

TRANSDUCTEURS ELECTROSTATIQUES OU LE CHANT DES CONDENSATEURS (I)

Jacky Mas

La reproduction des sons a commencé bien avant l'invention du haut-parleur électrodynamique par C.W. Rice et E.W. Kellogg en 1925. La plupart des nombreuses solutions proposées jusqu'alors résultaient de travaux liés, de près ou de loin, à la téléphonie. Le facteur limitant en matière de reproduction sonore avant 1924 était l'amplification, puisque la puissance de sortie des électroniques de cette époque n'excédait pas quelques milliwatts. Alors qu'ils travaillaient pour les laboratoires Bell, Rice et Kellogg avaient compris l'importance que revêtait cette insuffisance de l'électronique, et commencèrent leurs travaux en électroacoustique par la mise au point d'un amplificateur dont la puissance était de 1 watt et faisait partie intégrante d'un produit commercialisé en 1926 : le « Radiola » Modèle 104, qui valait quelque 250 dollars à l'époque ! Cette invention a eu deux effets extraordinaires : d'une part de réellement créer le marché de la reproduction musicale domestique et d'autre part de supplanter l'ensemble des autres transducteurs proposés. Pourtant, un des principes de reproduction ne disparaîtra jamais complètement, c'est l'électrostatique.

Cette technologie a du reste connu un manifeste regain d'intérêt après la seconde guerre mondiale grâce à l'apparition de diaphragmes en matériaux synthétiques dont la légèreté et la finesse leur conféraient une densité superficielle comparable à celle d'un film d'air de quelques millimètres d'épaisseur.

Plus d'un siècle après la découverte de ce principe, le nombre de réalisations commerciales de ce type de transducteur est plus grand que jamais. De la dernière version de chez Quad, l'ESL 63, aux plus récentes Toltèque de AHL, en passant par les Dayton-Wright (disparues aujourd'hui), les Audiostatic, les Sound Lab, les Metaxas et les Martin Logan, le nombre de modèles proposés sur le marché ne cesse de croître. Leur tenue en puissance s'est considérablement améliorée, de même que leur fiabilité avec une moindre tendance au *flashage* et aux distorsions. Ce regain d'intérêt pour l'électrostatique nous a incité à vous proposer une petite étude théorique de ces haut-parleurs que nous illustrerons en dévoilant quelques « secrets de fonctionnement » de certains modèles. Nous vous invitons à nous accompagner dans un pays qui vous est à la fois connu et mystérieux, une contrée où les condensateurs... chantent !

Quelques rappels historiques

Les observations qui ont mené au développement des haut-parleurs électrostatiques remontent au siècle dernier et ce serait Lord Kelvin qui remarqua, en 1863, le son émis par la décharge d'une bouteille de Leyde. Mais, la première mention de l'électrostatique en tant que transducteur semble due à T.A. Edison en 1878 alors qu'il travaillait au développement du téléphone. Différents modèles et brevets d'écouteurs téléphoniques électrostatiques seront d'ailleurs

proposés au cours des vingt dernières années du XIX^e siècle. En 1917, E.C. Wentz publiait un article dans la très respectable *Physic Review* (10, 39-63, July) traitant « d'un instrument uniformément sensible pour la mesure absolue de l'intensité des sons à l'aide d'un... transmetteur à condensateur ! » Quelques années plus tard, en 1922 et toujours dans cette revue scientifique, le même auteur écrivait un autre article sur le sujet dans lequel l'appareil de mesure était qualifié cette fois de transmetteur électrostatique : il s'agissait bel et bien du microphone à condensateur. Les performances exceptionnelles de ce principe, en particulier la linéarité de sa réponse, l'ont rapidement fait accepter comme instrument de référence pour la mesure des intensités sonores.

Les recherches fondamentales sur les transducteurs électrostatiques sont par ailleurs dues à Kyle, Klar, Greaves et ses collaborateurs, Hanna, Edelm, Vogt et McLachlan. La plupart de ces travaux datent de la décennie 1925-1935. Certains d'entre eux sont restés étonnamment modernes et ont présidé au développement de modèles du marché actuel. Vogt, en particulier, déposa de nombreux brevets au cours de ces années, et l'un d'eux (U.S. Pat. n° 1 881 107 du 4 octobre 1932) faisait déjà référence à un *diaphragme solidement étiré entre deux électrodes rigides perforées*. Kellogg déposait à son tour un brevet (General Electric Co., U.S. Pat. n° 1 983 377, 27 septembre 1929), dans lequel il proposait de segmenter le diaphragme par des réseaux d'inductances afin de corriger la chute d'impédance du transducteur. Enfin, D.E.L. Shorter déposa en 1940 un brevet (British Pat. n° 537 931, 21 février 1940), qu'il compléta en 1941, portant également sur la segmentation du diaphragme, mais par un réseau externe pour

améliorer à la fois l'impédance et la directivité du transducteur. Malgré ces nombreux brevets, les électrostatiques ne connurent pas un réel succès commercial jusqu'au début des années 40, car elles présentaient encore trop de problèmes pratiques (pas de matériaux appropriés pour les membranes, importantes distorsions, pas de protection efficace contre leur ennemi n° 1 : la poussière, flashages fréquents détruisant le haut-parleur).

A ces prestigieux scientifiques que nous venons de citer, il faut ajouter les noms de ceux qui ont poursuivi des travaux dans la même voie durant de nombreuses années, tels L.V. Hunt et ses collaborateurs, en particulier A.A. Janszen et R.L. Pritchard de l'Acoustics Research Laboratory à l'Université de Harvard. Leurs publications ont plus de 50 ans et font toujours autorité en la matière.

Il manque un dernier protagoniste à notre rapide historique. Cet homme, qui a commencé son aventure dans un petit atelier londonien en 1936, s'appelle Peter Walker. Il est le fondateur de l'Acoustical Manufacturing Company que tous les amateurs de haute-fidélité connaissent mieux sous l'acronyme de Quad. Ses recherches entreprises dès 1953 aboutirent deux ans plus tard à la création de ce que certains avaient baptisé alors « la petite merveille de Walker » : l'ESL Mark I, haut-parleur électrostatique (HPES) large bande qui s'est fabriquée à plus de 50 000 exemplaires de 1957 à 1985 ! L'un des premiers acquéreurs de ces ESL, un certain Phil Tandy qui a bénéficié de cette enceinte dès le 25 septembre 1957, était toujours très satisfait, il y a quelques temps encoré, du choix qu'il avait fait près d'une trentaine d'années auparavant.

L'aube des HPES

S'il a fallu attendre longtemps l'apparition de modèles bénéfici-

ciant d'une large diffusion commerciale, cela était dû le plus souvent à des contraintes de construction drastiques comme le faible écart constant qu'il est nécessaire de maintenir entre électrodes fixes sur toute leur surface ou la position d'équilibre du diaphragme. De plus, comme nous l'avons dit plus haut, la trop grande rigidité des matériaux disponibles pour les diaphragmes et l'importante tendance à la distorsion harmonique des premiers HPES ont également limité la faisabilité de ce type de transducteurs à une échelle industrielle. Tous ces éléments se combinaient en effet pour réduire l'amplitude autorisée des mouvements du diaphragme. La conséquence immédiate d'une telle limitation entraînait, bien entendu, l'obligation de recourir à des surfaces émissives suffisamment larges pour obtenir des niveaux acoustiques satisfaisants, surtout aux basses fréquences. L'inconvénient était alors la trop grande directivité des sons haute fréquence. C'est pour remédier à ces différentes limitations qu'ont été proposées de nombreuses astuces faisant l'objet de différents brevets.

Les caractéristiques techniques des HPES, telles leur excellente réponse en fréquence, leur régularité en phase et, par conséquent, les performances qu'elles permettent d'atteindre lors de la reproduction des phénomènes transitoires, méritaient que des efforts soient consentis pour surmonter leurs principaux handicaps. Un de leurs points forts en particulier n'est pas assez souvent souligné : c'est leur haute efficacité intrinsèque. Ils ne présentent en effet pas les pertes par hystérésis, thermiques ou par courants de fuite rencontrées avec les HP électrodynamiques et les pertes diélectriques peuvent être négligeables car le diélectrique est constitué d'air. Par conséquent, ces pertes ne se situent pas tant au niveau du transduc-

teur lui-même que de la résistance interne de source qui doit fournir un courant de faible puissance (« déwatté ») puisque la charge est presque purement capacitive. Il est donc intéressant de noter que les amplificateurs fournissant 90 ampères en crête ne sont pas d'un intérêt majeur avec les HPES, mieux vaut en effet qu'ils soient inconditionnellement stables quelle que soit la charge et qu'ils fournissent les tensions adéquates, mais nous reparlerons ultérieurement des contingences de l'amplification des HPES.

Pour circonvier à l'antinomie entre les grandes surfaces émissives requises pour la reproduction des basses fréquences et la trop grande directivité résultante à haute fréquence, il a été proposé soit de segmenter l'aire d'émission en alimentant chaque zone à travers des filtres externes, soit d'utiliser un film fin de très haute résistance pour l'une des électrodes du condensateur. Dans ce dernier cas, la connexion électrique est réalisée au centre ou dans l'un des coins de l'électrode et c'est la haute résistance et la capacité distribuée du diaphragme qui jouent le rôle de circuit RC de filtrage. En prime, cette configuration présente l'avantage de réduire les variations de l'impédance d'entrée.

Mode de fonctionnement des HPES

Très généralement, les HPES peuvent être soit **simple effet** (« single-sided »), soit **double effet** ou « push-pull » (figures 1 et 2). Dans le premier cas, une différence de charge règne entre l'électrode fixe et le diaphragme, ce qui entraîne l'apparition d'une force F perpendiculaire au plan du diaphragme. Cette force tend à collaber les deux électrodes. L'expression de cette force est donnée par :

$$F = \frac{-\epsilon_0 S V^2}{2d^2} \quad (1)$$

avec : $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m

F en newtons, S en m^2 , d en mètres et V en volts.

Le signe - résulte du fait que les déplacements et les forces qui les engendrent sont arbitrairement comptés positivement de l'électrode perforée vers le diaphragme mobile (figure 1).

Afin d'empêcher cette mise en contact du diaphragme et de l'électrode fixe, une solution consiste à tendre le diaphragme de telle sorte que la force mécanique (compliance) ainsi introduite s'oppose à la force électrique engendrée par le champ régnant entre l'électrode fixe et le diaphragme.

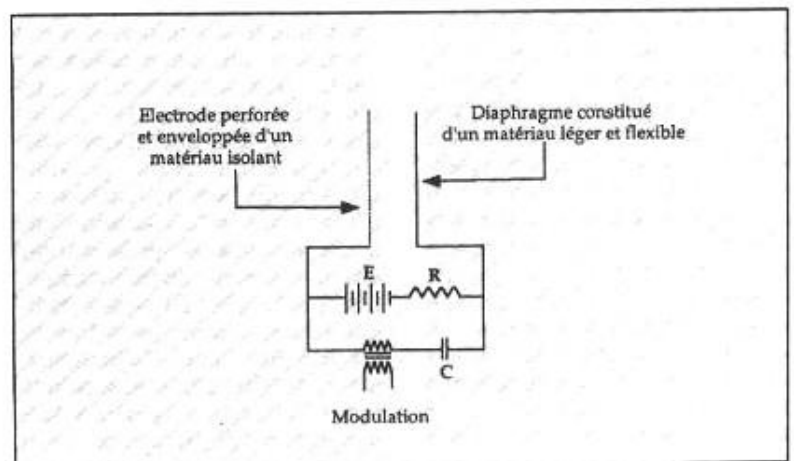


Fig. 1 : Electrostatique Simple-Effet (« Single-sided »).

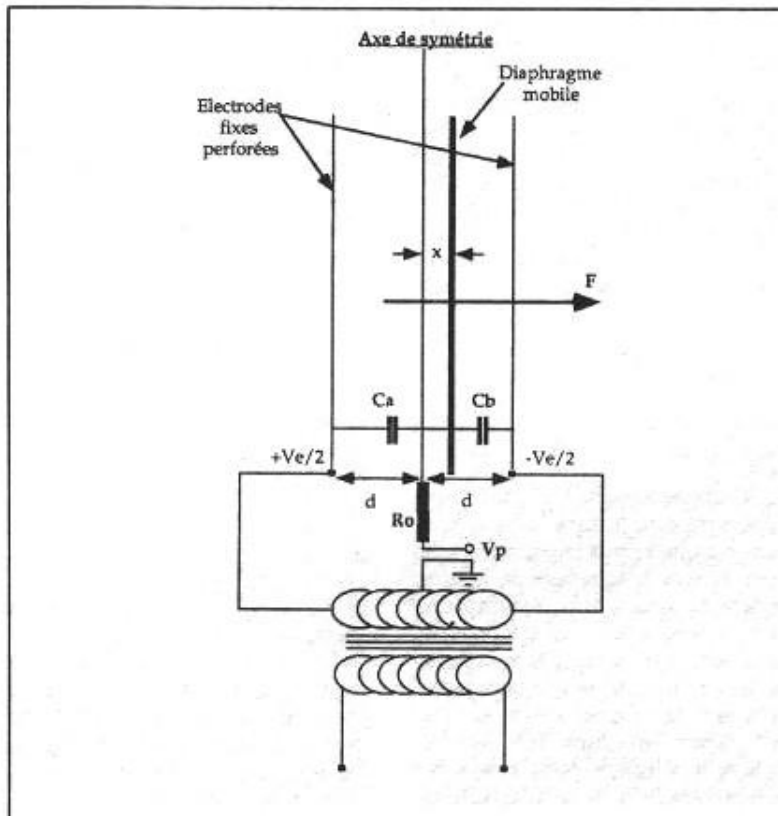


Fig. 2 : Le HPES push-pull. La force F est dirigée dans le sens que nous choisissons arbitrairement positif ici.

Dès les premiers travaux sur les HPES, la loi quadratique en tension suivie par la force F ci-dessus a chagriné les chercheurs, puisque leur but était de réaliser un transducteur linéaire. Cette loi a pour conséquence de faire apparaître des distorsions non-linéaires comme l'a montré sur un plan formel L.V. Hunt en 1954. Nous ne reporterons pas ici l'ensemble des calculs qu'il a réalisés, d'une part ils sont relativement complexes pour qui n'est pas familiarisé avec les équations différentielles et les décompositions en séries de Fourier et, d'autre part, ils n'ont pas vraiment d'intérêt dans la mesure où ce type de transducteur simple effet a totalement été abandonné aujourd'hui et remplacé par le modèle push-pull dont nous allons maintenant parler beaucoup plus longuement.

Les HPES push-pull

Les HPES opérant selon le mode push-pull ont été proposés dès 1924. Le principe général est illustré par la figure 2. Initialement, le diaphragme était constitué d'une feuille mince de métal soumise à une **polarisation par haute tension constante**. La réduction effective des distorsions non-linéaires d'une telle configuration n'est possible qu'avec une symétrie parfaite de construction et à condition que le diaphragme ne présente que des mouvements de faible amplitude par rapport à l'espace inter-électrodes, comme nous l'avons rappelé plus haut. Malheureusement, de telles contingences limitaient l'utilisation du HPES dans une gamme de fréquences assez haute. Un premier grand pas fut franchi lorsque les vertus de la

polarisation à charge constante furent reconnues et que celle-ci remplaça la **polarisation à tension constante**. Il est probable que ce merveilleux principe aurait été découvert bien plus tôt si les expérimentateurs n'avaient pas admis, une fois pour toutes, la loi (1) et avaient cherché une loi par essence plus linéaire. Nous verrons que ce concept de polarisation à charge constante permet d'obtenir une distorsion nulle, même en partant de l'équation non-linéaire (1).

Dans les années 30, la plupart des réalisations expérimentales n'étaient pas loin de la solution cherchée, car elles faisaient toutes appel à une résistance entre le diaphragme et la source de polarisation. Cette résistance avait essentiellement un rôle de sécurité, tendant à réduire les dommages causés au transducteur résultant de décharges et de courts-circuits intempestifs. Le plus souvent, la résistance utilisée était de valeur assez faible pour être en quelque sorte « transparente » au signal. Ce fut C.V. Bocciarelli de la société Philco Corp. qui proposa à L.V. Hunt la mise en place d'une résistance de très haute valeur et suggéra les avantages qualitatifs d'une telle configuration. Hunt devait plus tard avouer que les résultats obtenus à l'aide de cette configuration dépassèrent de loin ce qui avait été prédit. D'après ce dernier, le circuit avait été proposé bien avant que Bocciarelli ne le lui soumette, sans que personne n'en ait vraiment reconnu les mérites. La plus ancienne mention d'un tel circuit semble être due à H. Riegger (brevet allemand n° 398 195 du 10 mars 1920).

Le HPES push-pull à charge constante

Si l'on se réfère à la figure 2, il est clair que la tension V_e appliquée entre les électrodes fixes engendre un champ électrique

$E = \frac{V_c}{2d}$. Par conséquent, toute charge q placée dans ce champ est soumise à l'action d'une force F , telle que :

$$F = q \frac{V_c}{2d} \quad (2)$$

Nous sommes cette fois en présence d'une loi linéaire en fonction de la tension. Supposons que le diaphragme soit chargé uniformément sur toute sa surface. Si nous déconnectons le circuit de charge, ou, ce qui revient au même, si nous prenons une très haute valeur de résistance R de façon à obtenir des constantes de temps RC_a et RC_b très grandes, alors la force agissant sur le diaphragme ne dépend plus que de la charge supposée constante de ce dernier et du champ électrique généré par le signal en tension établi entre les deux électrodes fixes. La première conséquence importante est que la force à laquelle est alors soumise le diaphragme est indépendante de la position de ce dernier entre les deux électrodes. Déterminons la tension V_d du diaphragme lorsqu'il est déplacé d'une distance x . Lors d'un tel déplacement, les capacités C_a et C_b entre le diaphragme et les électrodes fixes ne sont plus égales. Par conséquent, même si le diaphragme n'était pas chargé, l'application d'un signal en tension produirait l'apparition d'une tension V_d sur celui-ci. Cette tension est évidemment égale dans ce premier cas à :

$$V_{d,1} = -\frac{1}{2} \frac{V_c x}{d} \quad (3)$$

Supposons maintenant que la tension d'entrée soit nulle $V_c = 0$, et que le diaphragme occupe sa position médiane d'équilibre sans avoir été préalablement chargé. Déplacer le diaphragme d'une distance x par rapport à cette position médiane a pour conséquence de faire varier sa capacité totale, ce qui entraîne que sa tension doit chuter afin de respecter la loi $Q = CV$. La capa-

cité d'un condensateur à plaques parallèles dont le diélectrique est constitué d'air est donnée par :

$$C = \epsilon_0 \frac{S}{l} \quad (4)$$

où l est la distance (en mètres) séparant les deux plaques. L'application de cette dernière équation à la situation illustrée sur la figure 2 nous permet d'obtenir :

$$C_{\text{totale}} = \epsilon_0 S \left(\frac{1}{d-x} + \frac{1}{d+x} \right) \quad (5)$$

En supposant que la charge du diaphragme soit Q , en tenant compte de $Q = CV$ et des équations (4) et (5), il vient :

$$V_{d,2} = \frac{Q(d^2 - x^2)}{2d\epsilon_0 S} \quad (6)$$

Comme le diaphragme est chargé par une tension de polarisation V_p lorsqu'il occupe sa position d'équilibre ($x = 0$), l'équation (6) peut s'écrire dans ce cas particulier en tenant compte de (5) :

$$Q = \frac{2\epsilon_0 S V_p}{d} \quad (7)$$

En remplaçant Q par son expression (7) dans l'équation précédente (6), nous obtenons :

$$V_{d,2} = V_p \left(1 - \left(\frac{x}{d} \right)^2 \right) \quad (8)$$

En pratique, ce sont les deux mécanismes précédents que nous avons à prendre en considération, et le diaphragme est soumis à une tension résultante de la somme des tensions trouvées en (3) et (8) qui s'écrit donc :

$$V_d = V_p \left(1 - \left(\frac{x}{d} \right)^2 \right) - \frac{1}{2} V_c \left(\frac{x}{d} \right) \quad (9)$$

La force électrique qui agit sur le diaphragme est obtenue en appliquant cette loi aux deux condensateurs C_a et C_b . L'expression de cette force est par conséquent :

$$F = \frac{1}{2} \epsilon_0 S \left[\frac{V_d + \frac{1}{2} V_c}{d-x} \right]^2 - \left[\frac{V_d - \frac{1}{2} V_c}{d+x} \right]^2 \quad (10)$$

Tous calculs faits, l'expression

précédente s'écrit de manière simplifiée :

$$F = \epsilon_0 S \left[\frac{2(V_p)^2 x}{d^3} + \frac{V_p V_c}{d^2} \right] \quad (11)$$

Cette dernière équation est fondamentale. Le premier terme est engendré par le déplacement x qui correspond à une compliance négative notée C_{me} , telle que :

$$C_{me} = -\frac{d^3}{2(V_p)^2 \epsilon_0 S} \quad (12)$$

Par conséquent, ce premier terme se comporte finalement comme l'un des éléments mécaniques caractéristiques du transducteur qui doit être, comme les autres éléments, soumis à une force dépendant linéairement du signal. Cette force est en fait représentée par le second terme de l'équation (11). La force électromotrice efficace s'écrit donc :

$$F_e = \frac{\epsilon_0 S V_p V_c}{d^2} \quad (13)$$

qu'il est plus pratique d'écrire, afin de mettre en évidence les coefficients de transduction, de la façon suivante :

$$\frac{F_e}{V_c} = \frac{\epsilon_0 S V_p}{d^2} \quad (14)$$

La force par unité de tension est donc le coefficient de transduction électromécanique que l'on note α et qui vaut :

$$\alpha = \frac{\epsilon_0 S V_p}{d^2} \quad (15)$$

L'autre coefficient, mécano-électrique cette fois, correspond finalement au courant généré par unité de vitesse du diaphragme (les bornes du HPES étant en court-circuit). Pour trouver ce coefficient, il faut nous souvenir que le rapport des charges q_1 et q_2 des deux condensateurs C_a et C_b est proportionnel à l'élongation x du diaphragme, donc au rapport $\frac{(d-x)}{(d+x)}$. Leur charge totale étant Q , il en résulte que les charges q_1 et q_2 sont égales à :

$$q_1 = \frac{Q(d-x)}{2d} \text{ et } q_2 = \frac{Q(d+x)}{2d} \quad (16)$$