



# TRANSDUCTEURS ELECTROSTATIQUES OU LE CHANT DES CONDENSATEURS (III)

**L**

*Jacky Mas*

*Les deux articles précédents vous auront persuadé que d'importantes connaissances théoriques sont primordiales pour espérer tirer la quintessence des HPES. Cependant, si le développement de ces transducteurs repose sur des lois physiques parfaitement codifiées, en pratique il faut y ajouter une bonne dose de savoir-faire acquis après de longues années d'expérience. Celle-ci constitue le véritable secret qui préside à la construction de ces haut-parleurs et il n'est, bien entendu, pas question de dévoiler ici toutes les astuces techniques, pour la simple et bonne raison qu'il n'existe aucun document constructeur les révélant. Par exemple, la texture exacte de l'« enduit » recouvrant les diaphragmes n'est pas habituellement divulguée. Bien d'autres mystères planeront sur ces haut-parleurs, après cette série d'articles, mais pour vous permettre de lever encore davantage le voile entourant ces condensateurs qui chantent, nous vous proposons, dans ce troisième et dernier volet, l'analyse de deux réalisations concrètes d'une firme anglaise célèbre, l'une récente et l'autre... plus ancienne.*

## **QUAD for ever...**

Parmi tous les constructeurs d'HPES, la firme QUAD occupe une place à part dans le monde de la Haute-Fidélité puisqu'en cinquante années d'existence,

seuls deux modèles ont en effet été produits par cette société anglaise installée depuis fort longtemps à Huntington. Le premier de ces haut-parleurs, le Mark 1, a commencé sa carrière

en 1957. Le second, l'ESL 63, est venu « remplacer » le précédent au milieu des années 80. Le 63 de la référence n'est pas anodin, il correspond à l'année où l'*Acoustical Manufacturing Company*

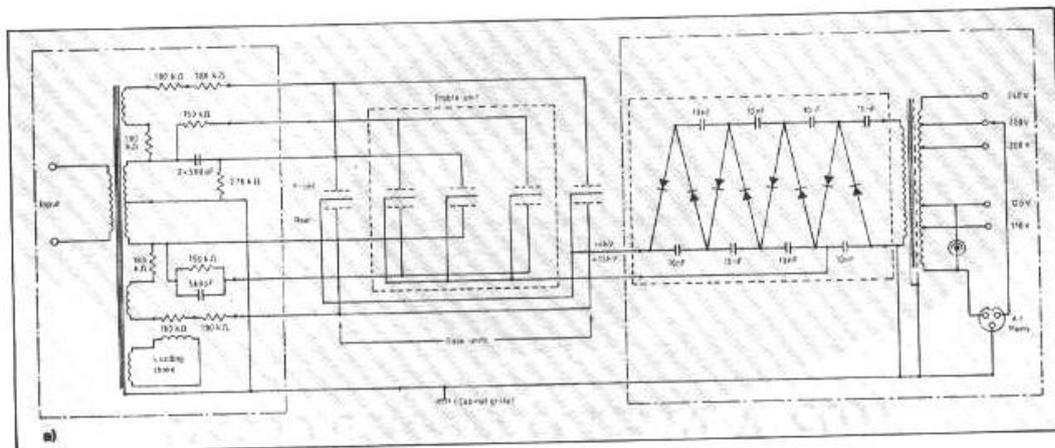
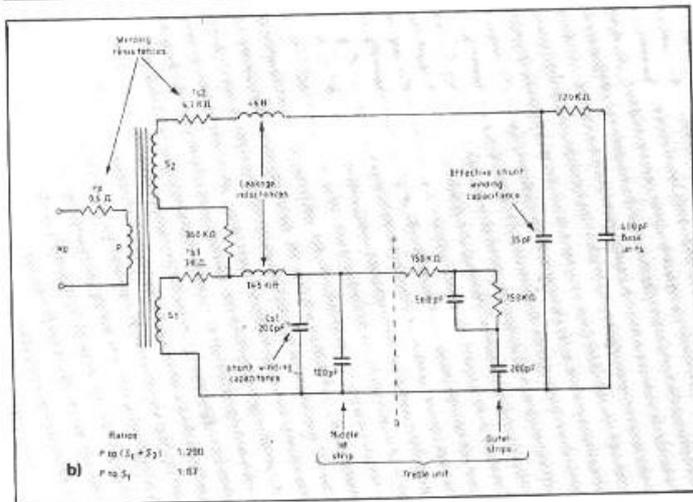


Fig. 1 : Schémas de principe de l'enceinte Quad ESL Mark 1 (d'après P.J. Baxandall).



(nom originel de QUAD) a débuté ses travaux sur le nouveau moteur électrostatique. Il s'est donc écoulé près d'une vingtaine d'années entre le début du développement du transducteur et sa mise sur le marché. Depuis sa sortie, quelques améliorations ont été apportées à ce second modèle, mais les bases fondamentales de son mode de fonctionnement n'ont pas été remises en question. C'est d'ailleurs une constante chez QUAD, puisque le Mark 1 n'avait subi pour sa part que des modifications mineures en près de 30 ans de commercialisation...

### Le QUAD Mark 1

Le schéma de principe de ce modèle apparaît sur la figure 1. Les unités de grave utilisent un diaphragme en Saran dont le module de Young est faible, ce qui permet de le soutenir en deux positions intermédiaires sur sa largeur, en maintenant malgré tout une fréquence de résonance correcte. Il est donc possible d'obtenir par cette construction un espacement quasi-constant sur toute l'aire émissive. Les électrodes fixes, relativement épaisses, réalisées en matériau isolant sur leur face interne (seule leur face externe est con-

ductrice), sont distantes de 2 mm. Un tel espacement est garant d'une bonne auto-protection même pour des signaux d'entrée atteignant des niveaux importants. S'ils se produisent malgré tout une étincelle entre les faces internes des électrodes, le gradient de champ intense développé autour de la région réduit immédiatement la tension\* inter-électrodes. Les électrodes sont bien entendu ajourées, percées de multiples trous, et le risque qu'il se produise une étincelle au travers des trous est faible. Cependant, si une telle éventualité survenait, le diaphragme ne subirait pratiquement aucun dommage. En effet, le signal d'entrée atteint les unités graves au travers d'une résistance série élevée, donc la seule énergie disponible pour l'étincelle est celle stockée au niveau de la capacité inter-électrode. L'épaisseur des électrodes de la cellule médium-aigu est beaucoup plus faible, leur surface interne est conductrice et l'espace inter-électrode est réduit (0,5 mm) afin de minimiser les pertes en haute-fréquence et les irrégularités de la réponse en fréquence dues à l'impédance de la masse d'air en regard des trous.

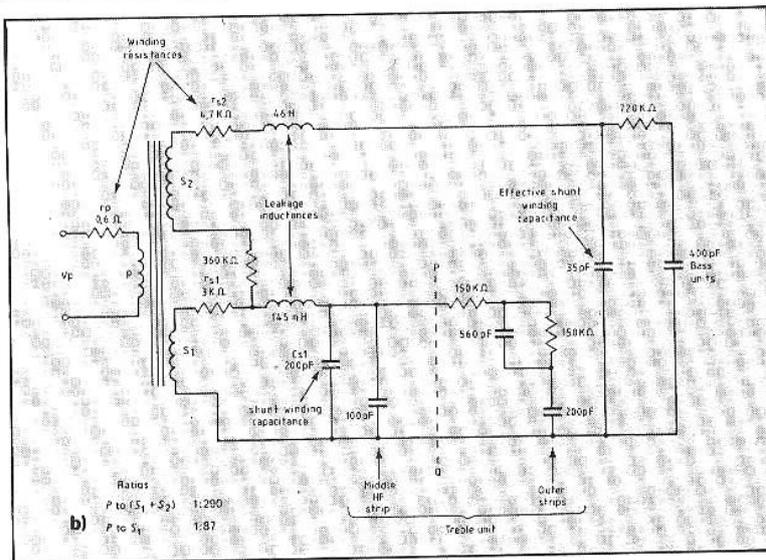
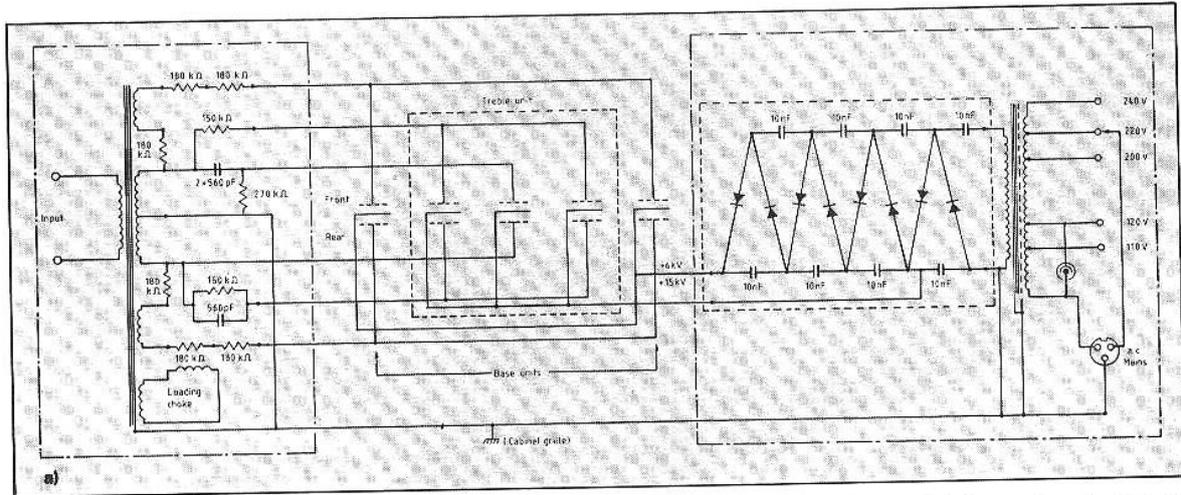


Fig. 1 : Schémas de principe de l'enceinte Quad ESL Mark 1 (d'après P.J. Baxandall).

Le diaphragme est cette fois en Mylar.

Tant que le haut-parleur n'était utilisé qu'avec des amplificateurs de type QUAD II dont la puissance de sortie approchait les 15 W, aucun problème ne pouvait survenir. L'apparition d'amplificateurs délivrant des puissances beaucoup plus importantes à nécessité la mise en place d'une capacité et d'une résistance pour tenter de protéger la cellule d'aigu (voir figure 1). Ce circuit est virtuellement transparent aux fréquences supérieures à 1 kHz, mais réduit la tension appliquée en entrée aux fréquences plus basses où la quantité d'énergie est habituellement plus importante dans le signal. Par ailleurs, la présence de la capacité limite intrinsèquement l'énergie disponible pour l'étincelle.

La tension de polarisation des unités graves est de 6 kV, alors qu'elle n'est que de 1,5 kV pour la cellule de médium-aigu. Les transformateurs utilisés sur les HPES sont des éléments dont l'importance est capitale. Sur la figure 1, le rapport au secondaire du transformateur est de 1:290, l'inductance à basse fréquence pour des signaux faibles est de 5000H. La tension crête au secondaire peut excéder 8 kV.

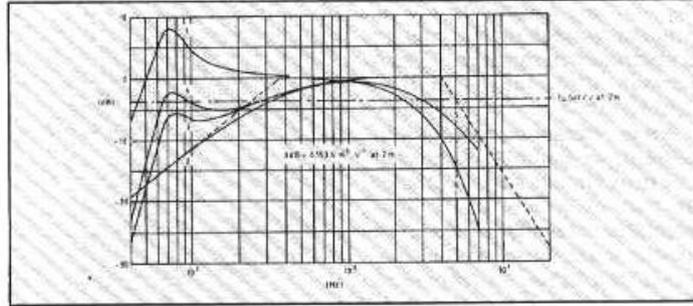


Fig. 2 : Réponse en fréquence de la cellule de grave du Quad ESL Mark I (d'après P.J. Baxandall).

Compte tenu du nombre considérable de tours sur le secondaire, le comportement exact de ces transformateurs est loin d'être prévisible pour l'ensemble du spectre audio. Nous verrons un peu plus loin une des astuces utilisées par QUAD sur l'ESL 63 permettant de résoudre en partie ce problème.

La cellule de grave est attaquée au travers d'une résistance totale supérieure à 1 M $\Omega$ . La fréquence de coupure est alors aux alentours de 350 Hz en basse fréquence. La fréquence de résonance du diaphragme polarisé est de 70 Hz, avec un coefficient Q maintenu à 2,5 environ grâce à un amortissement adapté du diaphragme. La réponse en fréquence de la cellule grave est

représentée par la courbe 1 de la figure 2. Compte tenu de la limitation fréquentielle pour le registre grave mentionnée ci-dessus, la courbe correspondante est la courbe 2. La réponse résultante (somme des deux courbes précédentes) correspond à la courbe 3. Si l'on tient compte d'un effet de baffle résiduel inhérent à la construction du haut-parleur, la réponse finale en basse fréquence est représentée par la courbe 4 de la figure 2.

La pression délivrée à distance, dans l'axe, par un diaphragme grave supposé plat est donnée par l'équation de Walker. Avec une polarisation de 6 kV, un espace inter-électrodes d'environ 2 mm, à une distance

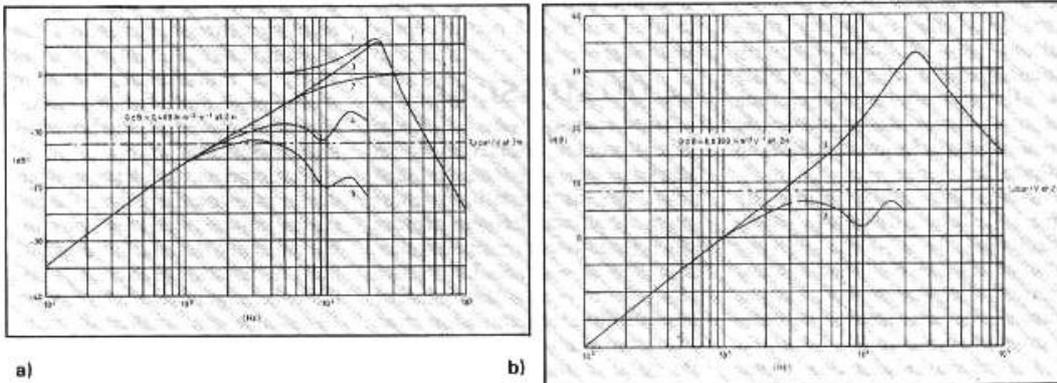


Fig. 3 : Réponse en fréquence de la cellule d'aigu du Quad ESL Mark I : a) fréquences moyennes ; b) hautes fréquences (d'après P.J. Baxandall).

de 2 m, une tension de 1 V au primaire produisant un courant d'électrodes de quelque 250  $\mu\text{A}$  permet d'atteindre environ 0,15 N/m<sup>2</sup>.

En se référant au schéma simplifié de la figure 1, il est clair que deux circuits sont en cascade de part et d'autre de la ligne pointillée notée PQ. Le circuit de gauche à une fréquence de résonance de 24 kHz. Sa réponse en fréquence est donnée par la courbe 1 de la figure 3. De même, la réponse du circuit de droite est donnée par la courbe 2 de cette figure 3. Pour une tension d'entrée constante au primaire du transformateur, la courbe 3 (somme des deux précédentes) n'est autre que celle du courant attaquant la cellule de médium-aigu du HPES. A cause de la courbure de la cellule essentiellement, la courbe 3 est modifiée, et la réponse est en réalité représentée par la courbe 4. Enfin, il est cette fois important de prendre en compte les pertes en hautes-fréquences dues à la masse non-nulle du diaphragme et à la masse effective de l'air dans les trous entre les électrodes. Pour ce dernier point, il faut noter que la disposition régulière ou en quinconce des trous influe sur la réponse finale de la cellule (figure 4). Sans entrer dans le détail des équations qui permettent de calculer ces pertes, nous dirons que la chute doit-être théoriquement d'environ 3 dB à 4 kHz, ce qui donne comme réponse finale de la cellule de médium-aigu la courbe 5 de la figure 3.

Pour une polarisation de 1,5 kV, une distance inter-électrodes de 0,5 mm, un courant de 0,6 mA environ pour une tension d'entrée de 1 V, l'équation de Walker donne une pression acoustique de 0,4 N/m<sup>2</sup>.

Les réponses globales, l'une calculée et l'autre mesurée, pour l'enceinte complète apparaissent sur la figure 5. Nous ne parlerons pas des déphasages entre

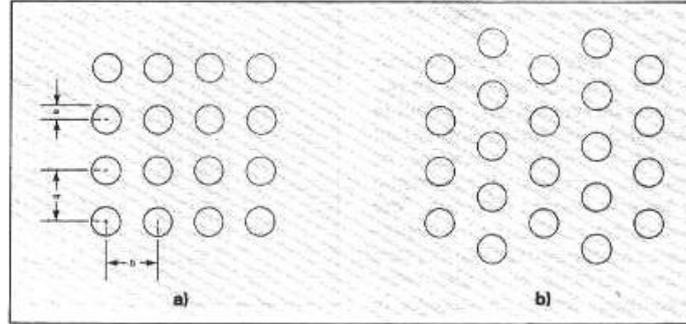


Fig. 4 : Deux dispositions possibles pour les trous des électrodes sur des HPES (d'après P.J. Baxandall).

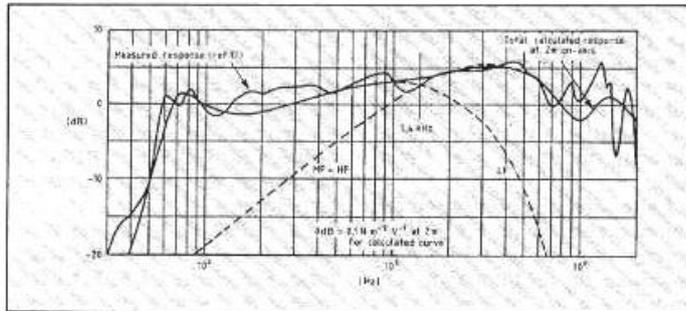


Fig. 5 : Réponses (l'une calculée et l'autre mesurée) de l'enceinte Quad ESL Mark 1 (d'après P.J. Baxandall).

cellules graves et médium-aigu, ni des variations des courbes de réponse occasionnées par la grille de protection ou les réflexions provoquées par le sol, un livre suffirait à peine à épuiser le sujet.

### Le QUAD ESL 63

Tous ceux qui ont eu l'occasion d'écouter attentivement les Mark 1 se souviennent sans doute des caractéristiques marquées de directivité que présentait cette enceinte, en particulier dans le plan vertical. Le registre aigu était considérablement modifié à l'écoute selon que l'auditeur était assis ou debout. De plus, ce modèle n'autorisait pas l'utilisation d'amplificateurs très puissants, car la malheureuse cellule de médium-aigu ne survivait pas généralement à

quelques forte d'orchestre ou de voix. L'ESL 63, également surnommée FRED (pour *Full Range Electrostatic Doublet*), est un doublet acoustique totalement symétrique, acceptant des niveaux crête en entrée de 40 volts, et utilisant des lignes à retard pour améliorer les caractéristiques de directivité horizontale et verticale.

Idéalement, le haut-parleur devait être constitué d'un diaphragme unique, couvrant l'ensemble de l'aire active. Cependant, pour des raisons pratiques, 4 cellules rectangulaires de 60 cm sur 19 cm ont été finalement utilisées. Pour toutes les cellules, l'espacement inter-électrodes est de 2,5 mm, les électrodes sont très fines afin de réduire la masse inerte d'air entre les trous dans le but d'améliorer le comportement

en haute-fréquence. Ces électrodes sont conductrices sur leur partie externe et les 2 cellules centrales sont divisées en 6 anneaux concentriques par les électrodes connectées aux lignes à retard. Les schémas, l'un complet, l'autre simplifié, de l'enceinte apparaissent sur la figure 6. Le transformateur utilisé est ici plus simple que sur le Mark 1, il s'agit en réalité de deux transformateurs présentant chacun un rapport 1/122,5. Cette astuce permet de mieux prédire son comportement sur l'ensemble du spectre audio (jusqu'à 50 kHz) et impose des contraintes de constructions bien moindres que pour le transformateur du Mark 1.

Les équations intéressantes pour la mise en œuvre des lignes à retard sur L'ESL 63 sont les suivantes :

$$Z_0 = \sqrt{L/C}$$

$$f_c = \frac{1}{\pi\sqrt{L/C}}$$

$$T_s = \sqrt{LC}$$

avec :

$Z_0$  l'impédance caractéristique ( $\Omega$ )

$T_s$  le retard (s)

$f_c$  la fréquence de coupure (Hz).

De plus, il est possible de dériver une équation supplémentaire à partir de la triade précédente :

$$T_{tot} = Z_0 C_{tot}$$

où  $T_{tot}$  est le retard total (en secondes) et  $C_{tot}$  la capacité totale (en farads).

Les valeurs de capacité et d'inductance du schéma simplifié de la figure 6 conduisent à une impédance caractéristique de 900 k $\Omega$ , une fréquence de coupure de 16 kHz et un retard  $T_s$  de 20  $\mu$ s et total de 100  $\mu$ s entre les points A et B. Autour et en dessous de 100 Hz, il n'y a pas de retard significatif et les anneaux capacitifs sont simplement en parallèle. Dans ce cas, l'ensemble du diaphragme est contrôlé par la tension aux bornes du secondaire du transformateur. La chute de la réponse en fré-

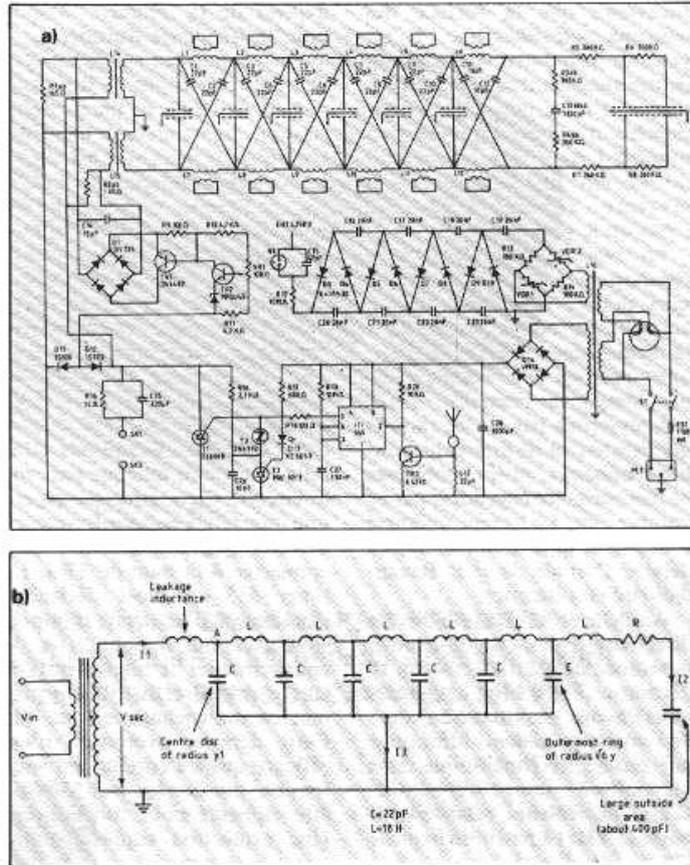


Fig. 6 : Schémas (un complet, un simplifié) de l'enceinte Quad ESL 63 (d'après P.J. Baxandall).

quence dans le registre grave suit asymptotiquement la droite 20 dB/décade en première approximation. Le but poursuivi ici est d'obtenir, selon l'équation de Walker, une réponse axiale parfaitement plate sur la plus grande étendue possible du spectre audio. Pour arriver à ce résultat, il est connu que la ligne doit être terminée sur une résistance égale à son impédance caractéristique. Cela est le cas aux fréquences médium-aigu si R est égale à  $Z_0$  sur le schéma simplifié de la figure 6.

Les retards appliqués à la tension alimentant les anneaux sont

équivalents à un décalage spatial de ces anneaux les uns par rapport aux autres. Il est aisé de calculer ce décalage spatial connaissant le retard et la vitesse du son. Tout se passe alors, en haute-fréquence, comme si la source émissive était ponctuelle, au centre de la sphère sous-tendue par les anneaux. Le nombre de ces anneaux est directement dépendant de la fréquence de coupure en haute fréquence et du retard total. Ce dernier est relié au rayon apparent maximal de la sphère virtuelle. Bien entendu, afin que la capacité des sous-sections soit la même, il est

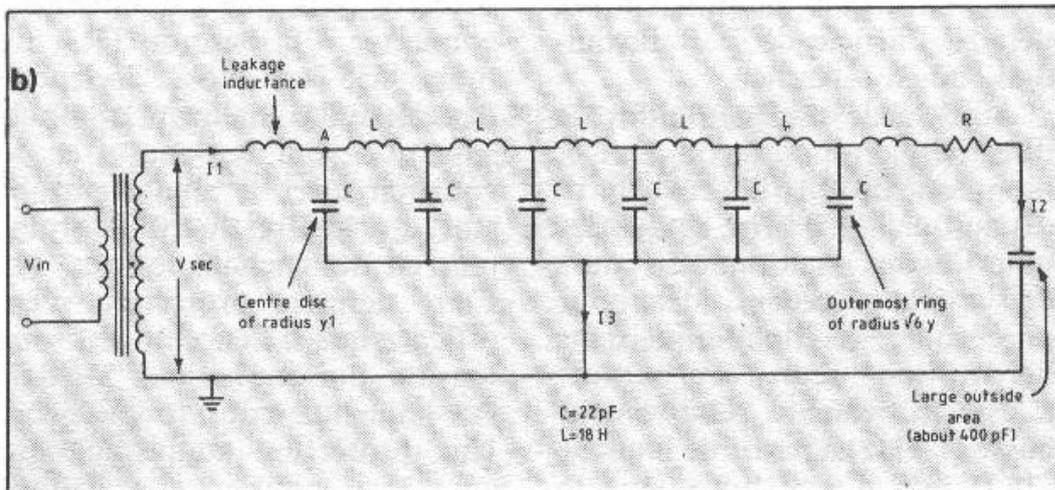
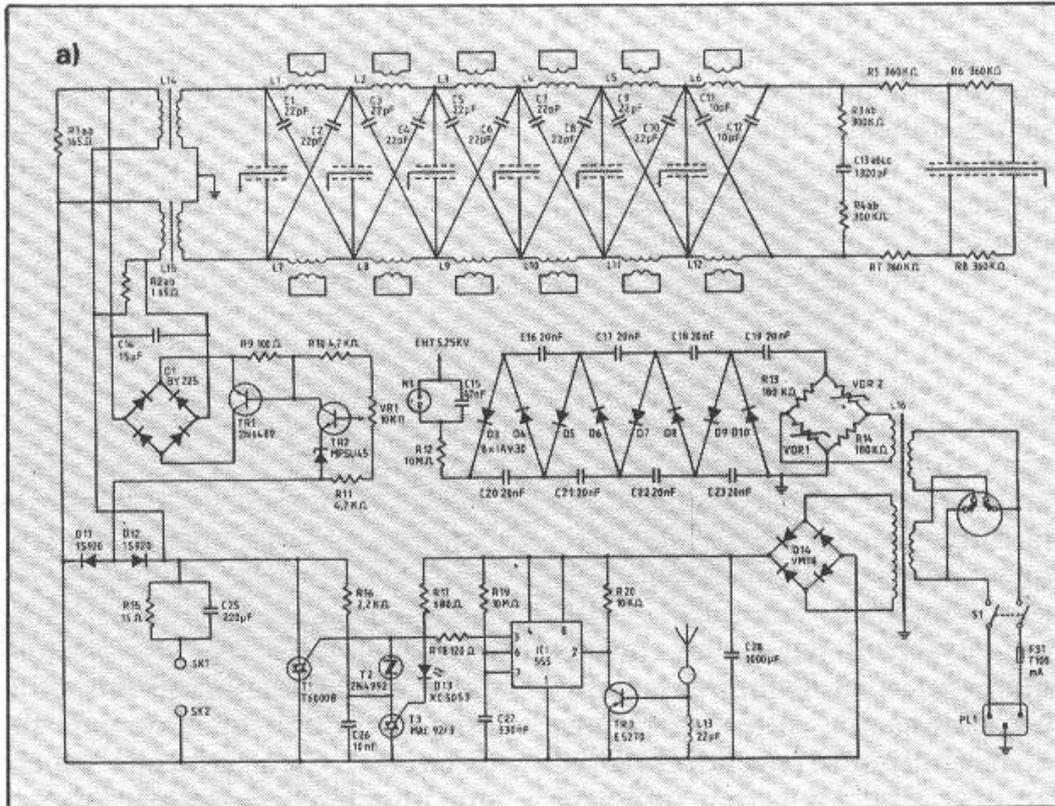


Fig. 6 : Schémas (un complet, un simplifié) de l'enceinte Quad ESL 63 (d'après P.J. Baxandall).

nécessaire que la surface des anneaux soit identique. Il est possible de montrer que le rayon de ces anneaux doit être proportionnel à la racine carrée de leur numéro d'ordre (le premier ou numéro 1 étant le disque central de 15 cm de diamètre et le sixième correspondant à l'anneau le plus externe)

En réalité, le problème du comportement d'un diaphragme sans masse, d'étendue infinie, alimenté par des électrodes dont la forme impose des caractéristiques polaires d'émission, n'est pas simple à résoudre. Nous n'analyserons pas ici les raisons qui permettent de limiter le nombre d'anneaux, ni les problèmes de discontinuité engendrés par ce nombre fini. Le lecteur intéressé consultera, pour de plus amples détails, l'article de P.J. Baxandall cité en référence.

Au-delà de 1 kHz, l'index de directivité croît de façon lente et monotone de 4,8 dB à environ 10 dB autour de 10 kHz, ce qui est, nous l'avons mentionné au cours de l'article précédent, idéal pour une écoute stéréophonique dans un milieu semi-réverbérant. C'est la valeur relativement basse (1 kHz) à partir de laquelle l'index de directivité augmente qui impose le rayon de l'anneau le plus externe, car ce dernier

dépend de la longueur d'onde pour la fréquence considérée.

Par rapport au modèle précédent, les conditions de fonctionnement de l'ESL 63 (haute polarisation, hauts niveaux d'entrée) ont nécessité le recours à des protections. Deux circuits sont utilisés : le premier est constitué du pont D1 et des diodes D11 et D12, ainsi que des transistors TR1 et TR2, le second fait appel aux triacs T1 et T3 et au timer 555. Le premier se comporte comme un shunt lorsque la tension au primaire est égale ou supérieure à 40 V, coupant alors le signal d'entrée. Le second entre en action lorsqu'une étincelle se produit quelque part sur le circuit. Cette étincelle génère une interférence radio-fréquence détectée par une « antenne » connectée à la base de TR3. Le timer 555 est alors déclenché (succession d'un train d'impulsions), ce qui a pour effet de court-circuiter le signal entrant sur le primaire du transformateur en déclenchant le triac T1. Cette dernière protection n'est efficace que si l'enceinte est sous tension, puisque le timer 555 doit être alimenté pour fonctionner. Une protection supplémentaire est prévue pour parer à ce dernier problème utilisant alors les triacs T2 et T3 : en l'absence de

mise sous tension, T3 n'est pas conducteur, et l'application d'un signal d'entrée provoque l'apparition d'une tension aux bornes de C26 qui à travers T2 rend T1 conducteur ce qui court-circuite le signal d'entrée.

Beaucoup d'autres points pourraient être développés, mais cela nous entraînerait sans doute trop loin, d'autant que, nous l'avons dit plus haut, les constructeurs ne dévoilent pas tous leurs secrets de fabrication, et donc une description exhaustive n'est pas possible. Nous donnons quelques références bibliographiques, permettant à ceux d'entre vous qui sont passionnés par le sujet, de trouver des informations que nous n'avons pas jugé opportun de publier dans le cadre de cette série d'articles.

## Bibliographie

**Electroacoustics**, F.V. Hunt, John Wiley & Sons, Inc., 1954, Cambridge, Massachusetts.

**Les Haut-Parleurs Electrostatiques : L'éternel retour**, R. Lafaurie, *Le Haut-Parleur*, N° 1684, et N° 1685, 198 - 202.

**Electrostatic Loudspeakers**, P.J. Baxandall, in *Loudspeaker and Headphone Handbook*, John Borwick ed., Butterworths & Co., 1988, Londres.