

TRANSDUCTEURS ELECTROSTATIQUES OU LE CHANT DES CONDENSATEURS (II)

Jacky Mas



Au cours de cette seconde partie, nous allons nous intéresser successivement au comportement du diaphragme à basses fréquences, aux problèmes de distorsion et aux caractéristiques spécifiques d'émission des sons par les HPES. Nous parlerons dans un prochain article de certaines réalisations commerciales, en particulier les produits Quad, le Mark 1 et l'ESL 63, rendant ainsi hommage à Peter Walker qui fut le premier à industrialiser, et de quelle façon, des enceintes électrostatiques d'une très grande musicalité et d'une remarquable fiabilité.

Le problème des basses fréquences

Comme nous l'avons mentionné au cours de la première partie de cette série d'articles, l'hypothèse du déplacement uniforme du diaphragme n'est pas licite à basses fréquences. En effet, la membrane résonnante est fixée sur sa périphérie et ne peut avoir un déplacement uni-

forme sur toute sa surface. Par ailleurs, la charge représentée par la masse effective d'air devant le diaphragme n'est pas uniformément distribuée. Les mouvements de la membrane sont alors complexes, ce qui rend toute analyse assez difficile. Nous allons cependant estimer quantitativement l'intensité maximale du signal d'entrée et, par voie de conséquence,

l'amplitude maximale qu'il est alors possible d'obtenir pour de telles fréquences.

Lorsque la polarisation est mise en place, le diaphragme se déplace en phase avec la force électromotrice jusqu'à la fréquence de résonance ω_r . Ce respect de phase n'est plus vrai au-delà de cette fréquence. En effet, le diaphragme, qu'il soit ou non polarisé, présente une com-

pliance au-dessous de ω_r , alors qu'il se comporte comme une réactance au-delà de ω_r . La polarisation provoque simplement un abaissement de la fréquence de résonance à cause de la compliance négative qu'elle engendre. Au-delà de la fréquence ω_r , la force F_e de l'équation (13) (cf. *L'Audiophile* n° 20) et le déplacement sont en opposition de phase. Ces deux grandeurs sont liées par la relation :

$$x = -\frac{F_e}{\omega X_t} \quad (25)$$

où X_t est la réactance totale du système. On peut montrer que cette dernière est donnée par l'expression suivante :

$$X_t = \frac{\omega^2_0 M S}{\omega} \left[\left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 - 1 \right] + \frac{2V_p^2 \epsilon_0 S}{\omega d^3} \quad (26)$$

où M est la masse effective du système incluant à la fois la masse du diaphragme et celle de l'air (souvent plus importante que la masse du diaphragme !) et ω_0 la fréquence de résonance lorsque le système n'est pas polarisé. Le premier terme du second membre de l'équation (26) correspond à la réactance totale du système, alors que le second terme est la réactance de la compliance négative. Ce dernier terme est facilement obtenu à partir de l'équation (12). En reportant cette définition de X_t dans (25), puis en remplaçant F_e par son expression donnée par l'équation (13), nous pouvons écrire après réarrangement des termes :

$$\frac{V_e}{2V_p} = -\left(\frac{x}{d}\right) \left\{ \psi + 1 \right\} \quad (27)$$

en posant :

$$\psi = \frac{d^3 \omega^2_0 M}{2V_p^2 \epsilon_0} \left[\left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 - 1 \right] \quad (28)$$

Le terme précédant les crochets du second membre n'est autre que le rapport $-\frac{C_{me}}{C_{md}}$,

compte tenu de l'équation (12) et de la condition :

$$M S \omega^2_0 C_{md} = 1 \quad (29)$$

Rappelons que le rapport $\frac{C_{me}}{C_{md}}$ a été choisi par Quad égal à environ 3,5. A l'évidence, tous les termes de l'expression (28) sont constants exception faite de la fréquence ω bien entendu. Nous obtenons donc en (27) la variation du coefficient de proportionnalité (en fonction de la fréquence) entre la position du diaphragme et la tension d'entrée. Il est clair que la valeur maximale de la tension d'entrée est limitée soit par le fait que le diaphragme peut se coller sur une électrode fixe, engendrant alors une distorsion, soit par l'équation (23) de l'article précédent qui donne la tension d'entrée maximale en fonction du champ électrique régnant entre les électrodes. Souvenez-vous que ce champ est fonction de la tension disruptive du diélectrique, c'est-à-dire de l'air dans le cas le plus fréquent, mais également de la distance séparant les électrodes et le diaphragme. Pratiquement, c'est le premier facteur limitant qui intervient, car le déplacement du diaphragme dans sa partie centrale est beaucoup plus important que sur la périphérie où il est solidement fixé et il risque d'aller plus facilement au contact d'une des électrodes fixes au niveau de cette partie centrale. Il est utile de déterminer l'expression de la tension du diaphragme en fonction de sa position et, pour l'obtenir, il suffit de reporter l'expression (27) dans l'équation (9) relative à la tension totale du diaphragme après avoir divisé à gauche et à droite du signe égal par V_p .

Quelques petites manipulations algébriques conduisent à l'équation suivante :

$$\frac{V_d}{V_p} = 1 + \psi \left(\frac{x}{d} \right)^2 \quad (30)$$

Le coefficient ψ donné en (28)

est nul lorsque l'on travaille à la fréquence de résonance du système non-polarisé, c'est-à-dire lorsque $\omega = \omega_0$. Dans ce cas, la force électromotrice est nulle et la tension du diaphragme est alors constante et égale à la tension de polarisation quelle que soit la valeur de x , donc l'amplitude du mouvement du diaphragme. En pratique, nous verrons que l'amortissement joue un rôle important pour empêcher un tel mode de fonctionnement, même à la fréquence de résonance. Vous pourrez facilement tracer les courbes des expressions (27) et (30) pour des valeurs de ψ variant de $-3,5$ à 2 lorsque $\left(\frac{x}{d}\right)$ évolue entre -1 et 1 .

Pour $\psi = -1$, l'expression (27) s'annule et des déplacements du diaphragme sont possibles même pour des valeurs insignifiantes de la tension d'entrée : ce mode de fonctionnement est théoriquement celui obtenu à la fréquence de résonance ω_r lorsque le système est polarisé. C'est encore une fois l'amortissement du système qui permet d'éviter bien des ennuis. A très basses fréquences, ψ tend vers $3,5$ en valeur absolue d'après l'équation (28) et compte tenu du choix de Quad pour le rapport des compliances. Dans ce cas, il est facile de montrer que la tension d'entrée $\frac{V_e}{2}$ est égale à $0,71 V_p$ et que le déplacement est d'environ $\frac{1}{3,5}$. Cette valeur est bien inférieure à celle obtenue à l'aide des équations (23) et (24), à savoir $V_e = 2V_p$.

Nous avons précisé que le diaphragme se déplace en phase ou en opposition de phase avec la tension d'entrée V_e selon la fréquence. En réalité, ce n'est vrai qu'en l'absence de tout amortissement. Si ce dernier est pris en compte, tout devient beaucoup plus complexe car la tension d'entrée et le déplacement du diaphragme présentent

alors une relation de phase moins univoque. Il est possible de montrer mathématiquement qu'en tenant compte du rapport $3,5 \cdot \left(\frac{\omega_0}{\omega_r}\right)^2$ de l'ordre de 1,4 avec un coefficient de surtension Q égal à 2, l'amplitude du signal d'entrée ne doit pas excéder $1,5 V_p$ pour éviter que le diaphragme ne se colle à une électrode fixe. Une expérience réalisée à faible amplitude d'entrée à 1 000 Hz sur un panneau Quad ESL 63 a permis de montrer que ω_r est égale à environ 42 Hz et que ω_0 est proche de 50 Hz. Dans ce cas, le rapport des deux fréquences est pratiquement égal à la valeur théorique prédite (1,18). Dans ce cas, le rebond d'amplitude du signal de sortie à la fréquence ω_r est de l'ordre de 0,2 dB, donc parfaitement inaudible.

Distorsions des HPES

Une analyse précise de la distorsion harmonique de ces haut-parleurs devrait prendre en compte les effets de déplacements non-uniformes du diaphragme et le fait que la résistance et la capacité du système sont non-localisées, mais distribuées. Des éléments d'étude de cette distorsion ont été proposés par L.V. Hunt, au moins aux premiers ordres. Pour ce type de développements, l'interprétation des grandeurs en présence est plus aisée lorsque les charges et les déplacements sont exprimés en termes de courants et de vitesses. En effet, la capacité totale du système polarisé fluctue en première approximation à une fréquence 2ν lorsque le diaphragme se déplace à la fréquence ν . Le HPES génère une force électromotrice et un courant inverse traverse la résistance de polarisation. Ce courant fait évoluer la charge du diaphragme à la fréquence ν . Hunt a montré que l'HPES push-pull parfaitement symétrique ne présente pas (ou très peu) d'harmonique 2. Il

a également pu montrer que l'harmonique 3 et les ordres impairs supérieurs sont parfaitement négligeables.

D'une façon très générale, la résistance de polarisation et la symétrie de construction sont des éléments importants pour réduire toutes les distorsions harmoniques à des valeurs très faibles ou nulles. Comme nous l'avons précisé au cours du premier article, le fait d'utiliser la loi (1), par essence non-linéaire, n'a pas d'incidence notable sur les distorsions harmoniques, puisque celle de rang 2 peut facilement être annulée par la résistance de polarisation et que les ordres impairs, égaux et supérieurs à 3, sont parfaitement négligeables tant que le diaphragme ne vient pas se coller sur une des électrodes...

La distorsion par intermodulation est d'autant plus importante que la plage de fréquences reproduites par un même diaphragme est étendue. Mais là encore, les niveaux atteints sont très faibles, et toutes les distorsions des HPES sont bien inférieures à celles de haut-parleurs électrodynamiques quelles que soient les précautions de construction que l'on prenne avec ces derniers.

Enfin, l'utilisation de feuilles de mylar très fines évite le problème des distorsions induites par un étirement non-linéaire du diaphragme.

Caractéristiques émissives des HPES

Comme nous l'avons dit précédemment, P.J. Baxandall estime que la force par unité de surface (1 m^2) pour un champ de 40 kV/cm et un espacement inter-électrodes de 2 mm, est de l'ordre de 70 N/m², mais l'auteur retient une valeur plus faible de l'ordre de 50 N/m², à cause des imperfections mécaniques inhérentes à la construction du HPES. A titre de comparai-

son, un haut-parleur électrodynamique de 21 cm peut atteindre 2 000 N/m² et un tweeter plusieurs dizaines de milliers de N/m². La grande différence entre les deux types de haut-parleurs est bien entendu la masse mobile en présence, beaucoup plus faible pour les HPES que pour les électrodynamiques. A titre d'exemple, un diaphragme de 0,25 m² ne permettra d'atteindre que *quelques mW* à *quelques dizaines de mW* selon la configuration, la charge et donc le mode de fonctionnement.

Le plus souvent, les moteurs électrostatiques ne sont pas enfermés dans des enceintes et fonctionnent en doublet acoustique. Il n'est donc pas nécessaire de réaliser une étude (souvent difficile) de la cavité résonnante constituant l'enceinte comme c'est le cas pour les électrodynamiques. Il n'y a donc aucune vibration due aux parois de l'enceinte, pas de réflexions internes, ni de résonances de la colonne d'air, ni enfin de retards temporels ou de phase à l'origine de distorsions et de colorations. De plus, ce mode de fonctionnement excite beaucoup moins les fréquences propres des salles d'écoute (le diagramme de dispersion affecte la forme d'un huit), ce qui donne le caractère particulièrement propre du registre grave. Certains auditeurs ressentent un « manque » quantitatif de basses fréquences à l'écoute des HPES, même s'ils reconnaissent que la qualité de celui qui est présent est incontestable. Le problème majeur, particulièrement à basse fréquence, est la nécessité de recourir à des surfaces émissives relativement importantes pour obtenir des niveaux acoustiques satisfaisants. D'après A. Deraedt, la pression acoustique créée par un HPES est proportionnelle non pas au signal mais à la dérivée de ce signal par rapport au temps et ce phénomène expliquerait cer-

taines insuffisances des HPES dans le registre grave. Si la membrane n'avait aucune masse, ni de modes propres et, en l'absence de tout amortissement, l'intégration du signal en entrée d'amplificateur permettrait de s'affranchir de ces limitations. L'autre solution suggérée par l'auteur est un asservissement de la membrane, sans qu'il soit nécessaire de recourir à un capteur afin d'obtenir une pression acoustique proportionnelle au signal cette fois et non à sa dérivée.

Peter Walker a proposé une relation simple permettant de calculer la puissance mesurée en sortie d'un HPES en se basant sur le principe dit de réciprocité. Cette expression est la suivante :

$$P = I_c \frac{V_p}{2\pi x d c} \quad (31)$$

P est la pression sonore (N/m^2), à une distance x (m) pour un diaphragme de taille et de forme quelconque, fonctionnant en doublet acoustique. La masse, l'amortissement et la raideur du diaphragme sont négligés ici. Le terme c (m/s) est la vitesse du son dans le milieu de mesure et les autres termes ont les significations précisées plus haut, avec d en mètres. La distance x doit être suffisamment grande pour permettre d'utiliser l'hypothèse que le faisceau sonore se comporte comme une onde plane lorsqu'il atteint le microphone de mesure. A très haute fréquence, la masse d'air au sein des perforations des électrodes ajoutée à celle du diaphragme a pour conséquence de réduire de façon significative la valeur de P mesurée par rapport à celle donnée par l'équation (31). De même, à basse fréquence, cette expression n'est plus valide. Elle reste cependant très utile sur une large plage de fréquences (5 octaves d'après P.J. Baxandall). Il semble qu'elle autorise également des évaluations utiles pour de plus

faibles distances et pour des positions hors axe.

Il est couramment admis qu'un haut-parleur omnidirectionnel procure de plus grandes satisfactions à l'écoute. Cependant, en milieu semi-réverbérant habituel, même lorsque l'auditeur est bien dans l'axe de ses haut-parleurs, les réflexions et les multiples diffusions des sons, en particulier ceux qui sont émis hors axe, vont influencer considérablement sur la qualité de restitution. Afin de minimiser le rôle des réflexions et des diffusions, un certain degré de directivité est donc souhaitable. Il s'agit de réduire le rapport sons réfléchis/sons directs, ce qui diminue du même coup la perception des colorations de la pièce, c'est pourquoi il a été parfois dit que certains HPES étaient davantage « salle-indépendants » que d'autres haut-parleurs. Lorsque les salles d'écoute sont suffisamment vastes pour que les HPES soient placés loin des murs, le problème de la directivité devient moins important. Bien entendu, trop de directivité devient rapidement néfaste à l'image stéréophonique et conduit souvent à une sonorité peu naturelle et/ou désagréable. A basse fréquence, il est difficile d'obtenir une grande directivité. Celle-ci a donc tendance à croître avec la fréquence, mais ce n'est gênant que lorsque sa progression n'est pas suffisamment douce. C'est le problème fréquemment rencontré avec les enceintes multivoies à haut-parleurs électrodynamiques, lorsque les fréquences de coupure sont mal choisies, les filtres répartiteurs sont d'ordre élevé et les caractéristiques des moteurs ne sont pas complémentaires, en particulier leur diagramme polaire. Avec les électrostatiques, le problème des filtres est sans objet (il s'agit toujours de filtres du premier ordre). Lorsqu'ils sont correctement mis en œuvre, ils ne présentent pas

les limitations habituelles des haut-parleurs électrodynamiques ce qui, associé à leur excellente réponse transitoire et à la quasi-absence de distorsion, a fait la réputation de naturel des HPES.

La forme adoptée pour les membranes émissives joue un rôle important sur les caractéristiques de directivité des HPES. D'une manière générale, il est souhaitable que la directivité reste approximativement constante jusqu'à 1 000 Hz. L'index de directivité, selon Baxandall, croît de façon monotone et lente de quelque 5 dB entre 1 et 10 kHz. Le fonctionnement en doublet améliore également ce paramètre à basses fréquences, puisque l'index de directivité théorique est alors de 4,8 dB (pour un diaphragme circulaire fonctionnant en piston). Comparés aux index obtenus à l'aide de haut-parleurs électrodynamiques ou *a fortiori* avec ceux des moteurs à compression, ces valeurs semblent très faibles, et elles sont en réalité à l'origine de l'excellente image stéréophonique des HPES. Les principales solutions permettant d'obtenir les diagrammes de directivité optimaux sont les suivantes :

- soit les membranes présentant une largeur de quelques centimètres sont montées verticalement dans le cadre support et la répartition fréquentielle est telle que les parties latérales se chargent de la reproduction du registre grave. C'est la disposition qui a été choisie pour le premier HPES de chez Quad : le Mark 1 ;
- soit la membrane est unique mais, dans ce cas, il faut opter pour l'une des deux configurations possibles : diviser celle-ci en plusieurs zones de façon à obtenir le diagramme de directivité souhaité ou utiliser un système de lentilles acoustiques ;
- soit, comme cela a été retenu sur le Quad ESL 63, obtenir le diagramme de directivité en jouant sur la division des électrodes fixes. La répartition est en

pratique assurée par des lignes à retard, agissant sur des zones annulaires et concentriques du diaphragme. Ce dernier émet alors des ondes sphériques et on évite ainsi que le faisceau sonore soit trop directif à haute fréquence. Un tel choix dispense d'une réduction de l'espace interélectrodes et donc permet de s'affranchir des problèmes de construction qui en découlent.

Les amplificateurs et les HPES

Au-delà de la fréquence de résonance, l'impédance d'un HPES est globalement égale à la réactance de C_0 (cf. figure 3, première partie, *L'Audiophile* n° 20). Les seuls éléments dissipant le signal d'entrée sont : la résistance d'amortissement R_{md} et celle due à la charge effective de l'air face à la membrane R_{ma} . Dans ces conditions, la plus grande partie de la puissance électrique devrait se retrouver sous forme acoustique, expliquant ainsi l'excellente efficacité des HPES que nous avons mentionné. La charge essentiellement capacitive, en particulier à moyennes et hautes fréquences, engendre une dissipation de puissance au niveau des transistors de l'étage de sortie des amplificateurs bien supérieure à celle qu'induit une charge résistive. Il est, par conséquent, nécessaire de surdimensionner cet étage et de prévoir des radiateurs bien plus importants qu'avec les amplificateurs alimentant des électrodynamiques.

En réduisant le nombre de tours au primaire du transformateur de couplage d'un HPES, il est facile d'augmenter sa sensibilité. Mais, par ailleurs, la plupart de ces haut-parleurs voient leur impédance d'entrée chuter significativement en haute fréquence. Il faut donc trouver un compromis acceptable entre la sensibilité et un niveau d'impédance tel que

les amplificateurs puissent délivrer leur niveau crête en toute sécurité.

Certains constructeurs ont proposé de s'affranchir des problèmes de fluctuations du secteur, des pics en particulier et du bruit ainsi introduit, en polarisant leur HPES à l'aide d'une pile et d'un convertisseur de tension. Ce système a été retenu par une société américaine peu connue en France : David Lucas Company, Inc. (*Precision Audio Components*) pour son produit Audiocell. Une autre originalité de ce système est de réduire l'interface entre l'amplificateur et la cellule électrostatique au seul transformateur. Les corrections permettant d'obtenir une réponse plate en fréquence ainsi que les autres actions sur le signal sont obtenues à l'aide d'une unité de contrôle placée entre le préamplificateur et l'amplificateur (ou dans une boucle de monitoring du préampli). L'unité de contrôle est construite en utilisant des composants électroniques parmi les meilleurs du marché et... des tubes (six 12ax7a). Enfin, le système est modulaire et, pour un prix inférieur à celui de l'investissement de base, il est facile de doubler son système, un peu à la manière des doubles panneaux Quad du fameux HQD (Hartley-Quad-Decca Kelly) de Mark Levinson.

Il y aurait encore beaucoup à dire sur les problèmes de construction et les choix qu'il est nécessaire de faire lors de la construction des HPES, mais les choses deviennent alors très techniques et n'intéressent que quelques spécialistes et, bien entendu, les constructeurs. Nous verrons quelques-uns de ces choix lors du troisième et dernier volet de cette série d'articles dans le prochain numéro de *L'Audiophile* où nous nous intéresserons plus particulièrement à des réalisations concrètes.

la nouvelle
REVUE DU SON

SON
MUSIQUE
VIDEO
MAG

L'AUDIOPHILE



éditions
fréquences

1, boulevard Ney 75018 Paris

Tél. : (1) 40.36.01.97