

UN CASQUE ELECTROSTATIQUE

Philippe Hiraga

A

yant construit de nombreux casques et haut-parleurs électrostatiques depuis près de vingt ans il était utile de faire connaître aux lecteurs de L'Audiophile ma petite expérience en la matière. L'objet de cet article est donc de décrire la construction d'un casque électrostatique. Une réalisation d'amateur est possible à condition de respecter soigneusement les différentes phases de la réalisation et de disposer d'un peu d'outillage. Certes, elle présente toutefois quelques difficultés et exige un certain nombre d'heures de travail (ce casque étant constitué de nombreuses pièces, la plupart fabriquées spécialement...), lesquelles seront récompensées par les excellentes performances de ce casque qui tiennent la comparaison avec les meilleures réalisations.



Introduction

Il y a une vingtaine d'années, le casque électrostatique faisait son apparition sur le marché européen de la haute-fidélité. Sa finesse de reproduction exceptionnelle, exempte de colorations, sa dynamique élevée, lui permirent d'acquies rapidement une réputation de nec plus ultra en matière de reproducteur sonore.

Malgré l'intérêt suscité par les reproducteurs électrostatiques, les études techniques, surtout lorsqu'il s'agit de casques, sont plutôt rares dans la presse spécialisée, en particulier en France. Il faut chercher dans des numéros de l'ancienne Revue du Son pour trouver une étude du cas-

que SR2 de Stax par Jean Hiraga en mai 1968 ou en janvier 1969 une étude du casque Koss ESP6 par Rémy Lafaurie. Plus récemment, la Nouvelle Revue du Son publia quelques pages consacrées aux casques Stax Lambda et Sigma. Le chapitre traitant des reproducteurs électrostatiques de l'ouvrage de Jean Hiraga : « Les haut-parleurs » constitue une des rares études sur le sujet.

En ce qui concerne les réalisations de casques ou de haut-parleurs électrostatiques, je ne me souviens pas en avoir vu une dans la presse française. La

presse anglaise américaine est mieux pourvue à ce sujet, mais il est vrai que les transducteurs électrostatiques ont toujours été plus appréciés chez eux que chez nous. La discrétion de la presse française à ce propos et le fait que les casques et haut-parleurs électrostatiques français mis sur le marché peuvent se compter sur les doigts d'une seule main expliquent peut-être la raison pour laquelle ces transducteurs semblent parfois entourés d'un certain mystère. Il faut probablement en chercher l'explication dans le fait que la France n'a pas connu de Peter Walker, d'Arthur Janszen ou de Naotake Hayashi, pionniers des transducteurs électrostatiques et auxquels sont associés les noms de Quad, KLH et Stax.

L'écoute au casque

L'avantage principal du casque est de permettre une écoute plus fidèle qui s'affranchit des défauts acoustiques du local d'écoute tout en évitant de perturber le voisinage.

Mais l'écoute au casque n'a pas que des avantages, on peut lui reprocher un certain manque d'extrême-grave, une image stéréophonique faussée, se déployant à l'intérieur du crâne avec une préférence pour le sommet de celui-ci, ou même une excessive séparation de canaux, autrement dit une insuffisance de diaphonie.... Ou encore un déplacement en hauteur des sources sonores selon le niveau, ce qui est très perceptible en bruit rose.

D'autre part, les défauts des disques microsillons ou CD, ceux des bandes magnétiques, le bruit de fond ou le ronflement des amplis et préamplis, le bruit des platines, sont plus perceptibles et plus gênants qu'avec des haut-parleurs. Enfin, le port du casque, relié par un câble à l'ampli n'est pas toujours agréable.

Les transducteurs électrostatiques

Principe de fonctionnement

L'objet de cet article étant de décrire une réalisation pratique d'un casque électrostatique, nous n'aborderons ici très brièvement que la théorie des transducteurs électrostatiques push-pull.

Sur la figure 1, un diaphragme en polyester de quelques microns d'épaisseur faiblement conducteur, est soumis à une tension de polarisation continue. Il est tendu entre deux électrodes métalliques perforées, acoustiquement transparentes, virtuellement au potentiel de la masse. Une tension de modulation symétrique appliquée entre les

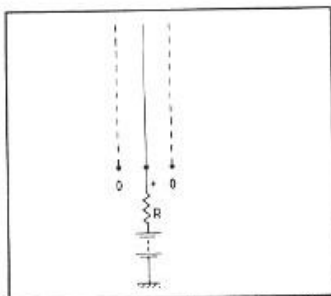


Fig. 1 : Schéma de principe d'un transducteur électrostatique push-pull. Le diaphragme, en polyester de quelques microns d'épaisseur faiblement conducteur, est polarisé par une tension continue. De part et d'autre sont placées les électrodes métalliques perforées sur lesquelles la modulation est appliquée.

électrodes crée des forces électrostatiques de sens opposés auxquelles est soumis le diaphragme. Le son est donc produit par le mouvement du diaphragme entre les électrodes, au gré de la modulation. La figure 2 montre la position du diaphragme selon la nature des charges électriques présentes sur les électrodes.

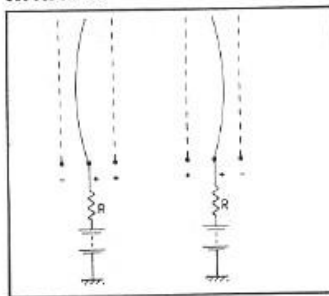


Fig. 2 : Principe de fonctionnement d'un transducteur électrostatique : une tension de modulation symétrique appliquée aux électrodes engendre des forces électrostatiques provoquant le déplacement du diaphragme polarisé à une tension positive.

Le diaphragme travaille en flexion et non en piston car il est toujours maintenu sur sa périphérie, on a parfois représenté le diaphragme flottant dans l'air entre les deux électrodes, c'est tout à fait inexact.

Pour obtenir un niveau acoustique confortable, il est nécessaire de disposer de tensions pouvant atteindre plusieurs centaines de volts, qu'il s'agisse de la tension de modulation ou de la tension de polarisation. Il est donc indispensable d'une part, d'élever la tension de sortie de l'amplificateur avec un transformateur, solution utilisée le plus fréquemment en raison de sa simplicité de mise en œuvre, et d'autre part de disposer d'une haute tension continue obtenue, en général, à l'aide d'un multiplicateur de la tension secteur. La haute tension continue est appliquée entre le point milieu du transformateur symétriseur et le diaphragme à travers une résistance de valeur élevée, dans le but d'obtenir une charge constante de la cellule, celle-ci étant assimilée à un condensateur. Le débit dans la résistance est très faible, de l'ordre d'une fraction de microampère, un contact avec le diaphragme ne présente donc aucun danger pour l'utilisateur, il n'en est pas de même pour la tension de modulation disponible à la sortie du transformateur de modulation ou à la surface des électrodes perforées qui peut occasionner un choc désagréable.

Avenir des transducteurs électrostatiques

Il y a quelques années, j'ai pu lire et entendre que les transducteurs électrostatiques étaient condamnés par l'arrivée sur le marché de nouvelles technologies notamment celles utilisant les plasmas, mais également par la commercialisation du disque compact doué d'une grande dynamique que lesdits transducteurs étaient censés ne pas pouvoir supporter. En fait, il n'y a jamais eu autant de haut-parleurs électrostatiques sur le marché qu'aujourd'hui, j'estime que ceci est dû au fait que le disque compact met en valeur les grandes qualités de ces reproductions.

teurs, leur avenir semble donc assuré.

Le casque électrostatique

Avantages et inconvénients des casques électrostatiques

La très faible masse du diaphragme, épais de quelques microns seulement, permet de reproduire fidèlement les fréquences élevées ou les messages sonores complexes. Ce diaphragme est mu quasi uniformément sur toute sa surface quelle que soit la fréquence, autant de facteurs favorisant une excellente réponse transitoire. Il en résulte des performances très supérieures à celles des systèmes électrodynamiques employant une membrane de papier ou de plastique.

Le diaphragme émet une onde presque plane en direction de l'oreille, donc dans des conditions proches de la réalité. En effet, dans une salle de concert, l'auditeur étant placé à une certaine distance de l'orchestre reçoit une onde de forme pratiquement identique. Certains considèrent que le reproduit idéal est la « sphère pulsante », c'est très contestable car ce haut-parleur « idéal » produit une onde sphérique qui ne correspond absolument pas à faible distance aux conditions réelles d'écoute dans une salle de concert, surtout avec une installation stéréophonique, la perspective étant déformée. Remarquons au passage que la réalisation pratique d'un haut-parleur électrostatique push-pull sphérique à membrane unique présente de grosses difficultés mécaniques en plus du fait qu'à l'intérieur d'une sphère soumise à une tension électrique il est théoriquement impossible d'obtenir un champ électrostatique.

La sortie de l'amplificateur prévue normalement pour une charge de 8 ohms n'est que fai-

blement chargée par le casque électrostatique, ce qui favorise une réduction de la distorsion. D'autre part la puissance consommée reste négligeable, le casque ayant besoin de volts et non de watts. L'échauffement de l'amplificateur reste faible même sur les plus hauts niveaux de modulation, sauf si celui-ci fonctionne en classe A bien entendu. Contrairement à une idée reçue, on peut donc affirmer que les transducteurs électrostatiques ont un bon rendement.

Le casque électrostatique présente toutefois quelques inconvénients, le principal étant qu'il ne peut se passer, dans l'état actuel de la technique, d'un boîtier d'alimentation. En effet, la tension continue nécessaire au diaphragme provient presque toujours d'une alimentation secteur. D'autre part, il est indispensable d'utiliser des transformateurs ou un amplificateur pour élever la tension de modulation. C'est l'inconvénient majeur de ces transducteurs. Seul le casque ESP6 de Koss avait tenté de se libérer de ces contraintes en intégrant aux boîtiers d'écouteurs deux petits transformateurs de modulation qui servaient également à fournir la tension de polarisation grâce à un tripleur de tension.

En ce qui concerne les transducteurs électrostatiques eux-mêmes, ils sont sensibles aux poussières et à l'humidité, de plus le champ électrostatique nécessaire à leur fonctionnement a tendance à les attirer, ce qui n'arrange rien. L'humidité en particulier menace de perturber gravement le fonctionnement des cellules. On est donc contraint d'assurer une bonne étanchéité des cellules avec un autre diaphragme, surtout s'il s'agit d'un casque, très sensible à l'humidité dégagée par l'oreille en milieu clos. Seuls peuvent s'en passer les transducteurs dont le diaphragme est isolé sur ses deux faces, il s'agit en fait de deux

diaphragmes conducteurs sur une seule face qui ont été accolés. Ils ne sont pas pour autant à l'abri d'une dégradation progressive de leurs performances due à l'accumulation de poussières.

En fait, le principal inconvénient est que le diaphragme doit être tendu sur sa périphérie, il ne peut donc pas fonctionner parfaitement en piston, par conséquent il est sujet aux ventres et aux nœuds vibratoires, comme toute membrane tendue.

Principe général du casque

La conception est classique dans son ensemble, il s'agit d'un casque de type push-pull à charge constante, ouvert côté extérieur. Un boîtier contenant alimentation secteur et transformateurs de modulation l'accompagne.

La cellule a été conçue au début des années 70 et n'a subi depuis que de très légers changements. De forme ovale, elle est constituée :

- de deux électrodes perforées collées chacune sur un support,
- d'un diaphragme tendu sur un cadre,
- de deux cales d'espacement dont l'épaisseur correspond à l'espacement entre les électrodes perforées.

Cette disposition originale permet de choisir un écartement entre les électrodes fixes et de changer très facilement le diaphragme. Elle est applicable aux casques et haut-parleurs électrostatiques. Le principe de cette cellule ainsi que tous les éléments constituant le casque ont fait l'objet d'un modèle déposé en Propriété Industrielle.

Description de la cellule

La figure 3 montre une face de la cellule, la figure 4 la représente en coupe et la figure 5 en donne une vue éclatée.

La diaphragme a une surface active de 49,5 cm². Cette grande

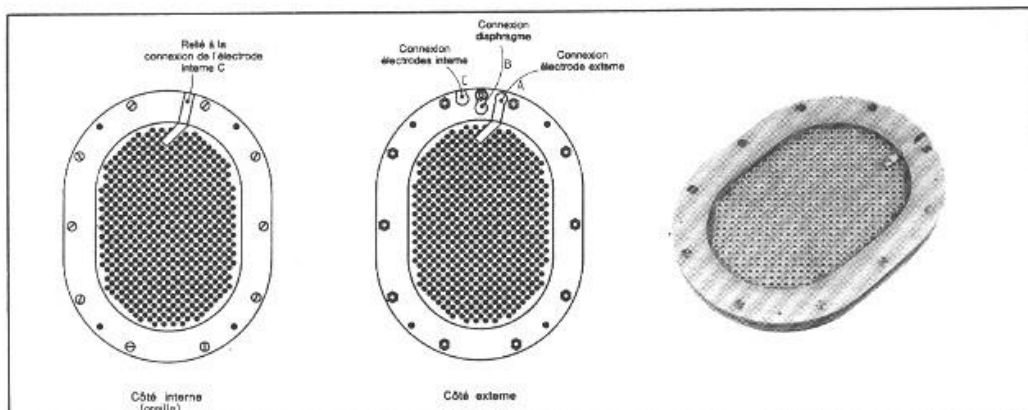


Fig. 3 : Vue extérieure d'une cellule sur sa face interne (côté oreille) et sur sa face externe. On notera les connexions électriques de chacune des électrodes et celle du diaphragme.

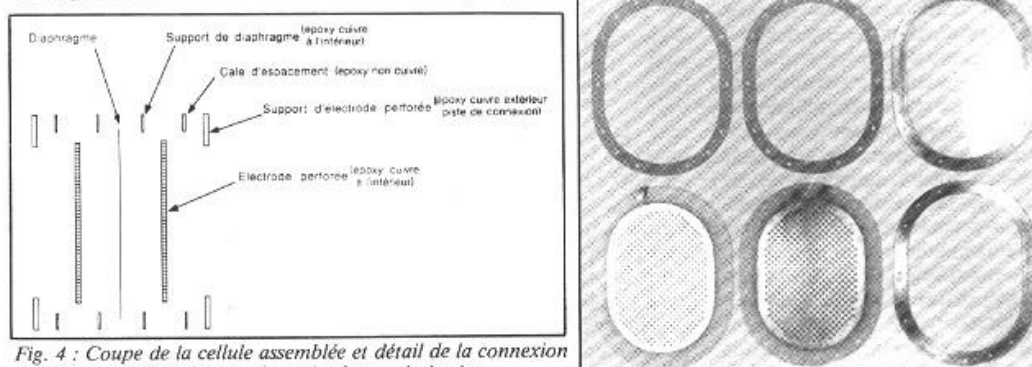


Fig. 4 : Coupe de la cellule assemblée et détail de la connexion électrique du diaphragme nécessaire à sa polarisation.

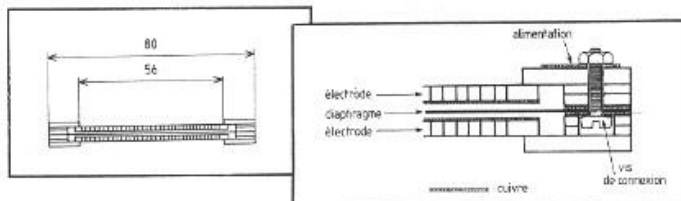


Fig. 5 : Coupe éclatée de la cellule. Toutes les pièces, à l'exception du diaphragme, sont réalisées en verre époxy simple face. On notera avec attention le positionnement des faces cuivrées.

surface permet d'obtenir une réponse étendue dans le grave et un niveau acoustique élevé sans nécessiter de fortes tensions de modulation ou de polarisation. Elle permet l'utilisation de transformateurs de modulation d'un plus faible rapport primaire/secondaire, les performances s'en trouvent améliorées ainsi que la fiabilité.

Les électrodes sont perforées de trous de 2,1 mm de diamètre. Ce type d'électrode, couramment utilisé, est simple à réaliser, son inconvénient est d'être plus facilement sujet à l'amorçage.

La surface des trous représente environ 50 % de la surface de l'électrode et 35 % de la surface du diaphragme. Idéalement il faudrait utiliser des électrodes

très finement perforées et très rapprochées l'une de l'autre, mais l'air passe difficilement dans des trous de très petite taille. En général, il m'a toujours semblé que des trous relativement grands donnaient les meilleurs résultats auditifs. A ce sujet, les électrodes constituées d'un assemblage de fines barres parallèles donnent de très bons résultats, mais il est difficile de les utiliser dans une cellule de casque qui exige précision et robustesse.

Les fils de connexion véhiculant la modulation sont soudés à la face cuivrée grâce à un trou métallisé. Chaque électrode est collée sur un cadre support en verre époxy également.

Le diaphragme est en polyester, film plastique assez rigide et cassant, il est rendu conducteur

sur une face par un traitement spécial, puis tendu et collé sur un cadre en verre époxy. Le film de polyester utilisé est du Terphane de Rhône-Poulenc, ce film non métallisé, d'épaisseur 3,5 microns, est employé habituellement dans des condensateurs car il possède de très grandes qualités mécaniques et diélectriques.

Le diaphragme doit être légèrement tendu sur son support sinon il viendrait se coller à l'une des électrodes malgré la constante de temps élevée. En effet, même en l'absence de signal, le diaphragme, soumis à la tension continue de polarisation relativement élevée, est attiré par les électrodes qui sont virtuellement au potentiel de la masse, il a donc tendance à venir se coller à l'une d'entre elles. Ce phénomène, difficile à maîtriser, surtout sur les grands haut-parleurs, a découragé plus d'un amateur se lançant dans la fabrication de transducteurs électrostatiques. Pour maintenir le diaphragme dans sa position médiane entre les deux électrodes, il est donc indispensable de créer des forces de rappel en tendant la diaphragme sur sa périphérie d'où apparition d'une fréquence de résonance se situant dans le bas-médium. Etant donné la faible masse du diaphragme, cette résonance s'amortit très facilement avec un peu d'absorbant. Contrairement aux systèmes électrodynamiques, cette résonance n'a aucun effet sur la courbe d'impédance, les mouvements du diaphragme n'étant pas source d'énergie électrique. La tension mécanique à laquelle est soumis le diaphragme explique le son de tambour, parfois insupportable, des haut-parleurs électrostatiques mal amortis.

Un matériau comme le polyéthylène ne convient pas pour la réalisation de diaphragmes car il est trop mou et vient se coller à l'une des électrodes à moins de le soumettre à une tension mécanique très importante

qui influe alors sur la linéarité de la bande passante et risque de déformer le support.

L'espace entre chaque électrode et le diaphragme est fixé à 0,75 mm par les cales d'espacement. Une tension de polarisation de 750 volts permet d'obtenir un champ électrique de 10 kV/cm, c'est une valeur relativement faible pour un transducteur électrostatique.

Le champ électrostatique présent entre les électrodes et le diaphragme ayant l'inconvénient d'attirer les poussières, le matériau absorbant destiné à amortir les résonances et un écran protecteur en tissu, mettront le côté de la cellule opposé à l'oreille à l'abri des poussières. Du côté oreille, un écran protecteur étanche sera indispensable car l'humidité dégagée par celle-ci a tendance à venir troubler et même stopper le fonctionnement normal de la cellule. Cet écran est constitué par une autre feuille de polyester très fine, de même type que celle employée pour le diaphragme, mais non tendue et

collée sur un cadre en aluminium de 0,5 mm d'épaisseur.

Les transformateurs de modulation et l'alimentation secteur

Les transformateurs de modulation

L'utilisation d'amplificateurs à tubes ou transistors à couplage direct entre l'étage de sortie et les cellules électrostatiques ont l'avantage d'assurer une meilleure qualité de reproduction et une meilleure protection de la cellule si un écrêtage du signal est prévu avant amorçage. Nous avons choisi, dans un premier temps, la solution du transformateur, celle-ci étant plus simple à mettre en œuvre et, en principe, plus économique.

Des transformateurs de sortie pour amplificateurs à tubes conviendraient mais il est de plus en plus difficile de s'en procurer qui soient à la fois performants et peu onéreux. Il a donc fallu faire fabriquer, non sans difficultés, un transformateur spécialement

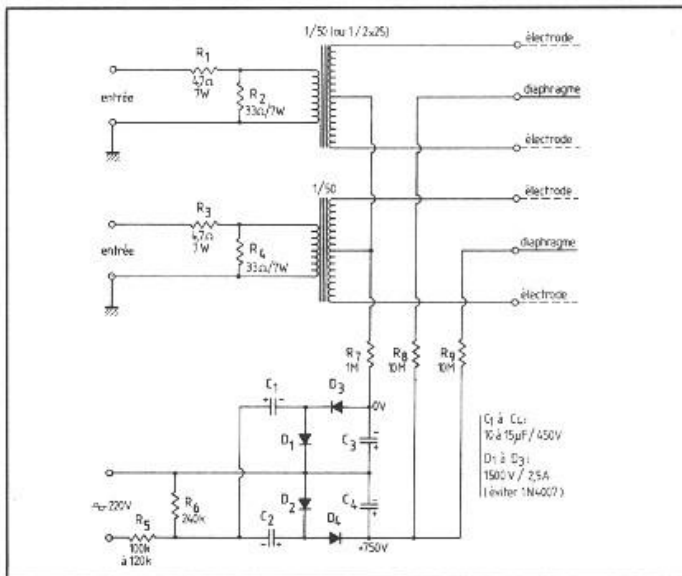


Fig. 6 : La polarisation de 750 V des deux diaphragmes est obtenue par deux doubleurs de tensions alimentés directement à partir du secteur. Les électrodes sont connectées sur le secondaire des transformateurs de modulation.

étudié pour ce casque. Ses tôles en E et I font 50×60 mm, il a un rapport de 1/50.

La réalisation des transformateurs de modulation est très délicate car on se trouve confronté aux problèmes rencontrés lors de la fabrication de transformateurs audio. Le moindre écart entre leurs caractéristiques pouvant se traduire par des différences audibles qui deviennent insupportables à la longue, il est souhaitable qu'ils soient appariés.

Ainsi que le montre la figure 6, à l'entrée des transformateurs de modulation, se trouve un pont diviseur surtout destiné à charger la sortie de l'amplificateur et à protéger les diaphragmes contre les surtensions. Il est possible de remplacer les résistances R1 et R3 par des thermistances à coefficient de température positif (CTP). En cas de surmodulation, l'échauffement de ces dernières aura pour effet de réduire la tension de modulation et d'assurer une protection relative des cellules contre les arcs électriques susceptibles de perforer le diaphragme. Les puristes reprocheront à cette méthode, couramment employée sur les casques d'origine japonaise, une légère réduction de la dynamique. R1 et R3 agissant comme un compresseur, les thermistances peuvent être remplacées par des résistances bobinées sans encourir de grands risques, cette cellule étant peu sujette à l'amorçage même sur les très forts niveaux de modulation.

L'alimentation secteur

En ce qui concerne l'alimentation, nous avons éliminé le principe dit à auto-alimentation qui consiste à prélever une partie de la tension de modulation en sortie des transformateurs pour polariser les diaphragmes, après redressement et filtrage. Nous avons rejeté également la solution faisant appel à un convertisseur élévateur, solution sédui-

sante mais nécessitant une pile ou une batterie.

Le diaphragme sera polarisé à partir du secteur, grâce à deux doubleurs de tension formés des condensateurs de $15 \mu\text{F}$ C1, C2, C3 et C4, isolés à 450 volts ainsi que des diodes 1 500 volts/2,5 ampères D1, D2, D3 et D4. La liaison aux diaphragmes s'effectuant à travers les résistances R8 et R9 de 10 mégohms. En jouant sur la valeur de la résistance R5, il est possible d'ajuster la tension de polarisation.

Réalisation des cellules

Les électrodes perforées

La bakélite est parfois utilisée pour la réalisation de cellules électrostatiques parce qu'il est possible de perforer tous les trous en une fois à l'aide d'un outil spécial, solution très économique pour de grandes surfaces. Elle a l'inconvénient d'être fragile et parfois même faiblement conductrice, ce qui n'est pas toujours souhaitable.

Les différents éléments des cellules sont découpés dans des plaques parfaitement planes de verre époxy de très haute qualité (1,6 mm, $3,5 \mu\text{m}$).

Pour un casque, il faut quatre électrodes perforées, quatre supports d'électrodes, quatre supports de diaphragme, quatre cales d'espacement.

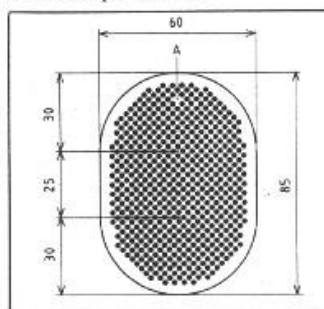


Fig. 7 : Schéma de l'électrode perforée. Réalisée à partir de verre époxy 1,6 mm, cuivré $35 \mu\text{m}$, elle est percée de 531 trous de 2,1 mm de diamètre. Il y en a deux par cellule. La partie cuivrée étant à l'intérieur, la connexion électrique est assurée par un trou métallisé en A.

La figure 7 nous donne le plan d'une électrode perforée, il y en a deux par cellule, ces électrodes sont identiques et percées chacune de 531 trous de 2,1 mm. Après perçage, les électrodes doivent rester parfaitement planes, elles sont soigneusement débarrassées de toutes les bavures par polissage de la surface cuivrée ayant également pour

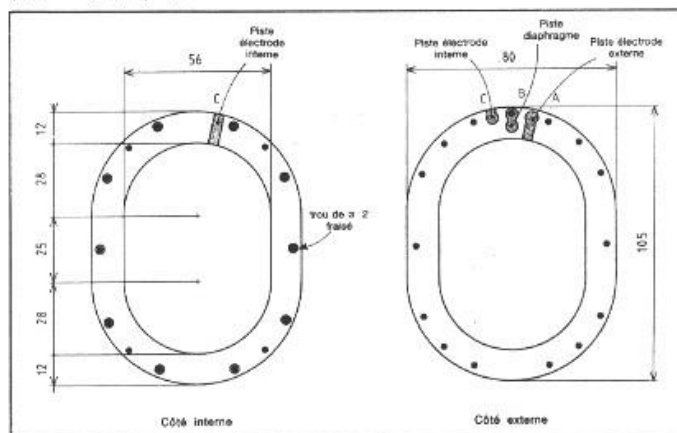
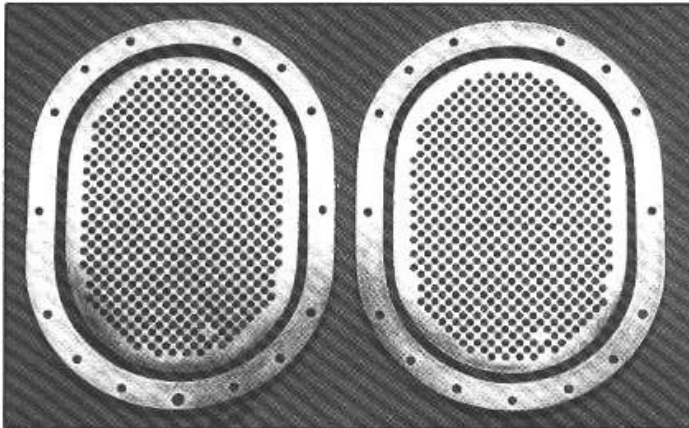


Fig. 8 : Schéma des supports d'électrodes réalisés également en verre époxy de 1,6 mm. Le cuivre n'est conservé que pour les connexions d'électrodes et de diaphragme. Les électrodes sont collées ensuite sur la face non cuivrée.



effet d'arrondir le bord des trous.

La soudure des connexions aux électrodes s'effectue grâce à un trou métallisé, situé à l'endroit repéré A de la figure 7. Il n'y a pas de vernis protecteur sur la surface cuivrée.

Les supports d'électrodes

Le plan des supports est donné à la figure 8. Pas de difficultés particulières dans la fabrication de ces supports dont la couche de cuivre est éliminée par attaque au perchlorure de fer, à part les pastilles qui sont destinées à la soudure du câble de liaison sur l'électrode extérieure.

Le collage des électrodes perforées sur leurs supports s'effectue à la colle cyanoacrylate spéciale verre époxy, à l'aide d'un gabarit de centrage en veillant à ne pas déformer l'électrode, le bord des électrodes perforées est positionné à 2 mm du bord interne des supports.

Les supports de diaphragme

Le plan des supports de diaphragme est donné à la figure 9. Ils ont la même forme que les supports d'électrodes, mais l'ouverture est plus grande et la couche de cuivre est conservée. Le cuivre est soigneusement retiré sur le pourtour des trous sauf celui qui est repéré B car il est destiné à recevoir la vis de connexion. Les

supports sont également polis afin d'éliminer toutes les bavures de cuivre.

Afin de les protéger de la corrosion et de l'oxydation, les parties cuivrées : supports de diaphragme, supports d'électrodes et électrodes perforées sont étamées par trempage dans un bain d'étamage à froid.

Les cales d'espacement

Elles ont les mêmes dimensions que les supports de diaphragme, leur épaisseur détermine l'espacement entre les électrodes. Le matériau utilisé est du verre époxy d'épaisseur 0,8 mm, qui

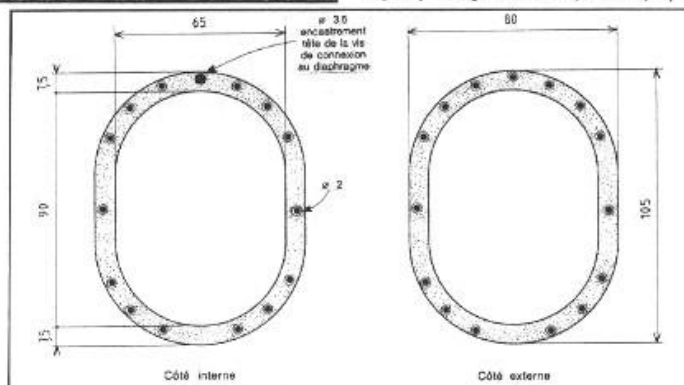


Fig. 9 : Schéma des supports de diaphragme. Leur réalisation est identique à celle des supports d'électrodes mais la couche de cuivre est conservée sur toute la surface à l'exclusion du pourtour des trous (afin d'éviter tout contact avec les vis), sauf pour B qui reçoit la vis de connexion. Les cales d'espacement sont identiques, avec pour seules différences l'épaisseur d'époxy qui n'est que de 0,8 mm contre 1,6 mm pour les supports de diaphragme) et que le cuivre est éliminé.

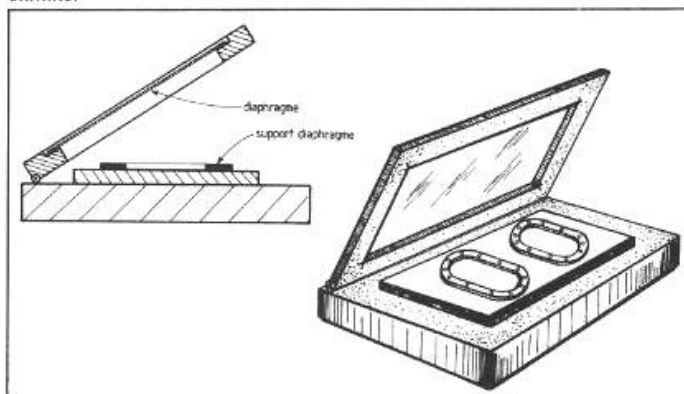


Fig. 10 : Schéma de principe du châssis de montage des diaphragmes.

est destiné normalement à la réalisation de circuits imprimés de faible épaisseur. Après découpe selon le plan de la figure 9, le cuivre est éliminé dans un bain de perchlorure.

Réalisation du diaphragme

Il est indispensable de disposer d'un châssis de montage destiné à tendre le film de polyester et à permettre de le rendre conducteur en surface avant le collage sur son support. Ce châssis de montage est constitué d'un cadre qui est fixé sur un socle par des charnières (fig. 10).

Une feuille de Terphane est tendue et collée sur le cadre du châssis de montage en veillant à ne pas toucher la surface avec les doigts. Le diaphragme doit résonner dans le médium vers 400 Hz. Attention, il doit être tendu à froid, il est tout à fait déconseillé d'employer de l'air chaud pour le tendre car le diaphragme se détendrait après quelques semaines, provoquant une panne de la cellule.

Il faut maintenant rendre le diaphragme faiblement conducteur en surface. Les rares constructeurs de haut-parleurs électrostatiques ont tous leurs petits secrets qu'ils se gardent bien de dévoiler. A priori, de nombreux produits pourraient convenir, comme des graisses et huiles conductrices ou encore les produits antistatiques en atomiseur mais ceux-ci ont tendance à couler ou s'évaporer en provoquant une panne de la cellule, leur emploi est donc très délicat d'autant plus qu'ils sont généralement instables dans le temps.

Le graphite, associé ou non à d'autres produits, a été très apprécié des Américains à une certaine époque. Il est difficile à employer car même s'il est étendu de manière régulière, il est peu fiable et favorise la formation d'arcs électriques, des particules de graphite se détachant sous l'effet du champ électrique.

Une méthode dont l'intérêt est d'être à la portée de tout audiophile consiste à employer un agent de nettoyage pelliculaire pour disque microsillon qui possède des propriétés antistatiques. Ce produit, dont l'aspect rappelle parfois la colle de menuisier, est étalé à la surface du disque de manière à former une fine pellicule qui, après s'être imprégné des poussières, est retirée après séchage.

Ce produit peut être étendu d'eau distillée dans la proportion d'une part de produit pour 50 parts d'eau de manière à former une solution à laquelle un agent mouillant peut être ajouté. Cette solution peut être pulvérisée sur la surface du diaphragme, la couche doit être suffisamment fine et régulière pour que des interférences lumineuses soient visibles après séchage. La résistivité de cette couche, difficile à mesurer, est de l'ordre de 50 000 mégohms/cm. La couche conductrice ainsi réalisée est très fiable et durable.

Les diaphragmes sont maintenant prêts à être collés sur leurs supports. Pour cela, les deux supports de diaphragme sont fixés sur le socle du châssis de montage, une couche très fine de celle cyanoacrylate spéciale métal est étalée sur leur pourtour, côté cuivre, à 2 mm le long du bord interne. Le cadre est alors rabattu jusqu'à ce que le film de polyester vienne en contact avec le support de diaphragme. Une légère pression permet de bien coller le film sur les supports. Le diaphragme est ensuite découpé à 2 mm du bord intérieur des supports avec un gabarit.

La vis de connexion est fixée sur le support B dans le trou prévu à cet effet, la tête de vis sur le côté cuivre.

Assemblage des cellules

Les éléments des cellules sont assemblés avec des vis de 2 x 10 mm à tête fraisée. Il s'effectue

à l'abri de la poussière, le contact des doigts est à éviter absolument. Les écrous seront bloqués à l'aide de Loctite car ils ont tendance à se desserrer avec le temps et les vibrations.

L'électrode extérieure comporte trois pastilles destinées à la soudure des fils du cordon de liaison, la connexion des deux pastilles aux trous métallisés des électrodes perforées s'effectue par l'intermédiaire de deux rubans cuivrés autocollants.

L'écran de protection contre l'humidité est constitué d'un film polyester de même nature que celui utilisé pour le diaphragme, mais non tendu afin d'éviter toute résonance. Il est collé sur un cadre en aluminium d'épaisseur 0,5 mm, lui-même collé sur le côté oreille de la cellule.

L'écran cache-poussière est collé sur le support d'électrode perforée côté extérieur à l'oreille, il est reconstitué d'une fine toile de nylon.

Réalisation de l'alimentation

Le coffret et les transformateurs de modulation

Le boîtier d'alimentation est en tôle d'aluminium de 2 mm d'épaisseur, ses dimensions sont 190 x 145 x 75 mm. Il contient les deux transformateurs de modulation et le circuit imprimé.

Les résistances R1 à R4 sont susceptibles de chauffer, et sont soudées à 5 mm de la surface du circuit imprimé. Le boîtier d'alimentation ne contient pas de commutateur marche/arrêt ni d'inverseur casque/haut-parleurs. La connexion au casque s'effectue grâce à une prise à un connecteur XLR à 6 broches. L'utilité de ce connecteur est discutable car il est possible de s'en passer, mais il offre la possibilité de changer de source de modulation en employant un ampli à transistors ou à tubes à la place des transformateurs.

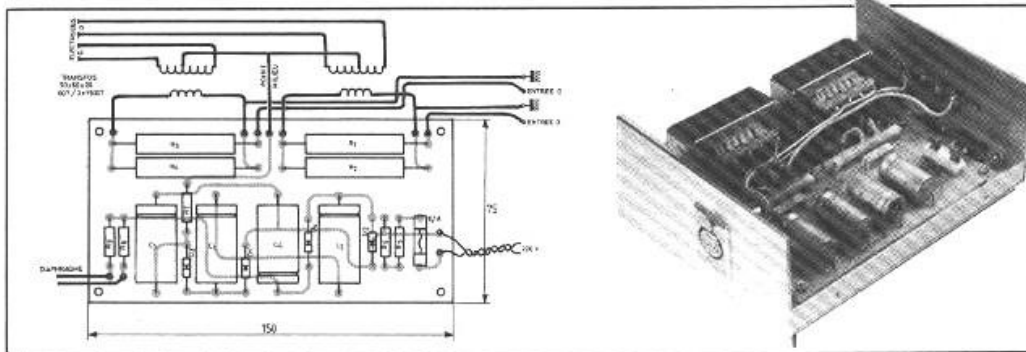


Fig. 11 : Circuit imprimé et implantation de l'alimentation (polarisation et modulation).

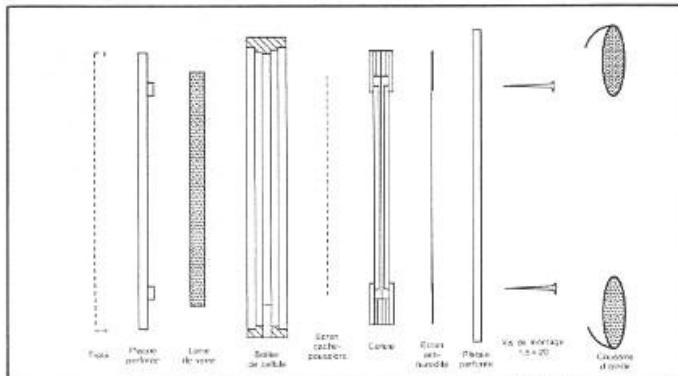
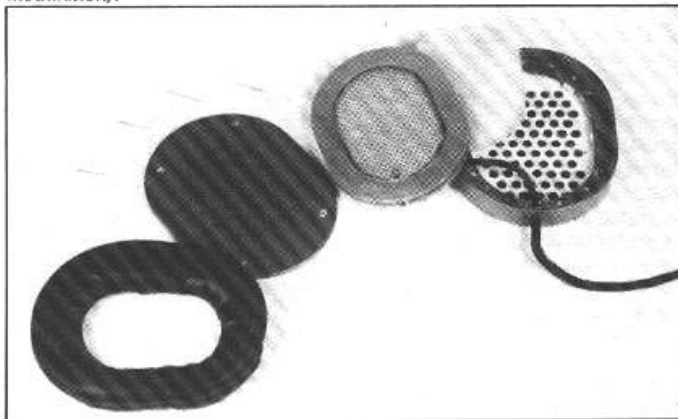


Fig. 12 : Vue des éléments constitutifs avant le montage définitif et plan de montage.

Réalisation du serre-tête et des coussins d'oreilles

Les boîtiers d'écouteurs et les coussins d'oreilles

Les cellules sont installées à l'intérieur de boîtiers en matière plastique. Une fine couche de

laine de verre est posée sur l'écran cache-poussière de protection de manière à parfaire l'amortissement.

L'emploi de coussins d'oreilles est indispensable pour obtenir une bonne reproduction du grave et pour le confort d'écoute. Ces coussins d'oreilles sont en cuir synthétique très fin et élastique, remplis de mousse polyester avant d'être cousus, ils sont fixés sur une plaque en plastique perforée vissée au boîtier, l'élasticité du skaï suffit à les maintenir. Les supports d'écouteurs sont en acier inoxydable réunis par une lame de ressort.

Le câble de liaison

Il est difficile de se procurer un câble à six conducteurs qui soit suffisamment souple et réponde exactement à nos besoins. Il y a la solution qui consisterait à passer les six fils dans du souplisso, solution inacceptable car il s'agit d'un bricolage peu fiable et inadmissible étant donné la qualité du casque. Il ne nous reste plus qu'à fabriquer le câble de liaison. Ce câble est constitué de six fils à un conducteur de petit diamètre sous gaine PVC, assemblés autour d'un fil en coton, ces sept fils sont ensuite recouverts d'une couche de fil en coton soigneusement bobiné, le tout est mis à l'intérieur d'une gaine en fil de coton rayonné. A 60 cm du casque, le câble se subdivise en deux sections de trois conducteurs

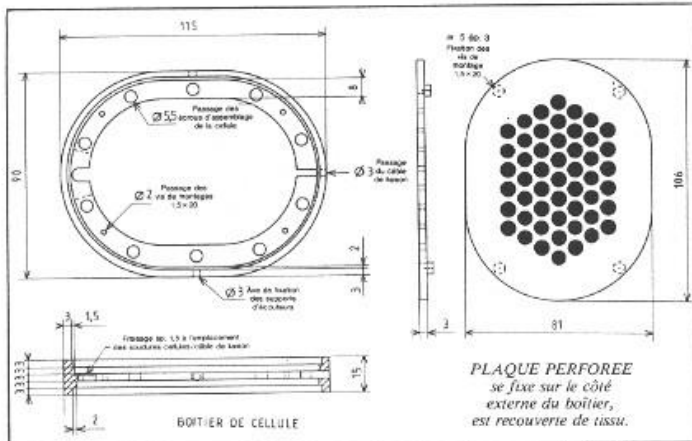
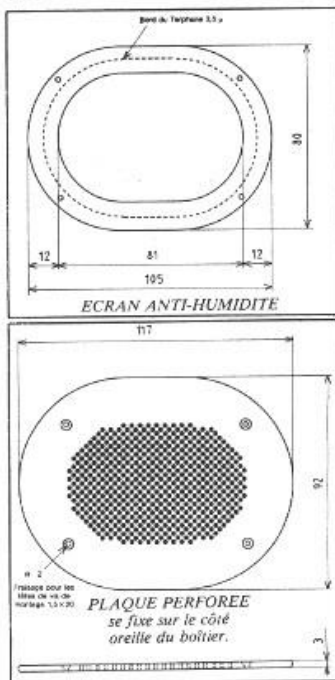


Fig. 12 bis : Réalisation du boîtier d'écouteur, des plaques perforées interne et externe et de l'écran anti-humidité.



chacune, évitant ainsi le passage de câble à l'intérieur du casque. La longueur totale de ce cordon, très souple et très agréable à l'utilisation est de 2,50 mètres.

Essais et performances

Essais

Avant tout essai, il est néces-

saire de vérifier la tension de polarisation, agir si besoin sur la valeur de la résistance R5 afin de porter cette tension à 750 volts.

Ecouter d'abord le casque sans modulation, la présence d'un ronflement peut avoir pour origine une insuffisance de filtrage au niveau des doubleurs de tension. Le moindre défaut de construction ou de montage de la cellule aura pour conséquence de produire un bruit de fond sous forme de crépitement ayant pour origine des fuites électriques entre le diaphragme et les électrodes.

Si le niveau tend à diminuer progressivement au cours d'une écoute prolongée avec apparition de distorsion, c'est que l'humidité pénètre à l'intérieur des cellules, leur étanchéité étant insuffisante.

Un écart de niveau entre les cellules peut provenir d'un mauvais appariement des transformateurs de modulation, un écartement inégal entre les électrodes ou un défaut de réalisation de la cellule.

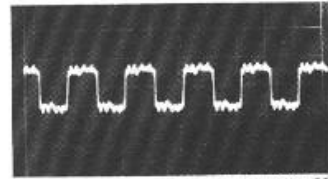
Il faut remarquer qu'au cours de l'écoute, la proximité de l'oreille provoque au bout d'un certain temps un léger échauffement du diaphragme qui, par conséquent, se détend faible-

ment, sa fréquence de résonance s'abaisse donc légèrement et si sa tension mécanique est insuffisante, il viendra se coller à l'une des électrodes avec pour conséquence une panne presque totale de la cellule. En déconnectant le casque, le diaphragme se décollera, mais de toute manière il faudra le remplacer par un diaphragme correctement tendu.

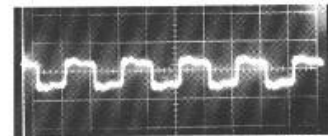
Performances

La courbe de réponse est très régulière sur tout le spectre, en particulier dans le grave et l'aigu, ce n'est pas le cas de la plupart des casques électrostatiques.

La capsule de microphone Sennheiser de référence KE 4 est omnidirectionnelle, sa bande passante, particulièrement linéaire, s'étend de 20 Hz à 20 kHz (± 1 dB) pour la référence KE 4-211-2 qui est un modèle trié. Elle est miniaturisée à l'extrême puisque sa taille est celle d'un boîtier de transistor TO 18. Il est donc possible de disposer cette capsule entre le casque et l'oreille, à l'entrée du conduit auditif, dans le but d'obtenir des mesures en « oreille naturelle ».



Réponse sur signal carré à 1 000 Hz avec microphone Sennheiser KE-4.



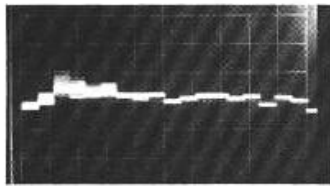
Réponse sur signal carré à 400 Hz avec microphone Sennheiser KE-4.

Il est intéressant de comparer les mesures en oreille « naturelle » aux mesures effectuées avec deux types différents

d'oreilles artificielles, la première s'inspirant d'un modèle proposé par Koss, la seconde étant un moulage en élastomère d'un pavillon d'oreille. Les résultats en oreille « naturelle » sont sensiblement différents de ceux effectués avec les oreilles artificielles. Pour se rapprocher des caractéristiques de l'oreille naturelle, il semblerait que le pavillon d'une oreille artificielle doit être fait d'un matériau dur recouvert d'une fine couche de matériau mou. Le matériau et la forme du pavillon de l'oreille artificielle influent considérablement sur la courbe de réponse et la phase de l'aigu. Il est regrettable qu'il y ait eu si peu d'études sur le sujet.



Courbe en bruit rose sur analyseur 1/2 octave 3 dB par rangée, niveau 90 dB, 31, 44, 63, 88, 125, 176, 250, 353, 500, 700, 1 k, 1,4 k, 2 k, 2,8 k, 4 k, 5,6 k, 8 k, 11,3 k, 16 k, 22,6 k.



Courbe en bruit rose sur analyseur 1/2 octave sortie sur oscillo. Les fluctuations dans le grave sont dues au générateur, environ 10 dB/division.

Utilisation

Conseils et précautions d'emploi

Il est conseillé d'employer un amplificateur d'une puissance minimale de 50 watts. Il faut quelques minutes de « chauffe » pour que le casque puisse pleinement s'exprimer. Le niveau de

pression acoustique maximum dépasse 120 dB et peut atteindre 125 dB à 250 Hz, ce qui est considérable, sans qu'il y ait le moindre risque d'amorçage. Néanmoins, il faut prendre soin de mettre le bouton de volume à zéro sur le préamplificateur avant toute manipulation comme le changement de source de modulation ou la pose du diaphragme sur le disque, on élimine ainsi tous les risques de surmodulation pouvant entraîner une perforation du diaphragme ou une détérioration des transformateurs de modulation. Il faudra bien sûr s'abstenir de brancher ou débrancher les câbles de liaison aux entrées du préamplificateur ou l'amplificateur lorsque le casque est en fonctionnement.

Contrairement à une idée reçue très répandue, une surtension accidentelle provoquant une perforation du diaphragme par un arc électrique n'empêche pas la cellule de continuer à fonctionner. Il suffit d'attendre quelques minutes la dissipation des effets produits par l'ionisation pour que la cellule puisse recommencer à fonctionner presque normalement dans la mesure où la perforation n'est pas trop grande. Une baisse du rendement peut toutefois se manifester, surtout si les bords de la perforation viennent en contact avec les électrodes fixes, ce qui provoque quelques fuites électriques. Il faudra de toute manière envisager un changement de

diaphragme si l'on désire retrouver les performances d'origine.

Performances d'écoute

Ce casque a pu être testé par l'équipe de la rédaction. Il a été comparé à trois autres casques connus pour leurs performances subjectives très poussées, l'un d'entre eux étant d'ailleurs une version électrostatique réputée. L'écoute de plusieurs enregistrements effectués à l'aide d'une paire microphonique est à la fois sublime et décevante. Sublime parce que les applaudissements, le bruit des vagues, du vent, atteignent un degré de réalisme stupéfiant. Décevante parce que, en comparaison, les meilleures enceintes, les meilleurs tweeters donnent l'impression d'étouffer, de lisser le signal audio tout en procurant un effet de largeur stéréophonique frontal que l'on ne peut malheureusement obtenir sur casque. Parmi les casques soumis à ces comparaisons, celui-là s'est révélé comme étant le plus linéaire, le plus neutre. Le « rival » électrostatique était lui aussi remarquable, mais moins linéaire (bosses de présence dans le bas-médium et dans l'extrême-aigu). En comparaison, les deux autres casques électrodynamiques, bien qu'excellents sont apparus comme nettement inférieurs en réponse transitoire et en largeur de bande reproduite. Le rendement de ce casque électrostatique n'est pas très élevé et un minimum de 2x20 W est souhaitable. Il est regrettable que l'essai de ce casque n'ait pu être effectué en le reliant à un amplificateur à tubes OTL « spécial casque électrostatique », la suppression des transformateurs de couplage ne pouvant qu'améliorer les résultats d'écoute. N.D.L.R.

Quelques adresses pour les matériaux

Diaphragme : Terphane 3,5 microns
Mical 3, avenue Aristide-Briand 94230 Cachan

Epoxy : Primelec 10, avenue Jean Jaurès 92240 Malakoff

Skai pour coussin d'oreille : BHV.

Plastique pour boîtier d'écouteur : Styron chez Adam Montparnasse.

Produit conducteur pour diaphragme : Tandy n° 42-9363 (film nettoyant disques analogiques)

Colles : Loctite chez Weber.

Acier inox : chez Weber.

Feuille d'aluminium pour écran anti-humidité : Scotchcal.

Rubans de connexion : Bishop Graphics chez Radio-Voltaire.

Note : Les amateurs qui seraient rebutés par la réalisation des éléments mécaniques (boîtiers et support d'écouteurs, voire coussins d'oreilles) ont la solution d'utiliser la « mécanique » d'un casque du marché peu onéreux, quitte à faire quelques retouches pour fixer les cellules.