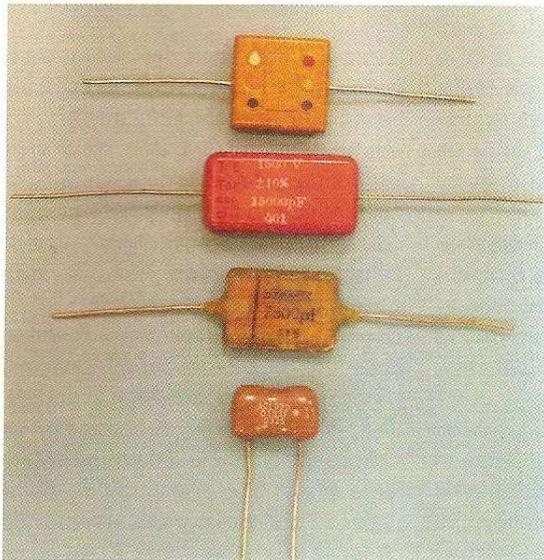


Photo C



Photo D

peut donner des résultats excellents.

- Sur les amplificateurs fonctionnant avec des tensions très élevées comme les triodes 845, l'utilisation de grosses capacités au polypropylène (style 100 $\mu$ F/100V) en série peut être une alternative intéressante aux chimiques, beaucoup moins sensibles à l'échauffement et au vieillissement. La fiabilité est gage de sécurité sur ce genre de matériel !

- Les modèles de bonne qualité bobinés se prêtent à merveille à une utilisation de couplage inter-étages, en particulier vers les étages de puissance.

## MICA (PHOTO C)

- $\epsilon_r \approx 6,8$  à  $7,5$
- $\delta < 2$  à  $10 \cdot 10^{-4}$  à  $25^\circ\text{C}$ , même en HF
- Rigidité diélectrique : fait remarquable, la rigidité est fonction de l'épaisseur du diélectrique. Toutes proportions gardées, elle est plus élevée pour les faibles épaisseurs (en pratique, environ 200 kV/mm).
- Coefficient de température =  $-20^\circ\text{C}$  à  $+100 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$
- Tenue en température : fonction de l'enrobage,  $-55^\circ\text{C}$  à  $85^\circ\text{C}$  pour les modèles courants,  $-55^\circ\text{C}$  à  $155^\circ\text{C}$  pour les modèles professionnels. Le mica ne se

dégrade en fait que vers  $600^\circ\text{C}$  !

- Absorption diélectrique : extrêmement faible
- Tension de fonctionnement : 100 V à quelques kV
- Valeurs comprises entre quelques pF et 100 nF environ
- Si bien enrobé, fiabilité exceptionnelle.
- Dérive en fonction du temps et de la température pratiquement nulle.

## Caractéristiques audio

- Excellent. Comme pour le polypropylène, le mica est capable de hautes performances en impulsions.
- Son hystérésis pratiquement nul le rend imbattable en présence de signaux complexes.
- Excellent dans le médium et l'aigu. Les duretés pouvant cependant apparaître sont toujours le fait d'un assemblage médiocre ou d'un mauvais contact entre les connexions et les armatures.
- Recommandé en liaison, filtre RIAA, contre-réaction.

## PAPIER HUILÉ (PHOTO D)

- $\epsilon_r \approx 3,4$  à  $5,5$  selon le type d'huile
- $\delta < 30$  à  $60 \cdot 10^{-4}$  à 50 Hz et à  $25^\circ\text{C}$

- Résistance d'isolement  $> 10000 \text{ M}\Omega/\mu\text{F}$  à  $20^\circ\text{C}$
- Coefficient de température = 50 à  $200 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$
- Tenue en température  $-55^\circ\text{C}$  à  $70^\circ\text{C}$  ou  $85^\circ\text{C}$
- Absorption diélectrique : 0,1 %
- Tension de fonctionnement : 160 à 10 kV
- Valeurs comprises entre 0,1 et 250  $\mu\text{F}$

## Caractéristiques audio

- Fonctionne très bien en tant qu'élément de filtrage au sein des alimentations, en particulier en sortie des redresseurs.
- En tant qu'élément de liaison, il a tendance en général à « arrondir » les angles, mais dans le bon sens du terme, en gommant certaines duretés dans l'aigu dues aux électroniques.
- Dans les amplificateurs style 845, à utiliser avec le polypropylène dans l'alimentation.
- Les modèles bien construits et ne présentant pas de courant de fuite peuvent se révéler remarquables en liaison, voire supérieurs à des condensateurs extrêmement onéreux.
- Attention aux courants de fuites qui peuvent être relativement élevés.

### CONDENSATEURS À ÉLECTROLYTE ALUMINIUM

·  $\epsilon_r \approx 8$  (alumine  $Al_2O_3$ )

·  $\delta$  élevé

· Absorption diélectrique élevée

À proprement parler, ces condensateurs ne sont pas utilisables en audio, c'est-à-dire pour traiter le signal. En revanche, leur utilisation est quasiment incontournable en tant qu'élément de découplage et de stockage d'énergie. Pour cela, les modèles choisis devront, si possible, posséder une faible résistance série (FRS), voire une très faible résistance série (TFRS). Ainsi, ils seront davantage capables de fournir des pointes de courant élevées et d'alimenter correctement les circuits à impulsions. Il faut néanmoins retenir que même les meilleurs modèles ne sauraient concurrencer les condensateurs à film plastique pour des fréquences supérieures à 100 kHz. Il y a quelques années, la limite se situait plutôt vers 10 kHz, mais le développement des alimentations à découpage a nécessité de gros progrès en la matière. En effet, l'augmentation de la fréquence ayant pour conséquence un gain de poids, d'encombrement et de coût de revient non négligeable, il a fallu faire des efforts pour mettre au point des condensateurs chimiques capables de suivre... Dans le même temps, la durée de vie et la fiabilité de ces éléments ont augmenté de paire, ce qui permet aujourd'hui de faire de bonnes alimentations pour amplificateurs à tubes. Il faudra cependant toujours prendre garde à utiliser ces éléments à une température très inférieure à la température maximale donnée par le constructeur et à une tension inférieure de un tiers à la moitié de la tension nominale. Cela vous garantira une fiabilité

à toute épreuve. Même en cas de coup dur, cela limitera le courant de fuite (proportionnel à la température et à la tension appliquée), ainsi que les bruits divers causés par les ruptures sporadiques de l'isolant. De plus, la durée de vie de votre condensateur s'en trouvera largement augmentée.

Encore un détail : plus vos condensateurs chimiques seront à faible résistance série, plus ils seront capables de fournir des pointes de courant, mais plus ils se chargeront sous un courant bref, mais élevé.

Souvent, le remplacement de vieux condensateurs par des FRS occasionnera la destruction des redresseurs en amont qui ne supporteront pas la surintensité. Donc, usage recommandé, mais prenez garde à ce détail !

Quoi qu'il en soit, condensateur d'entrée de gamme ou FRS, il sera sûrement avantageux de les doubler par des modèles pouvant répondre aux sollicitations, brèves mais intenses, qui sont l'essence même des signaux audio. Des modèles au polypropylène sont à recommander, en alimentation comme en découplage. Effet garanti...

Un dernier mot pour ceux qui seraient tentés, abusés par la publicité, d'utiliser des chimiques en liaisons... Libre à vous, mais vous ne me ferez jamais croire qu'un condensateur peut faire baisser le taux de distorsion, ni qu'un modèle polarisé se comportera de meilleure façon sur signal alternatif qu'un condensateur non polarisé.

Les taux de distorsion des condensateurs chimiques sont toujours supérieurs à ceux des modèles à film. Que celui qui pense pouvoir me prouver le contraire se fasse connaître !

### EN GUISE DE CONCLUSION

Pardonnez-moi, mais dès que je vois des publicités annoncer des « caractéristiques incroyables », je m'agace...

J'ai volontairement passé sous silence les condensateurs « céramique », trop nombreux et différents pour leur consacrer seulement quelques lignes, et je suis conscient d'être passé bien vite sur les condensateurs chimiques.

Quant aux condensateurs « tantales », nous en reparlerons prochainement à l'occasion d'une réalisation, je pense.

Je conclurai en vous disant que ce sujet est passionnant, car il laisse encore une large place aux investigations personnelles. Et bien souvent, vous pourrez conduire vos expériences à peu de frais. Il est plus facile d'essayer le condensateur X conseillé par un ami que le tube Y à plus de 100 € ! Alors, essayez !

Vous verrez qu'avec un peu d'expérience, vous saurez tirer parti des défauts des condensateurs. Ils en ont tous, il suffit de savoir s'en accommoder.

Vous constaterez qu'un condensateur généreux sur les aigus comme un polystyrène vous permettra de renforcer le haut du spectre d'un amplificateur un peu « court ».

Un condensateur au papier huilé vous permettra souvent d'arrondir un peu un amplificateur trop rapide ou agressif...

En fait, les condensateurs peuvent devenir des éléments d'égalisation de vos systèmes, bien plus que les autres éléments passifs, câbles ou résistances.

Croyez-moi, ces investigations sont enrichissantes, souvent longues, mais passionnantes... et peu onéreuses. Ne vous en privez pas !

Jérôme Gest

**Vous avez réalisé des montages personnels que vous aimeriez publier dans *Led*.  
N'hésitez pas à nous joindre afin d'obtenir les renseignements nécessaires  
pour une éventuelle collaboration à notre revue.**

**Editions Périodes 2-12 rue de Bellevue 75019 Paris Tél. : 01 44 84 88 28**