

Transducteur électrostatique

par L. SELLIER,
Lycée Lakanal, 92330 Sceaux.

Dans le N° 637 du B.U.P., un lecteur posait la question du fonctionnement du microphone électrostatique. Comme dans le cas du transducteur électromagnétique, qui peut fonctionner soit en haut-parleur (forces de Laplace), soit en microphone (loi de Faraday), par le déplacement d'une bobine dans un champ magnétique indépendant du temps, un microphone électrostatique est aussi bien un haut-parleur, donc un *transducteur électrostatique*.

Ce transducteur est un condensateur plan à air dont l'une des armatures est rigide (fig. 1) et fixe, et l'autre est une mem-

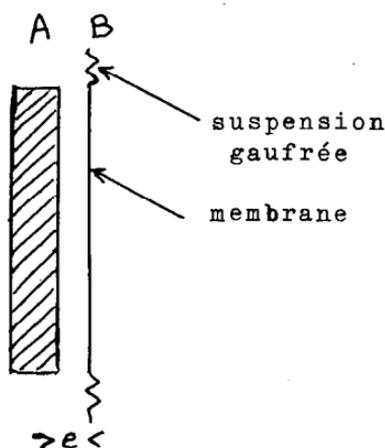


Fig. 1

brane légère et mobile (armature B) parallèle à la première. Ce condensateur fonctionne à charge constante : une variation de tension électrique provoque une variation de capacité donc de distance des armatures (fonctionnement en haut-parleur), une variation de distance donc de capacité provoque une variation de tension ou f.é.m. (microphone).

Nous traiterons d'abord le cas du haut-parleur, plus facile à comprendre, puis celui du microphone, et enfin nous parlerons du microphone électret, qui est très utilisé actuellement.

Pratiquement, l'armature fixe A fait partie du boîtier de l'appareil. L'armature B, de masse très faible m (moins de 1 g pour un microphone, beaucoup plus pour un haut-parleur de grandes dimensions) est fixée élastiquement au boîtier (constante de dureté k) et isolée électriquement de celui-ci. Le déplacement en translation « en piston » de cette membrane, de surface S , nécessite qu'elle soit rigide, ce qui n'est réalisé qu'approximativement, masse faible et grande rigidité étant peu compatibles, même en utilisant une membrane d'aluminium, de magnésium ou de béryllium. La fixation élastique est réalisée par un gaufrage annulaire à la périphérie de la membrane (circulaire en général), comme dans les transducteurs électromagnétiques. Une construction économique (cas de petits haut-parleurs) utilise une membrane déformable fixée sans gaufrage à la périphérie : on n'a pas alors un fonctionnement en piston, et la dureté de la suspension n'est pas constante, la fidélité de l'appareil laisse à désirer. Nous ne considérerons par la suite que les transducteurs de bonne construction.

HAUT-PARLEUR ELECTROSTATIQUE.

En appliquant une tension U entre les armatures d'un condensateur plan de surface S et d'épaisseur e , une force de module

$$F = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 S U^2}{e^2} \text{ s'exerce entre les armatures dans le vide (et}$$

pratiquement dans l'air) en négligeant les effets de bord. [Cette force se calcule de la façon la plus simple en considérant que son travail élémentaire au cours d'un déplacement égale la variation d'énergie du condensateur]. Cette force F a pour effet de rapprocher la membrane B de l'armature fixe A et son mouvement met en jeu une force de frottement visqueux (mise en mouvement de l'air).

En comptant la position de la membrane x par rapport à la position d'équilibre, et en notant \dot{x} et \ddot{x} les dérivées de x par rapport au temps, on peut appliquer à la membrane la relation fondamentale de la dynamique (f est le coefficient de frottement visqueux) :

$$m\ddot{x} = \underbrace{-kx}_{\text{(force de rappel de la suspension)}} - \underbrace{f\dot{x}}_{\text{(force de frottement)}} + \underbrace{\frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 S U^2}{e^2}}_{\text{(force électrostatique)}}$$

soit encore $m\ddot{x} + f\dot{x} + kx = F$, équation différentielle du second ordre à coefficients constants dont le second membre est imposé par l'utilisateur. Sans cette force F , la membrane exécute un mouvement dit « libre » qui s'amortit plus ou moins rapidement. Cette force F , qui dépend de la tension U appliquée, impose un mouve-

ment dit « forcé » qui est seul à exister lorsque le mouvement libre est devenu négligeable (nous verrons dans quelles conditions).

Le second membre de l'équation contient encore x sous la forme $e = e_0 + x$, e_0 étant l'épaisseur du condensateur à l'équilibre. Si $x \ll e_0$, on peut faire le développement de $1/e^2$ limité au premier ordre (première approximation) : $1/e^2 = \frac{1}{e_0^2} \left(1 - \frac{2x}{e_0} \right)$.

Dans un premier temps, négligeons même cette variation de e dans le second membre. Si la tension U est sinusoïdale (ce qui est fréquent en acoustique), de pulsation ω , soit $U = U_1 \cos \omega t$, on aura :

$$U^2 = U_1^2 \cos^2 \omega t = \frac{U_1^2}{2} (1 + \sin^2 \omega t),$$

donc la force F est à fréquence double de celle de U , donc la membrane oscille à fréquence double : une tension de fréquence 440 Hz (La_3) va faire osciller la membrane, donc donner un son de fréquence 880 Hz (La_4), ce qui n'est pas satisfaisant pour la reproduction sonore.

Tension de polarisation.

Par contre, si U_0 est une tension très supérieure à U_1 et constante, appelée tension de polarisation, la force F est proportionnelle à $(U_0 + U)^2$ [si ces deux tensions sont appliquées simultanément (fig. 2)], quantité qui peut s'écrire $U_0^2 \left(1 + \frac{2U}{U_0} \right)$ en

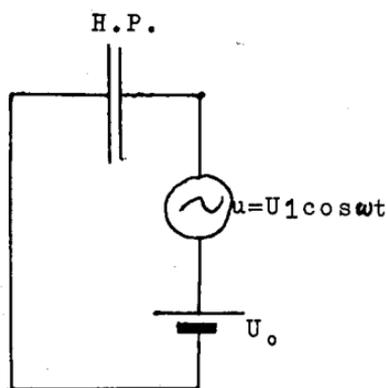


Fig. 2

effectuant un développement limité au premier ordre (seconde approximation). La force F comprend ainsi un terme constant en

U_0^2 qui a pour effet de modifier l'épaisseur d'équilibre e_0 du condensateur et un terme en $2 U_0 U_1 \cos \omega t$ qui « commande » l'oscillation de la membrane, avec deux avantages : la membrane oscille à la même fréquence que la tension U , et à bien plus grande amplitude que précédemment, puisque $U_0 \gg U_1$. C'est ainsi que le haut-parleur peut reproduire le son aussi fidèlement que le permettent les approximations faites.

Avant de montrer la nécessité d'une tension de polarisation, nous avons négligé la variation de e dans le second membre. Si maintenant nous en tenons compte, cela revient à écrire pour ce facteur de la force :

$$\begin{aligned} \frac{U^2}{e^2} &= \frac{U_0^2}{e_0^2} \left(1 + \frac{2 U_1 \cos \omega t}{U_0} \right) \left(1 - \frac{2x}{e_0} \right) \dots \\ &\dots = \frac{U_0^2}{e_0^2} \left(1 + \frac{2 U_1 \cos \omega t}{U_0} - \frac{2x}{e_0} \right) \end{aligned}$$

en limitant à nouveau le développement au premier ordre (troisième approximation). Le terme en x peut alors être transféré au premier membre, ce qui modifie un peu la constante de dureté de la membrane. L'équation différentielle devient alors :

$$m\ddot{x} + f\dot{x} + \left(k + \frac{\epsilon_0 S U_0^2}{e_0^3} \right) x - \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 S U_0^2}{e_0^2} = \frac{\epsilon_0 S U_0 U_1 \cos \omega t}{e_0^2}.$$

A noter que le terme $f\dot{x}$ de frottement visqueux correspond à la force nécessaire pour déplacer l'air, c'est-à-dire le faire vibrer et ainsi produire des ondes sonores. Si f peut être considéré comme une constante vis-à-vis de la tension U_1 , par contre f dépend de la fréquence et intervient dans l'expression de l'impédance acoustique de l'air qui véhicule ces ondes sonores.

Courbe de réponse du haut-parleur.

Le mouvement libre de la membrane peut être soit apériodique, soit pseudo-périodique. Dans les deux cas, pour une même tension de polarisation U_0 et pour une même valeur maximale U_1 de la tension appliquée $U = U_1 \cos \omega t$, la réponse :

$$x = A \cos(\omega t + \varphi)$$

du système dépend de la fréquence (ou de la pulsation ω). La courbe donnant A fonction de ω est la courbe de réponse en amplitude (fig. 3). Si le mouvement libre est pseudo-périodique, il existe un maximum d'amplitude, d'autant plus accentué que

l'amortissement (coefficient $\frac{f}{m}$) est faible. Si le haut-parleur

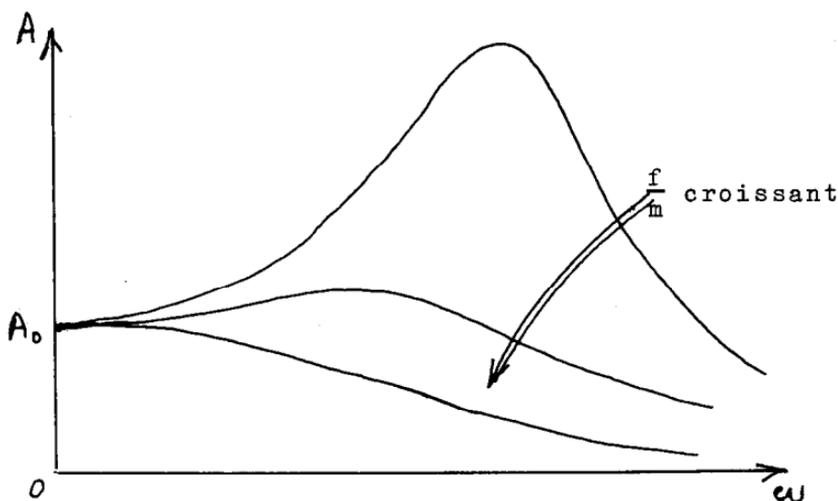


Fig. 3

doit fonctionner dans une bande de fréquence étendue, il faudra qu'il soit suffisamment amorti (courbes inférieures), et l'on peut modifier l'amortissement par des moyens électriques aussi bien que mécaniques. Remarquons qu'une large bande est obtenue au détriment d'une amplitude moyenne plus faible. Il faudra, le plus souvent, choisir un compromis. Nous avons fait aussi des approximations, elles ne seront valables que si l'amplitude maximale $A_{max} \ll e_0$ afin que la *distorsion* non linéaire reste acceptable, c'est-à-dire que les fréquences harmoniques de la fréquence imposée soient inaudibles.

Régime transitoire.

La membrane étant au repos, lorsqu'on commence à appliquer une tension U sinusoïdale, la membrane commence à se mouvoir, mais elle n'atteindra une amplitude constante qu'au bout d'un certain temps, lorsque le mouvement libre (qui se superpose au mouvement forcé sinusoïdal) sera devenu négligeable par rapport à ce dernier. Ce régime transitoire sera le plus court possible, donc la membrane réagira avec le moins de retard lorsque l'amortissement du système aura sa valeur *critique*, ce qui correspond aussi, fort heureusement à une bande passante de fréquences assez large. Les remarques sur la bande passante et sur le régime transitoire sont valables pour tout oscillateur harmonique mécanique ou électrique, c'est-à-dire décrit par une équation différentielle du second ordre à coefficients constants (fig. 4).

Fonctionnement à charge constante ?

C'était l'hypothèse de départ, qui permettait de donner une expression de la force F uniquement fonction de la tension U .

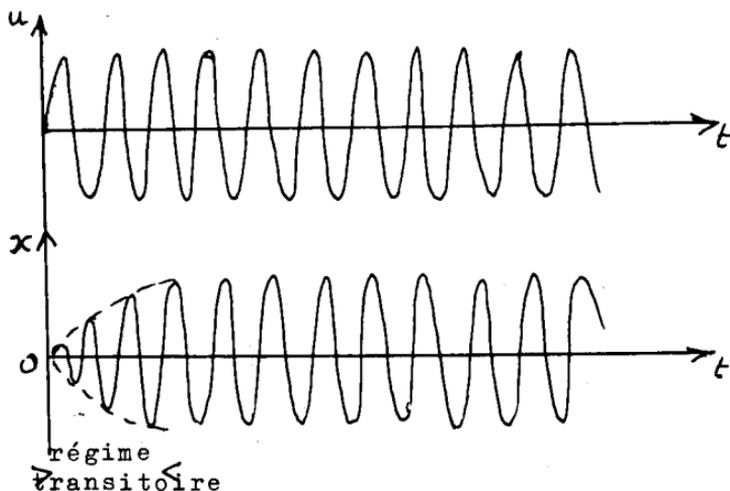


Fig. 4

Charge constante suppose ou bien un condensateur isolé électriquement de tout circuit dans lequel la tension varie, ou bien alimenté par une source de tension de résistance (ou impédance) intérieure infinie. Il faut une source de tension pour imposer une variation de U , mais elle ne peut être physiquement de résistance infinie : une résistance très grande est seule possible, qui permette une variation de charge très faible par rapport à la charge existant en présence de la seule polarisation U_0 . C'est la quatrième approximation que nous faisons ici. Prenons un exemple numérique. Un haut-parleur de capacité 100 pF est polarisé par une tension de 100 volts, sa charge moyenne est donc 10^{-8} coulombs. Si elle ne doit pas varier de plus de 1 %, cela signifie que l'intensité du courant de décharge $i = -dq/dt$ ne doit pas, en une période, modifier la charge de plus de 10^{-10} coulombs ; à la fréquence de 1 kHz, l'intensité du courant est donc limitée à 10^{-7} A. En supposant que toute la puissance électrique fournie au haut-parleur soit utilisée pour faire vibrer l'air, elle reste inférieure au produit des valeurs efficaces de l'intensité (limitée volontairement à 10^{-7} A) et de la tension U_1 (qui ne doit pas dépasser 1 V, afin que $U_1 \ll U_0$), c'est-à-dire de l'ordre de $0,1 \mu\text{W}$. On est alors en dessous du seuil d'audibilité, et même en faisant ces deux approximations à 10 % (au lieu de 1 %), on n'arrive encore qu'à $10 \mu\text{W}$!

Puisque des haut-parleurs électrostatiques sont effectivement utilisés, ils délivrent (donc absorbent) des puissances bien supérieures. A cause de la distorsion, on ne peut augmenter U_1 , sinon en augmentant aussi U_0 , mais ce n'est pas très commode. Il faut donc en conclure que l'appareil ne fonctionne pas à charge

constante ; mais alors l'équation différentielle qui le régit n'est plus aussi simple. En effet, il faudra alors deux équations différentielles couplées, l'une essentiellement mécanique, l'autre plutôt électrique. La résolution du système sera plus laborieuse mais conduira encore à des solutions forcées sinusoïdales à la même fréquence que la tension U . On ne retrouvera plus les courbes de réponse « à une bosse » de la fig. 3, mais des courbes de réponse « à deux bosses » (ou sans bosse du tout, bien entendu).

MICROPHONE ELECTROSTATIQUE.

Onde sonore.

Rappelons qu'une onde sonore sinusoïdale peut être définie soit par la pression acoustique, grandeur qui se superpose à la pression moyenne du gaz dans lequel l'onde se propage (pression atmosphérique, dans le cas de l'air libre), soit par la vitesse ou vitesse de déplacement d'un ensemble de molécules autour d'un point donné. On écrit ainsi :

$$p_a = p_1 \cos \omega \left(t - \frac{x}{c} \right) \quad \text{ou} \quad v_a = v_1 \cos \omega \left(t - \frac{x}{c} \right)$$

pour une onde plane de pulsation ω se propageant à la vitesse de phase c (célérité) suivant l'axe des x . Les grandeurs p_a et v_a ne sont pas nécessairement en phase, leur quotient est l'impédance acoustique de l'onde et leur produit est la puissance de l'onde par unité de surface.

Microphone.

De même qu'un système qui capte l'énergie d'un vent constant peut être sensible (donc mieux décrit) à la pression (voile d'un bateau, tube de Pitot) ou à la vitesse (anémomètre, éolienne), un microphone peut être microphone de pression (dans ce cas, seule, une face de sa membrane est soumise à l'onde sonore, et comme la pression en un point n'a pas de direction, un tel microphone est omnidirectionnel) ou microphone de vitesse (les deux faces de sa membrane sont concernées, la direction de l'onde perpendiculaire à la membrane est privilégiée, le microphone est directif, ou bi-directionnel ; par une construction convenable, on peut le rendre uni-directionnel, on l'appelle souvent alors cardioïde à cause de la forme de son diagramme d'efficacité). Le microphone électrostatique, comme le microphone électrodynamique, peut être soit de pression, soit de vitesse ; parfois, une commutation électrique ou mécanique permet de modifier cette caractéristique ou son diagramme d'efficacité.

Dans tous les cas, au point où se trouve la membrane, la pression acoustique ou la vitesse de l'onde donne lieu à un déplacement de la membrane, sinusoïdal si l'onde est sinusoïdale et

d'amplitude suffisamment faible pour rester dans le domaine des approximations. On a alors $x = x_1 \cos \omega t$ en choisissant convenablement l'origine des phases. L'amplitude x_1 est proportionnelle à p_1 ou à v_1 mais elle dépend aussi de la fréquence de l'onde, car la membrane est un oscillateur mécanique, avec sa masse m , la constante de dureté k de sa suspension, etc.

Microphone condensateur est l'autre dénomination du microphone électrostatique. Le principe et la construction sont ceux de tout transducteur électrostatique (fig. 1), la membrane a une surface S inférieure à 1 cm^2 . Si le condensateur n'est pas chargé, le déplacement de la membrane sous l'effet de l'onde sonore ne produit aucun changement dans l'état électrique du condensateur. Si le condensateur est chargé et isolé, la modification de capacité, due au déplacement de la membrane, se traduit par une modification de la tension entre les armatures, qui doit représenter le passage de l'onde sonore au niveau de la membrane.

En pratique, le condensateur reste chargé grâce à un générateur de tension auxiliaire de quelques volts (pile, ou tension fournie par l'amplificateur), à travers une très grande résistance R (fig. 5 a) afin qu'au cours du fonctionnement, la charge varie aussi peu que possible, ce qui est le cas si $RC \gg T$, période de la fréquence la plus basse à reproduire. (Pour la période $T_0 = RC$, la perte est de 3 dB et dans ces conditions, on ne fonctionne plus à charge constante.) C'est aux bornes de la résistance R que l'on récupère la tension variable u pour l'appliquer à l'entrée d'un amplificateur à très grande résistance d'entrée. On peut utiliser le schéma de la fig. 5 b, avec un transistor à effet de champ à l'entrée de l'amplificateur.

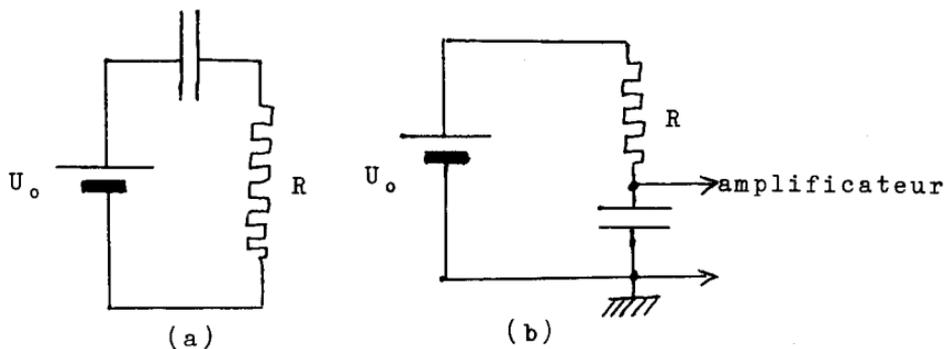


Fig. 5

f.é.m. induite par la pression acoustique.

Considérons un microphone « à pression » soumis à :

$$p_a = p_1 \cos \omega t.$$

L'équation différentielle mécanique a le même premier membre que celle concernant le haut-parleur. Le second membre comporte la force de pression acoustique et la force d'attraction entre les armatures. On a donc :

$$m\ddot{x} + f\dot{x} + kx = p_a S + \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 S U^2}{e^2}.$$

Le terme d'amortissement est purement mécanique si la résistance R est infinie. C'est l'approximation que nous ferons. Dans le cas d'une résistance R finie, f dépendrait de R et constituerait un terme de couplage avec l'équation différentielle électrique.

Le déplacement x de la membrane est beaucoup plus faible dans le cas du microphone que dans celui du haut-parleur, on peut donc, avec une excellente approximation, considérer e comme constant *dans cette équation mécanique*. Par ailleurs $U = U_0 + u$, somme de la tension de polarisation (quelques volts) et de la tension variable ou f.é.m. du microphone u ; cette dernière ne dépasse pas quelques dizaines de microvolts dans des cas exceptionnels, donc on peut considérer, avec une excellente approximation que U est constant *dans cette équation mécanique*. Donc la force électrostatique peut être considérée comme constante et, seule alors, la force de pression $p_a S$ commande les oscillations forcées de la membrane, qui sera de la forme : $x = A \cos(\omega t + \varphi)$ après un changement d'origine dû à la force électrostatique constante.

Avec l'hypothèse R infinie, l'équation électrique, qui exprime la charge (constante) du condensateur est $Q = C U$, avec $C = \frac{\epsilon_0 S}{e}$.

Avec $e = e_0 + x$ et $C_0 = \frac{\epsilon_0 S}{e_0}$, un développement limité au pre-

mier ordre donne $C = C_0 \left(1 - \frac{x}{e_0} \right)$. Comme :

$$U = U_0 + u = U_0 \left(1 + \frac{u}{U_0} \right),$$

on déduit de la constance du produit $-\frac{x}{e_0} + \frac{u}{U_0} = 0$, d'où, compte tenu de l'expression de x (réponse mécanique du système à la pression acoustique) :

$$u = \frac{U_0}{e_0} A \cos(\omega t + \varphi).$$

La f.é.m. du microphone est donc sinusoidale, de même fréquence que l'onde sonore ; son amplitude dépend, par A , de celle de la pression acoustique (courbe de réponse analogue à celle de la fig. 3 si R est infinie, ou courbe à deux bosses de la fig. 6 si R est finie). [On pourra, pour un calcul complet, se reporter au problème donné en 1981 au concours d'entrée à l'I.N.S. de Chimie de Rouen.]

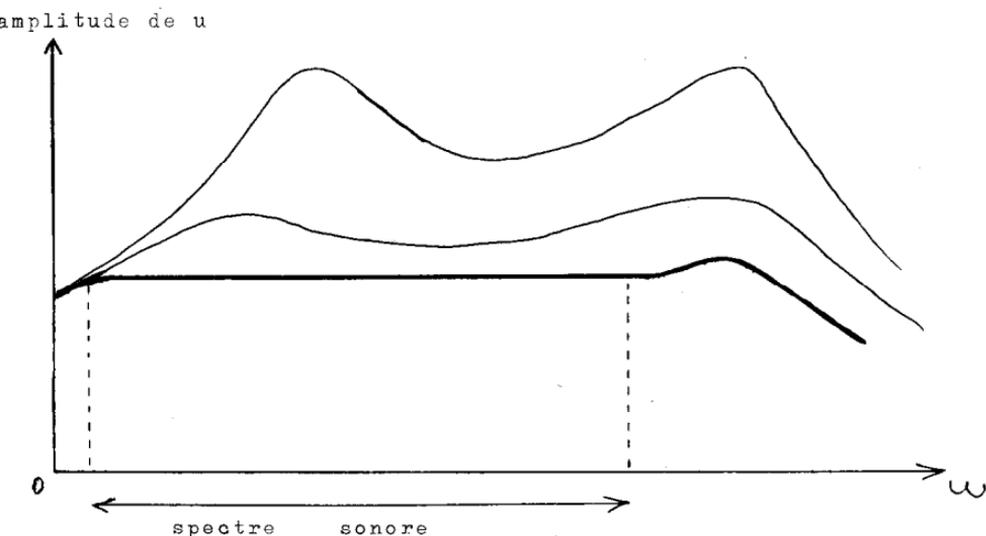


Fig. 6

Qualités du microphone électrostatique.

Par un choix convenable de la masse de la membrane (on peut la réduire encore par une forme en calotte sphérique, plus rigide donc plus mince) et de la dureté de sa suspension, on peut repousser la seconde bosse au-delà du spectre sonore audible. Par un choix convenable des amortissements mécanique et électrique, on peut pratiquement effacer la première bosse et ainsi avoir une courbe de réponse utile rectiligne. De ce fait, l'appareil peut servir à mesurer des pressions acoustiques.

On aurait pu considérer aussi le microphone de vélocité : le second membre de l'équation différentielle aurait été différent mais les conclusions de l'étude sensiblement les mêmes.

Le microphone dynamique ne peut fonctionner aussi bien aux fréquences élevées à cause de la masse de sa bobine mobile ; il en est de même du microphone piézo-électrique, qui nécessite une force plus importante donc une membrane de surface (et de masse) assez grande. Ne parlons pas du microphone à grenaille de charbon du téléphone, qui n'est pas fidèle car ses variations de

résistance ne sont pas reproductibles. Seul, le microphone à ruban pourrait rivaliser avec le microphone électrostatique à cause de la légèreté du ruban, mais il présente deux inconvénients : il est uniquement microphone de vélocité et des distorsions importantes apparaissent dès que l'amplitude de l'onde sonore devient un peu forte.

MICROPHONE ELECTRET.

La tension de polarisation U_0 nécessaire au microphone électrostatique est une contrainte qui ne peut être acceptée que pour des appareils de hautes performances.

Si l'on veut réaliser un microphone de bonne qualité, peu volumineux, peu coûteux, robuste, on ne peut s'adresser à aucun des types déjà cités. Mais on peut penser que certains microphones utilisent un champ (magnétique) permanent qui met à profit l'hystérésis ferromagnétique.

On connaissait depuis longtemps (*) les propriétés *ferro-électriques* de certains diélectriques, en particulier l'existence d'une polarisation rémanente P_r . Certains d'entre eux, comme le titanate de baryum (par ailleurs électriquement anisotrope) ont un cycle d'hystérésis presque rectangulaire (fig. 7) et une polarisation rémanente importante. Ce qui a donné l'idée à des ingénieurs, il y a une dizaine d'années, d'utiliser de tels matériaux dans la fabrication de microphones électrostatiques à polarisation permanente. Une pastille mince d'un tel diélectrique, obtenue par frittage, est soumise à un champ électrique intense : il

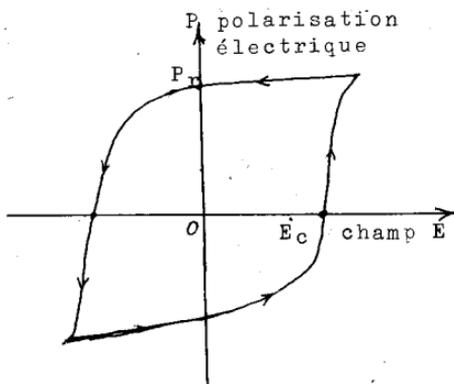


Fig. 7

(*) C'est en 1921 que VALASEK découvre la ferro-électricité du « sel de Seignette » (tartrate double d'ammonium et de potassium), déjà connu comme piézo-électrique. Il possède cette propriété entre -18°C et $+24^{\circ}\text{C}$ seulement. Le titanate de baryum BaTiO_3 est ferro-électrique jusqu'à 120°C (température de Curie) et peut garder une polarisation de $0,25 \text{ C/m}^2$. D'autres sels et oxydes (et même HCl et HBr solides) sont ferro-électriques dans certains domaines de températures.

demeure une polarisation rémanente P_r , qui transforme la pastille en électret (fig. 8). Cette polarisation résulte d'une déforma-

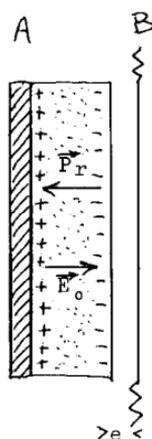


Fig. 8

tion du réseau cristallin, pour laquelle les barycentres des ions positifs et des ions négatifs ne sont plus confondus. L'électret, placé entre les deux armatures d'un condensateur plan crée un

champ permanente $\vec{E}_0 = -\frac{\vec{P}_r}{\epsilon_0}$, qui est le même que celui qui

serait dû à une tension électrique de polarisation U_0 . On laisse une lame d'air afin de permettre le déplacement de la membrane B, mais c'est aussi pour éviter le fonctionnement en microphone piézo-électrique (car le matériau est souvent, aussi, piézo-électrique), qui serait de qualité fort différente.

On a ainsi un appareil simple, robuste, peu coûteux, peu encombrant, donc de rapport qualité/prix qui dépasse largement ses concurrents ; ce qui explique son succès, en particulier pour équiper les magnétophones portatifs « à micro électret incorporé », les appareils de prothèse auditive, etc. Sur certains de ces magnétophones, existe une prise de microphone extérieur, qui permet de mettre hors circuit l'électret et de supprimer ainsi son inconvénient essentiel : cet électret, parce qu'il est incorporé, « entend » les bruits du moteur et du déroulement du ruban magnétique, ce qui le rend impropre à un enregistrement de haute qualité sonore.

Au point de vue électrique, c'est fréquemment un transistor à effet de champ ou un circuit intégré linéaire à très grande résistance d'entrée qui est utilisé comme premier étage de l'amplificateur.