

HAUT-PARLEURS

ET ENCEINTES ACOUSTIQUES

II.1 Aspects théoriques Généralités

Les haut-parleurs sont des transducteurs chargés de transformer l'énergie électrique en énergie acoustique. En réalité, il s'agit d'une triple transformation qui fait toujours intervenir une conversion mécano-acoustique, le haut-parleur ionique ou à plasma faisant toutefois exception, puisque fonctionnant sans l'intermédiaire d'aucune partie vibrante.

Le rôle de conversion électromécanique est assuré par un dispositif appelé communément moteur, fonctionnant suivant l'un des huit principes illustrés par la figure 1.

Pour assurer un rendement élevé à la conversion mécano-acoustique, tout en améliorant la linéarité de fréquence et d'amplitude des dispositifs rayonnants, il est indispensable d'adjoindre des écrans ou des enceintes acoustiques appelés parfois diffuseurs ou charges acoustiques, dont le rôle fondamental est de séparer le rayonnement avant du rayonnement arrière en éliminant ce dernier, au moins dans la bande de fréquence à restituer. On évite ainsi l'effet de doublet qui conduit à un véritable court-circuit acoustique aux fréquences correspondant à plus d'une demi-longueur d'onde de l'onde acoustique dans l'air.

En pratique, il s'avère difficile de dissocier l'ensemble constitué du haut-parleur et sa charge acoustique — pour un écouteur, la charge acoustique est représentée par le dispositif de couplage avec l'oreille — les caractéristiques de l'enceinte acoustique jouant un rôle prépondérant aux

basses fréquences, avec une influence non négligeable sur la directivité aux fréquences élevées.

Pour la clarté de l'exposé, les transducteurs et les enceintes acoustiques seront étudiés séparément, car les performances d'un reproducteur acoustique destiné à une restitution musicale dépendent au premier degré de la qualité des haut-parleurs utilisés. L'accent sera toutefois mis sur l'intérêt de certaines formules d'association haut-parleur-charge acoustiques, pouvant conduire à un optimum sur un ensemble de paramètres jugés prioritaires. A cet égard, les pavillons seront considérés comme jouant le

rôle de charge acoustique ; ils seront étudiés au chapitre des enceintes acoustiques.

Si dans l'esprit du grand public, les critères subjectifs tels que tonalité, étendue de la restitution, dynamique... etc., prennent le pas sur les critères purement objectifs, il n'en reste pas moins vrai que pour les modèles à usage professionnel, et notamment pour les télécommunications, il faut bien revenir à une définition plus objective de la qualité d'un haut-parleur à l'aide des paramètres dont disposent les constructeurs. Cela passe non seulement par des spécifications élaborées à partir de

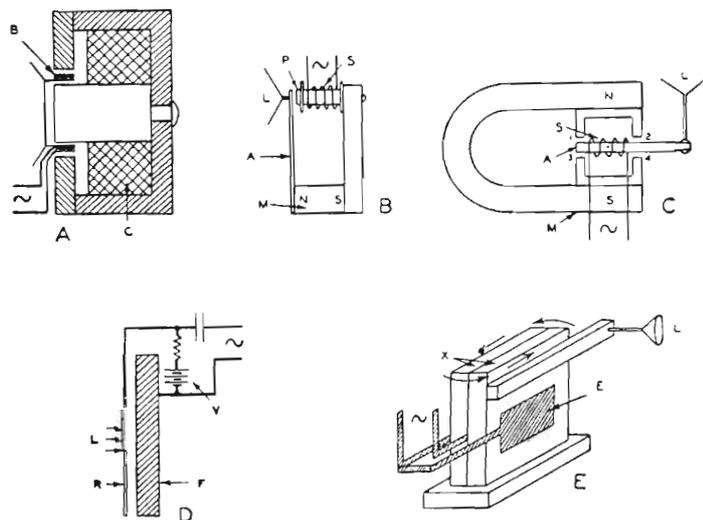


Fig. 1. — Systèmes moteurs pour haut-parleurs (d'après Olson et G.A. Briggs).

- A : électrodynamique, bobine mobile
- B : électromagnétique, palette mobile
- C : électromagnétique, palette équilibrée
- D : électrostatique à simple effet
- E : piézo-électrique

- A : palette ; B : bobine mobile ; C : bobine d'excitation ; E : électrode ; F : armature fixe ; L : charge ; M : aimant ; P : pôle ; R : armature mobile ; S : bobine ; V : tension de polarisation ; X : cristal.

mesures physiques, mais aussi par des modélisations permettant de ramener les systèmes mécaniques à des schémas électriques équivalents. Il devient alors plus aisé, pour des électroacousticiens, d'établir certaines propriétés fondamentales concernant, par exemple, la bande passante, la réponse transitoire, l'impédance d'adaptation, l'encombrement de l'écran ou le volume de l'enceinte acoustique. Le recours de plus en plus systématique par les concepteurs de haut-parleurs aux équivalents électriques nous a incités à rappeler d'abord au lecteur la méthode utilisée et ses principales applications, pour en discuter ensuite les limites liées essentiellement à des phénomènes de non-linéarité. Si les caractéristiques ainsi obtenues sont jugées aujourd'hui nécessaires pour qualifier un haut-parleur, elles paraissent néanmoins parfaitement insuffisantes pour juger dans l'absolu. Toutefois, en acceptant l'idée qu'un haut-parleur est un système mécanique régi par des équations linéaires et pouvant être décrit par un schéma électrique équivalent, on simplifie énormément l'approche des problèmes de conception.

Dans le chapitre qui suit, on a

choisi d'appliquer une des analogies classiquement déduites de la théorie dynamique de Maxwell, celle qui est décrite dans le tableau n°1. Selon ces conventions, on fait correspondre aux équations différentielles de la mécanique classique reliant force et vitesse de déplacement, les équations classiques en électricité reliant force électromotrice et courant (1) (voir fig.2).

On peut dès lors appliquer les lois de Kirchoff à tout système considéré comme combinaison d'éléments mécaniques ou électriques. Notons que ces équivalences sont purement formelles, car elles n'impliquent en aucun cas d'analogies physiques réelles.

II.2 Caractérisation et modélisation

On peut concevoir plusieurs mécanismes de transformation mécanoacoustique en faisant appel à un élément électrique et à un ou plusieurs éléments mécaniques couplés. De tels dispositifs peuvent presque toujours être représentés par des schémas déduits par analogie des systèmes mé-

caniques, comme l'indique la figure 3. Il ne s'agit en général que de modèles simplifiés, ne reflétant pas la totalité des phénomènes mis en jeu au cours de la transformation électromécanique.

L'adoption, pour l'établissement de tels modèles, d'hypothèses simplificatrices impliquant, par exemple :

- le fonctionnement du dispositif vibrant sur un seul mode (fonctionnement en piston) ;
 - l'absence de non-linéarité d'amplitude (petits déplacements) ;
 - l'absence de modes vibratoires parasites affectant les parties fixes du transducteur ;
 - l'absence de réactions acoustiques dues à l'environnement (couplage mécanique ou acoustique) ;
- permet de prévoir seulement dans des bandes relativement étroites la réponse réelle du haut-parleur, avec un degré d'approximation relativement faible.

Parmi les paramètres utiles à une modélisation dans ces conditions simplifiées, on peut citer :

- l'inductance et la résistance de la bobine mobile ;
- le coefficient de surtension du circuit électrique en court-circuit et en circuit ouvert ;
- la fréquence de résonance du système vibrant ;
- l'élasticité (ou compliance) de la suspension (c'est l'inverse de la raideur) ;
- l'intensité du champ magnétique dans l'entrefer qui conditionne la sensibilité du moteur et l'amortissement de l'équipage mobile ;
- le flux d'induction total ;
- la surface utile du piston équivalent au diaphragme.

En assimilant le haut-parleur électrodynamique classique à un piston rigide, avec séparation totale entre l'onde arrière et l'onde avant, ce qui est habituellement réalisé par les écrans de dimensions grandes par rapport à la longueur d'onde (baffle infini), on obtient un rayonnement acoustique qui ne dépend que des ca-

(1) Une autre analogie ferait correspondre masse et capacité d'une part, élasticité et inductance d'autre part, par transformation duale classiquement utilisée en électricité.

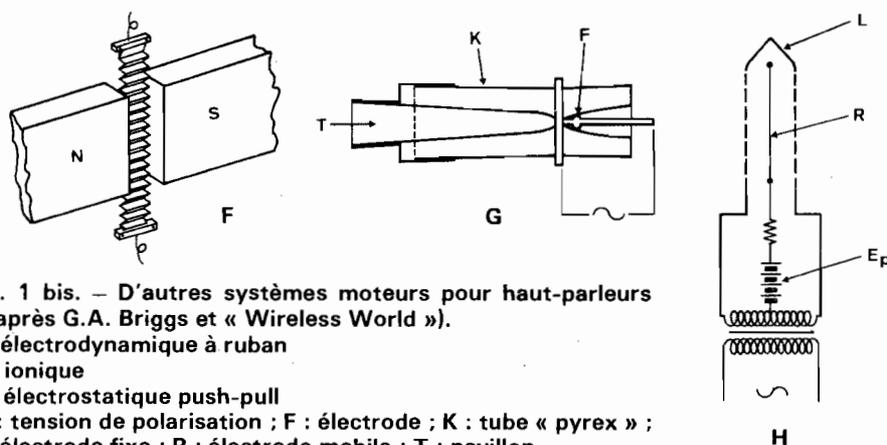


Fig. 1 bis. - D'autres systèmes moteurs pour haut-parleurs (d'après G.A. Briggs et « Wireless World »).

F : électrodynamique à ruban
G : ionique
H : électrostatique push-pull
Ep : tension de polarisation ; F : électrode ; K : tube « pyrex » ;
L : électrode fixe ; R : électrode mobile ; T : pavillon.

Tableau 1

Elément mécanique	Unité usuelle	Elément électrique	Unité usuelle	Symbole
Masse	kg	Inductance	(H) Henry	
Elasticité ou compliance	m/ newton	Capacité	(F) Farad	
Résistance mécanique	ohm mécan.	Résistance	(Ω) Ohm	

ractéristiques propres du transformateur électromécanique équivalent au haut-parleur. Il est en effet de peu d'intérêt de bâtir une théorie exhaustive d'un haut-parleur nu, dont on ne peut attendre que des performances médiocres en basse fréquence.

Dans les conditions précitées et en s'appuyant sur les analogies d'Olson et de Beranek et à l'aide de la représentation graphique du cercle de Kennelly [1] [2], les théories les plus récentes aboutissent à une présentation unifiée initialement due à Thiele [3], puis reprise par Small [4] où le modèle acoustique de la figure 3 se réduit à un système passe-haut du 2° ordre, avec (fig. 4) :

$$\text{Force motrice} = \frac{e_g B l}{(R_e + R_g) S} \quad (1)$$

(par unité de surface)

– e_g = force électromotrice de la source d'attaque.

– B = induction magnétique dans l'entrefer.

– l = longueur du conducteur mobile dans l'entrefer.

– R_e = résistance de la bobine mobile.

– R_g = résistance interne de source.

– S = surface de piston équivalent.

En explicitant :

– i est le débit volumique du haut-parleur (produit de la vitesse de déplacement de la membrane par sa surface).

– R_{AT} représente la résistance acoustique totale rassemblant tous les termes réels de frottement et de rayonnement acoustique auxquels s'ajoute la perte de puissance mécanique due à la force contre-électromotrice. Soit, en négligeant le terme de rayonnement, toujours faible parce que lié au rendement :

$$R_{AT} = R_m + \frac{(Bl)^2}{(R_e + R_g) S^2} \quad (2)$$

– R_m = résistance acoustique due au frottement de la suspension.

– M_{AS} représente l'inertie due à la masse mécanique de la membrane (ramenée à une surface unitaire), à laquelle s'ajoute la masse d'air déplacée par le piston et qu'on néglige toujours ainsi que l'inductance propre de la bobine, soit finalement :

$$M_{AS} = \frac{L_m}{S^2} \quad (3)$$

– L_m = masse de l'équipage mobile.

– C_{AS} représente les forces de rappel de la suspension, telles que :

$$C_{AS} = C_m \cdot S^2 \quad (4)$$

– C_m = élasticité de la suspension.

On est dès lors capable d'écrire la fonction de transfert :

$$T(p) = i/e_g$$

soit, avec les notations habituelles ($p = j\omega$) :

$$T(p) = \frac{Bl}{p(R_e + R_g)S \cdot M_{AS}} \frac{1}{1 + p \cdot R_{AT} \cdot C_{AS} + p^2 \cdot M_{AS} \cdot C_{AS}} \quad (5)$$

On y reconnaît une fonction de filtrage passe-haut dont la réponse normée est :

$$G(p) = \frac{p^2 T^2}{1 + pT/Q_T + p^2 T^2} \quad (6)$$

avec :

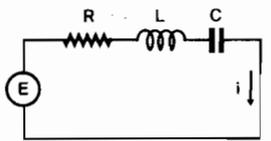
$$Q_T = \frac{1}{R_{AT} C_{AS} \omega_R} \quad (\omega_R = 2 \pi f_R) \quad (7)$$

$$\text{et : } T^2 = M_{AS} \cdot C_{AS} \quad (8)$$

(f_R = fréquence de résonance).

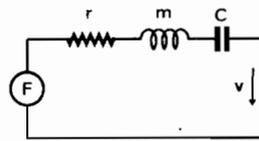
Une fois fixée la fréquence de coupure du système (nous y reviendrons), le seul paramètre d'optimisation est Q_T . La théorie classique des filtres donne alors le choix entre :

- une réponse méplate (dite Butterworth) avec $Q_T = 0,7$;
- une réponse à amortissement critique avec $Q_T = 0,5$;
- une réponse de type Chebyshev avec Q_T compris entre 0,7 et 1 (une valeur supérieure conduit à un désamortissement préjudiciable aux régimes transitoires).



Réseau électrique équivalent

$$E = L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int i dt$$



Système mécanique

$$F = m \frac{dv}{dt} + rv + \frac{1}{C} \int v dt$$

Fig. 2. – Analogie utilisée pour représenter les éléments mécaniques d'un système. F : force appliquée ; v : vitesse de déplacement ; m : masse ; r : résistance de frottement ; C : compliance (ou élasticité).

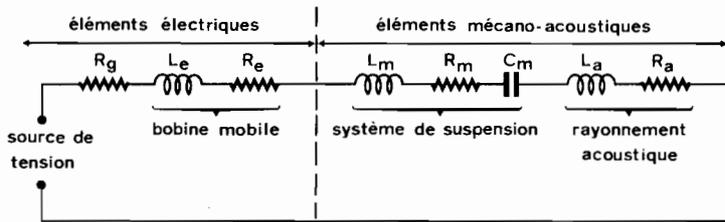


Fig. 3. – Modèle analogique approché d'un haut-parleur électrodynamique. R_g : résistance interne de la source ; R_e : résistance de la bobine ; L_e : inductance de la bobine ; L_m : masse de l'équipage ; C_m : élasticité de la suspension ; R_m : résistance de pertes par frottement ; L_a : réactance de rayonnement ; R_a : résistance de rayonnement.

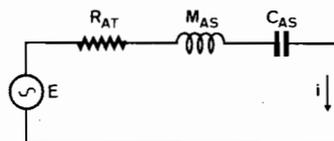


Fig. 4. – Modèle analogique d'un haut-parleur assimilé à un piston monté sur écran infini avec :

$$E = \frac{e_g \cdot B \cdot l}{(R_e + R_g) S} ; R_{AT} = R_m + \frac{(Bl)^2}{(R_e + R_g) S^2} ; M_{AS} = \frac{L_m}{S^2} \text{ et } C = C_m S^2$$

(1) Le lecteur trouvera en annexe un rappel des principales fonctions de transfert permettant de répondre aux problèmes d'approximation usuels dans la théorie des quadripôles linéaires.

**Annexe :
fonctions
d'approximation**

La théorie moderne des approximations appliquées à des réseaux électriques pour en optimiser le comportement en amplitude, ou/et en phase, fournit des modèles mathématiques qui en simplifient la synthèse :

– en ramenant les structures passe-bande et passe-haut (cas des dispositifs électroacoustiques étudiés dans l'ouvrage) à une structure passe-bas prototype ;

– en indiquant des formules explicites qui font correspondre des valeurs des éléments du prototype à une fonction d'approximation donnée.

Partant de l'expression d'une fonction d'atténuation réductible à une forme polynômiale (1)

$$H(p) = b_0 + b_1p + b_2p^2 + \dots + b_{n-1}p^{n-1} + b_n p^n \quad (1)$$

(avec p = variable complexe de la fréquence = $j\omega$), cette théorie fournit les valeurs des coefficients b_0, b_1, \dots, b_n , pour différentes approximations.

Les fonctions d'atténuation répondent aux formulations :

Butterworth (méplat)

$$A(\omega) = 10 \log_{10} (1 + \Omega^{2n}); \Omega = \omega/\omega_c$$

A en dB

Chebyshev

$$A(\omega) = 10 \log_{10} \{1 + [\epsilon T_n \Omega]^2\}$$

avec :

$$\epsilon = \sqrt{10^{0,1A_{max}} - 1}$$

T_n = polynôme de Chebyshev

A_{max} = oscillation théorique (en dB).

L'expression du polynôme de Bessel représente l'approximation de e^p (retard pur).

Les tableaux qui suivent donnent les coefficients de $H(p)$ pour ces trois types d'approximation à choisir en fonction des critères suivants :

1. La pente d'atténuation (ou l'efficacité du filtrage) croît dans l'ordre : Bessel, Butterworth, Chebyshev.

2. La distorsion de phase (ou de

(1) C'est le cas des quadripôles à comportement monotone en fréquence, sans pôle d'atténuation infinie (structures en échelle ne comportant ni circuits bouchons, ni circuits résonnant en série, ni couplage par mutuelle).

Butterworth

n	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₅	b ₆	B ₇
1	1,00000							
2	1,00000	1,41421						
3	1,00000	2,00000	2,00000					
4	1,00000	2,61313	3,41421	2,61313				
5	1,00000	3,23607	5,23607	5,23607	3,23607			
6	1,00000	3,86370	7,46410	9,14162	7,46410	3,86370		
7	1,00000	4,49396	10,09783	14,59179	14,59179	10,09783	4,49396	
8	1,00000	5,12583	13,13707	21,84615	25,68836	21,84615	13,13707	5,12583

Chebyshev 0,1 dB

n	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₅	b ₆	b ₇
1	6,55222							
2	3,31329	2,37209						
3	1,63809	2,62953	1,93883					
4	0,82851	2,02550	2,62680	1,80377				
5	0,40951	1,43556	2,39696	2,77071	1,74396			
6	0,20713	0,90176	2,04784	2,77908	2,96575	1,71217		
7	0,10238	0,56179	1,48293	2,70514	3,16925	3,18350	1,69322	
8	0,05179	0,32645	1,06667	2,15932	3,41855	3,56485	3,41297	1,68104

Chebyshev 0,5 dB

n	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₅	b ₆	b ₇
1	2,86278							
2	1,51620	1,42562						
3	0,71569	1,53490	1,25291					
4	0,37905	1,02546	1,71687	1,19739				
5	0,17892	0,75252	1,30957	1,93737	1,17249			
6	0,09476	0,43237	1,17186	1,58976	2,17184	1,15918		
7	0,04473	0,28207	0,75565	1,64790	1,86941	2,41265	1,15122	
8	0,02369	0,15254	0,57356	1,14859	2,18402	2,14922	2,65675	1,14608

Chebyshev 1 dB

n	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₅	b ₆	b ₇
1	1,96523							
2	1,10251	1,09773						
3	0,49131	1,23841	0,98834					
4	0,27563	0,74262	1,45392	0,95281				
5	0,12283	0,58053	0,97440	1,68882	0,93682			
6	0,06891	0,30708	0,93935	1,20214	1,93083	0,92825		
7	0,03071	0,21367	0,54862	1,35754	1,42879	2,17608	0,92312	
8	0,01723	0,10734	0,44783	0,84682	1,83690	1,65516	2,42303	0,91981

Chebyshev 2 dB

n	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₅	b ₆	b ₇
1	1,30756							
2	0,82302	0,80382						
3	0,32689	1,02219	0,73782					
4	0,20577	0,51680	1,25648	0,71622				
5	0,08172	0,45935	0,69348	1,49954	0,70646			
6	0,05144	0,21027	0,77146	0,86701	1,74586	0,70123		
7	0,02042	0,16609	0,38251	1,14444	1,03922	1,99353	0,69789	
8	0,01286	0,07294	0,35870	0,59822	1,57958	1,21171	2,24225	0,69606

temps de propagation de groupe) décroît dans le même ordre.

La transformation de la structure passe-bas prototype en structure passe-haut conforme à la représentation analogique d'un haut-parleur ou d'une enceinte acoustique s'opère en remplaçant p par 1/p dans l'expression (1), soit :

$$G(p) = \frac{p^n}{b_0 + b_1p + b_2p^2 + \dots + b_np^n} \quad (2)$$

(à suivre)
P. LOYEZ

Chebyshev 3 dB

n	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₅	b ₆	b ₇
1	1,00238							
2	0,70795	0,64490						
3	0,25059	0,92835	0,59724					
4	0,17699	0,40477	1,16912	0,58158				
5	0,06264	0,40794	0,54886	1,41498	0,57443			
6	0,04425	0,16343	0,69910	0,69061	1,66285	0,57070		
7	0,01566	0,14615	0,30002	1,05184	0,83144	1,91155	0,56842	
8	0,01106	0,05648	0,32076	0,47190	1,46670	0,97195	2,16071	0,56695

Bessel

n	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₅
1	1					
2	3	3				
3	15	15	6			
4	105	105	45	10		
5	945	945	420	105	15	
6	10,395	10,395	4,725	1,260	210	21

Bibliographie

[1] F. JOB : « Oscillations électriques et applications acoustiques et mécaniques ». 1^{re} partie. § III (Ecole nationale supérieure des télécommunications).

[2] R. LEHMANN : « Les transducteurs électro et mécano-acoustiques ». Collection Technique et Scientifique du CNET. Editions Chiron (1963).
[3] N. THIELE : « Loudspeakers in

vented boxes ». J.A.E.S. Vol. 19, p. 382-392 (May 1971).
[4] R.H. SMALL : « Direct radiator loudspeaker system analysis ». J.A.E.S. Vol. 20, p. 383-395 (June 1972).

Bloc-notes

L'ADAPTATEUR VIDEO-MATCH PVP 80

Le mariage des signaux, c'est la spécialisation de C.G.V., qui innove en lançant sur le marché un produit, la PVP 80, permettant pour la première fois l'adaptation de la sortie vidéo PAL des jeux vidéo et micro-ordinateurs et l'entrée péritélévision de tous les téléviseurs Secam (normes RVB, Synchro, Son).

Résoudre les problèmes d'incompatibilité d'humeur entre les standards, c'est la fonction de la PVP 80. Grâce à cette interface C.G.V., il est désormais possible de connecter les appareils en sortie vidéo PAL sur le téléviseur familial ou secondaire. La PVP 80 fonctionne notamment avec la gamme des Commodore (VIC 20-64), tous les modèles Atari, Sharp, Apple II, et avec tous les produits présents et à venir en sortie vidéo PAL.

L'alimentation est livrée



avec ce modèle (12 V 300 mA), et il faut noter la longueur de trois mètres, permettant un champ d'action

très large à l'utilisateur : on peut déplacer son micro-ordinateur sans problème avec un poste TV fixe.

Pour les téléviseurs démunis de prise péritélévision, il suffit de brancher conjointement avec la PVP 80 n'importe quel modèle de la gamme des interfaces PHS 60, et l'on obtient les signaux UHF Secam sans nuire à la qualité de l'image.

L'usage des micro-ordinateurs est ainsi étendu non seulement en France mais aussi à l'étranger avec le modèle PHS 60 Export (Afrique, Antilles, Europe, Moyen-Orient, pays de l'Est).

L'interface C.G.V.-PVP 80 est vendue au prix de 600 F TTC environ (alimentation 12 V fournie).

De conception et de fabrication françaises, produites par la Compagnie générale de Vidéo-technique C.G.V. (protégées par brevets), les interfaces PHS 60 et PVP 80 sont distribuées, sur le plan régional, par Vidéo-Match Strasbourg.