

8. ENCEINTES ACOUSTIQUES

extrait

« La nature pour être commandée doit être obéie. »

Francis Bacon

8.1 Autour du haut-parleur de grave

ENCORE LA MÉCANIQUE...

Le terme de transducteur est utilisé ici pour rappeler que le haut-parleur est avant tout chargé de transformer de l'énergie, de réaliser le passage de l'énergie électrique en énergie mécanique. En effet, l'onde sonore n'est rien d'autre qu'un flux d'énergie mécanique se propageant dans le milieu ambiant, l'air. La pression acoustique se propage par déformation élastique du milieu, c'est-à-dire par déplacement des "molécules", oscillant autour de leur position d'équilibre. L'intensité sonore est tout simplement le produit de la pression acoustique par la vitesse des particules, cette dernière étant liée à la pression car l'impédance de l'air est à peu près constante.

Cette pression est transmise au milieu par déplacement d'une surface vibrante. Quelle que soit la forme de cette surface, quel que soit le principe permettant de créer ce mouvement vibratoire, l'obtention d'une pression acoustique suffisante demande, à cause de la faible "résistance" de l'air, à la fois une force élevée et une étendue de la surface vibrante importante.

Comme dans toute transduction, la grandeur fondamentale, celle dont l'importance est non seulement capitale, mais conditionne toutes les autres caractéristiques, est le **rendement** énergétique. Ce rendement exprime l'efficacité avec laquelle la transformation d'énergie est effectuée. Dans la plupart des appareils effectuant une transformation d'énergie, le rendement se situe dans une fourchette allant de 80 % parfois même un peu plus, pour un moteur électrique par exemple, à 25 ou 30 %, pour un moteur thermique, ce qui est déjà moins flatteur puisque dans ce cas la plus grande partie de l'énergie, 70 à 75 %, est perdue en chaleur qu'il faut évacuer !

Le haut-parleur traditionnel a un rendement compris entre 0,05 et 0,5 % pour une écrasante majorité. Ce n'est ni une plaisanterie, ni une faute d'impression. Plus de 99 % de l'énergie électrique envoyée par

l'amplificateur au moteur du haut-parleur est transformée en chaleur. Exprimer la puissance d'une chaîne Hi-Fi en watts électriques, en sortie de l'ampli, est donc parfaitement inutile, à moins que vous ne l'utilisiez comme chauffage d'appoint...

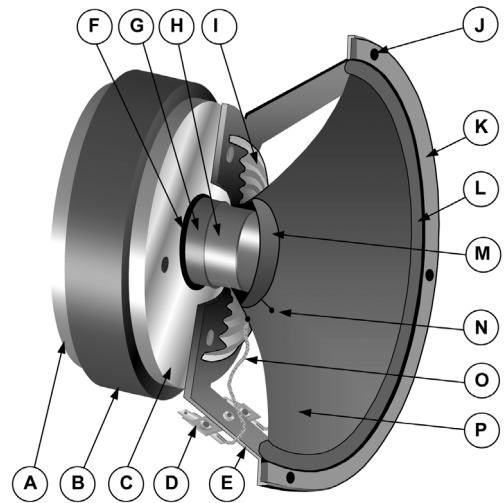
Les haut-parleurs professionnels ont un rendement compris entre 1 et 10 % environ et sont qualifiés de "haut rendement" ce qui est encore un peu optimiste. Seuls quelques haut-parleurs rarissimes, utilisant des pavillons de grandes dimensions, parviennent à une efficacité correcte de l'ordre de 20 à 50 %, tels les pavillons repliés conçus par Western Electric pour le cinéma, dans les années 30, et qui se contentaient des 2 W produits par les tout premiers amplificateurs à lampes, pour sonoriser une salle de plusieurs milliers de places !

Considérer d'autres grandeurs, telles la fréquence de coupure ou la linéarité de la bande passante, alors que ces mesures concernent une part d'énergie ridiculement faible, me paraît absolument inutile ! Au lieu de chercher à savoir ce que donnent ces malheureux 0,5 % d'énergie transformée, il me semble infiniment plus utile de chercher à récupérer les 99,5 % perdus. Une fois qu'il seront retrouvés, transformés en énergie acoustique, il sera temps de se questionner sur la manière de les rendre harmonieux et "linéaires" !

Ce que je souhaite faire émerger à la conscience du lecteur, c'est qu'un énorme travail d'optimisation est effectué par les constructeurs dans le but d'améliorer les **qualités** attribuées à cette très faible part d'énergie transmise, alors que c'est la **quantité** qui est notoirement insuffisante. Une seule comparaison me vient à l'esprit : c'est un peu comme si on essayait d'améliorer la souplesse et la régularité de fonctionnement d'un moteur de scooter pour lui faire déplacer une berline de 1 500 kg. Il y a disproportion évidente, et l'équation n'a pas de solution réelle sans changement du paramètre essentiel. Ce moteur fonctionnera très bien, silencieusement et économiquement... au ralenti !

Figure 117 - Le dessin ci-contre en coupe partielle montre la constitution d'un haut-parleur de grave classique :

- A** : plaque de champ arrière, comportant un noyau non visible ici, venant à l'intérieur de la bobine mobile.
B : aimant en couronne, généralement en ferrite, collé aux plaques de champ.
C : plaque de champ avant, alésée.
D : plaquette à bornes.
E : saladier ou châssis, en tôle emboutie ou alliage léger moulé, serti ou vissé sur la plaque de champ avant.
F : entrefer entre plaque de champ avant et noyau.
G : bobine mobile, coulissant avec jeu dans l'entrefer.
H : support de bobine, tube de papier, fibre de verre ou synthétique.
I : suspension intérieure ou spider en tissu gaufré.
J : trou de fixation.
K : joint périphérique.
L : suspension externe en tissu enduit ou néoprène, PVC.
M : cache-noyau ou dôme anti-poussière en papier, tissu, carbone etc.



- N** : collage des fils de bobine.
O : tresse de raccordement.
P : membrane en papier pressé, ou fibres de verre, de carbone, ou synthétique.

Reproduire un orchestre symphonique dans votre salon avec deux haut-parleurs de 17 cm relève de la même disproportion. Ce n'est pas une question de volume de la pièce ni de niveau sonore, mais une question de rapidité de réponse, indispensable à la vivacité du trait musical, à la transparence de l'espace.

Une deuxième grandeur, intimement liée à l'efficacité de la transformation d'énergie, est très limitée pour la plupart des haut-parleurs courants. Il s'agit de la **puissance mécanique maximale** de sortie, dont la valeur est si basse qu'aucun constructeur n'ose la divulguer, d'autant qu'elle est encore plus limitée aux basses fréquences.

Il est vrai que les puissances acoustiques des sources habituelles sont faibles, voire très faibles, généralement inférieures au dixième de watt ! Un piano de concert parvient à rayonner environ 0,5 W et un orchestre philharmonique au grand complet développe rarement plus de quelques watts...

Un haut-parleur de 13 à 17 cm, taille considérée comme normale à l'heure actuelle, rayonne péniblement 25 mW, peut-être 50 pour les meilleurs. Cette puissance maximale produit, lors des crêtes du signal, un niveau sonore de l'ordre de 95 dB à 1 m. Même avec une dynamique réduite à 40 dB, ce qui est peu mais réaliste avec les prises de son actuelles, cela correspond à un niveau moyen de l'ordre de 75 dB à 1 m, donc environ 66 dB à 3 m, ce qui est notoirement insuffisant pour parler de réalisme, sauf peut-être pour la musique de chambre.

Une écoute à niveau normal demande environ 15 dB de plus, ce qui ne semble pas énorme. Pourtant cela correspond à une puissance rayonnée 32 fois supérieure, ce qui impose soit une amplitude de vibration de la membrane presque 6 fois plus forte, ce qui est techniquement irréalisable, soit un diamètre de haut-parleur près de 3 fois plus grand. La miniaturisation des enceintes constitue par conséquent une barrière infranchissable vers la recherche de réalisme sonore, en imposant un niveau crête et une dynamique apparente correspondant à peu près à celles obtenues lors de l'écoute de l'événement réel à une distance 3 à 4 fois trop grande. Quel mélomane considère que la meilleure place est au fond de la salle ?

Quelques formules simples permettent de fixer des ordres de grandeur, afin d'illustrer ces propos. Le dessin figure 117 rappelle la constitution d'un haut-parleur traditionnel. La plus grande part de la puissance rayonnée, souvent 75 à 80 %, est émise par le haut-parleur de grave, qui mérite donc une attention particulière. Le lecteur se reportera à la bibliographie (P. Loyez) pour retrouver la description des parties constitutives ainsi que toutes les définitions des grandeurs caractéristiques et des paramètres fondamentaux.

Sans rentrer dans les détails, rappelons qu'un haut-parleur traditionnel est muni d'une membrane vibrante de diamètre D , de surface $S_d = \pi \cdot D^2 / 4$ et de masse M_m comprenant l'ensemble de l'équipage mobile, c'est-à-

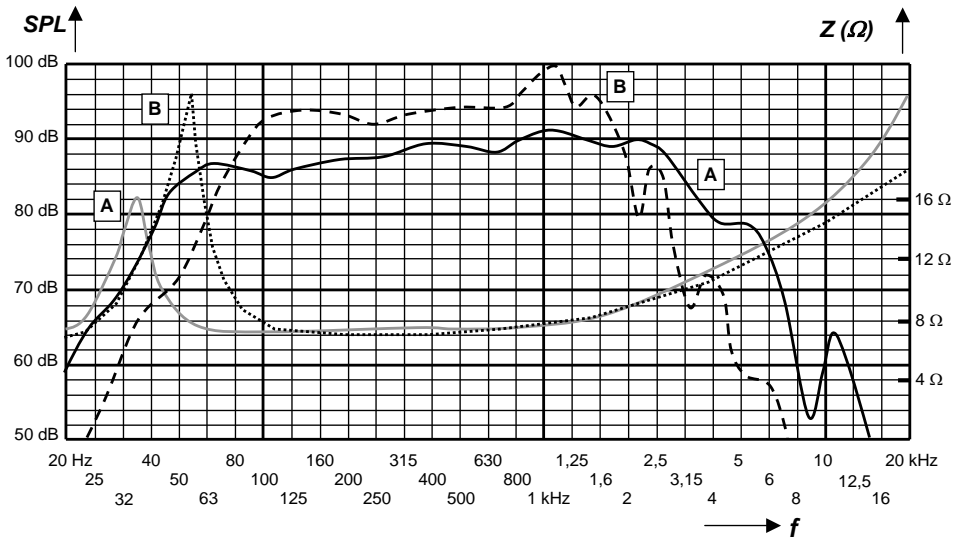


Figure 118 - Réponses fréquentielles de deux H-P de 21 cm.

dire membrane et ses suspensions, bobine mobile et son support, cache-noyau, ainsi que la masse de l'air déplacé. C'est la partie mécanique du transducteur.

Ce transducteur rayonne l'énergie mécanique de sortie dans un milieu, l'air ambiant, dont la masse volumique est $\rho_0 = 1,3 \text{ g / dm}^3$ et dans lequel la célérité des ondes est $C = 344 \text{ m/s}$, dans les conditions normales.

Son moteur électrique est constitué d'un aimant en couronne, et d'un circuit magnétique fait de deux plaques de champ et d'un noyau central. Un entrefer est aménagé dans ce circuit, où il règne une induction magnétique B . La bobine mobile de résistance électrique R_e plonge dans cet entrefer, une longueur L de fil étant soumise au champ magnétique.

Le rendement énergétique est :

$$\eta_0 = (\rho_0 / 2\pi \cdot C) \cdot (B^2 \cdot L^2 / R_e) \cdot [1 / (M_m / S_d)^2]$$

La présentation de cette formule fait volontairement apparaître trois termes :

- Un terme lié au **milieu** : $\rho_0/2\pi C$, sur lequel aucune intervention n'est envisageable. Le progrès ne peut réduire la longueur d'onde !
- Un terme **électrique** : $B^2 L^2 / R_e$ lié aux caractéristiques du moteur magnétique.
- Un terme **mécanique** : $1/(M_m/S_d)^2$ qui correspond à une masse surfacique au carré, au dénominateur.

Le rendement est donc proportionnel au carré de la force magnétique du moteur. L'induction magnétique B intervient au carré, ainsi que la longueur L de fil sou-

mis au champ, ce qui justifie le choix d'un gros aimant pour augmenter B , associé à un entrefer étroit, et d'une bobine de grand diamètre pour augmenter L , ainsi que de plaques de champ épaisses pour qu'un plus grand nombre de spires baignent dans le flux magnétique. La résistance électrique R_e de la bobine doit être minimale, sans atteindre un seuil dangereux pour l'amplificateur.

Ce rendement est inversement proportionnel au carré de la masse surfacique de la membrane, d'où l'intérêt d'une grande membrane légère, devant toutefois rester rigide et résistante.

Habituellement réalisée en pâte à papier, la membrane a été depuis longtemps l'objet de toutes les attentions de la part des constructeurs. C'est en effet la partie visible du haut-parleur, celle qui attire le regard de l'éventuel acheteur, et qui doit par conséquent devenir le support des arguments de vente, autant que la vitrine du savoir-faire et des capacités de recherche du fabricant.

Un éventail de matériaux légers et rigides est employé aujourd'hui, chacun présentant avantages et inconvénients sans qu'aucun d'eux ne se démarque de manière définitive. L'objectif prioritaire du fabricant étant d'obtenir un fonctionnement en piston, sans déformation non contrôlée de la membrane, sur une bande passante la plus large possible, ceci afin de faciliter le filtrage et d'obtenir un raccordement correct dans le cas d'une enceinte deux voies. La tendance actuelle obéit par conséquent à plusieurs critères :

- Matériau de membrane présentant un amortissement interne élevé afin d'éviter un pic de réponse aux fréquences élevées. Les matériaux synthétiques répondent à ce critère, qu'ils soient armés de fibres ou non, utilisés seuls ou en enduit sur un support papier.
- Membrane moyennement lourde pour assurer une fréquence de résonance basse, en conjonction avec une suspension très souple, en caoutchouc ou en mousse, afin d'obtenir une extension de la réponse vers les fréquences basses.
- Membrane suffisamment épaisse pour assurer une rigidité correcte, permettant un fonctionnement en piston sur toute la plage de fréquence, sans fractionnement des modes vibratoires.

Comme dans tout problème vibratoire, on retrouve les termes de masse, de rigidité et d'amortissement. Les fabrications actuelles en fibre de verre, de carbone, de Kevlar, associées à des résines, ou en matériau synthétiques tels que bextrène, polypropylène, acrylique (Aérogel) répondent à ces critères. Elles permettent la réalisation de haut-parleurs dont la réponse fréquentielle est très large et linéaire... à faible niveau sonore. Par contre, la fabrication de membranes très légères, donc plus minces, est beaucoup plus difficile à cause des inévitables dispersions de fabrication se traduisant par des épaisseurs non constantes, des hétérogénéités de structure, et au final des performances difficilement prévisibles et reproductibles en série, ainsi qu'une mauvaise résistance mécanique. La bande passante d'un haut-parleur à membrane légère étant moins large, tant vers les basses fréquences à cause d'une résonance placée plus haut, que vers les fréquences élevées à cause d'un manque de rigidité et d'amortissement, l'utilisation de ce type de membrane se fait de plus en plus rare dans les productions actuelles.

Malheureusement c'est le rendement du haut-parleur qui est le grand perdant de cette évolution. Les graphiques figure 118, comparent les réponses en fréquence, courbes du haut, et les impédances, courbes du bas, de deux haut-parleurs de même diamètre, équipés du même moteur magnétique, l'un avec membrane synthétique épaisse et rigide repéré A, en trait plein, l'autre avec membrane papier, légère et moins amortie, repéré B en trait pointillé.

Le haut-parleur à membrane synthétique est utilisable en grave-médium et permet aisément la réalisation d'une enceinte deux voies. Sa réponse utile s'étend depuis 50 Hz jusqu'à 2,5 kHz environ avec une sensibilité moyenne de l'ordre de 88 dB/1 W à 1 m, exprimée selon la norme pour une tension de 2,83 V, soit une puissance électrique de 1 W sur 8 Ω , et mesurée à une distance de 1 m, le haut-parleur installé sur un baffle plan normalisé.

Ce haut-parleur demandera une puissance moyenne de 0,15 W environ pour obtenir un niveau sonore moyen de 80 dB à 1 m, soit 0,6 W pour ce même niveau à 2 m, distance d'écoute minimale, et jusqu'à 200 W en crête pour un niveau transitoire de 105 dB sur les attaques de percussions très brèves.

Le haut-parleur à membrane légère descend moins bien aux basses fréquences, et couvre pratiquement une octave de moins avec une coupure basse située vers 100 Hz. Le manque de rigidité de sa membrane produit des vibrations fractionnées (déformations, ondulations de la membrane, qui ne fonctionnent plus en piston) responsables d'un pic de niveau vers 1 kHz, et de nombreuses irrégularités au-dessus de cette fréquence. Sa bande passante utile est limitée à 800 Hz environ, fréquence maximale pour un filtrage simple. Seul un réseau compensateur associé au filtre autorise son utilisation jusqu'à 1,6 kHz environ.

En revanche son rendement est de 6 à 8 dB supérieur, avec une valeur moyenne de 94 dB/1 W à 1 m, et il demandera par conséquent une puissance électrique 4 à 6 fois plus faible, ce qui est sans conséquence sur le niveau moyen mais décisif pour reproduire les crêtes, où il se contentera de moins de 50 W.

Le réalisme de la reproduction sonore, en particulier les sensations de présence des sources sonores, de matière sonore sur les impacts, d'énergie du mouvement, de vivacité du trait musical, sont étroitement liées au respect des attaques de notes, produisant des crêtes de niveau sonore, aussi brèves qu'intenses. Le tableau figure 119, permet de comparer les efficacités de deux haut-parleurs, l'un à bas rendement, de 0,2 % correspondant à une sensibilité de 85 dB/1 W à 1 m, de diamètre 13 cm et couramment rencontré dans les mini-enceintes actuelles, et l'autre à très haut rendement, de 6 % soit une sensibilité de 100 dB/1 W à 1 m, de diamètre 38 cm, utilisé en sonorisation professionnelle. En se fixant un niveau crête de 105 dB, la comparaison est déjà éloquente, mais pour être vraiment réaliste, en particulier sur les percussions ou les instruments puissants tels que le piano, enregistrés à proximité, c'est un niveau de 110 dB crête à 1 m qu'il convient de viser. Un tel niveau de crête correspond à un niveau d'écoute réaliste assez élevé, de l'ordre de 75 à 85 dB selon la dynamique de l'enregistrement, inférieur toutefois aux limites dangereuses pour l'oreille. C'est l'écoute à fort niveau moyen imposée par une dynamique réduite qui est dangereuse. Plus la dynamique est élevée, plus le niveau moyen est faible, à niveau de crête identique ! À 105 dB en crête, les limites d'un petit haut-parleur sont depuis très longtemps dépassées...

Figure 119 - La reproduction réaliste des attaques de note demande des niveaux de crêtes très élevés, bien que le niveau moyen reste modéré. Par exemple, l'écoute au niveau moyen de 80 dB, ce qui est réaliste, implique si la prise de son présente une dynamique plutôt réduite de 40 dB, des niveaux crêtes de 105 dB environ à 1 m du haut-parleur. La distance habituelle d'écoute est de l'ordre de 2,50 m, ce qui correspond à une perte de 6 à 8 dB selon la réverbération de la salle, soit moins de 100 dB en crête. Si l'enregistrement respecte la dynamique originale, ce sont des crêtes de 110 dB à 1 m qu'il sera nécessaire de reproduire. Un petit haut-parleur sature avant d'atteindre 100 dB, ce qui apparaît dans les cases gris clair, et est détruit bien avant 110 dB en quelques fractions de secondes, cases gris moyen, ou instantanément cases gris foncé ! Le fait de doubler la puissance électrique augmente le niveau sonore de 3 dB, le doublement de la distance d'écoute le fait chuter de 6 dB en champ libre.

	Puissance électrique nécessaire	
	Diamètre 13 cm	Diamètre 38 cm
Niveau crête dB SPL	85 dB/1 W à 1 m	100 dB/1 W à 1 m
85 dB	1 W	0,032 W
88 dB	2 W	0,063 W
91 dB	4 W	0,125 W
94 dB	8 W	0,25 W
97 dB	16 W	0,5 W
100 dB	32 W	1 W
103 dB	64 W	2 W
106 dB	128 W	4 W
109 dB	256 W	8 W
112 dB	512 W	16 W

Il est tout à fait illusoire d'espérer compenser le faible rendement en appliquant une puissance électrique énorme. Tout d'abord parce que le petit haut-parleur ne peut être équipé d'une bobine de grand diamètre capable de dissiper toute la puissance électrique, un maximum de 50 à 70 W pour un diamètre de bobine de 25 à 30 mm correspond au petit haut-parleur de 13 cm. Ensuite parce que la sensibilité diminue lorsque la puissance électrique augmente, autant à cause de l'échauffement de la bobine qui fait augmenter sa résistance, et par conséquent chuter le rendement, que par augmentation des pertes mécaniques dans les suspensions lorsque l'amplitude des déplacements augmente.

Enfin, aux fréquences basses, le niveau sonore maximal dépend de l'amplitude maximale des déplacements de la membrane, qui dépasse rarement 4 mm de part et d'autre de la position de repos, avant que la bobine mobile ne sorte en partie du champ magnétique dans l'entrefer.

La transduction électrique-mécanique n'est donc pas linéaire par rapport à la puissance électrique appliquée, comme le montrent les courbes de la figure 120. Ces courbes sont édifiantes à plus d'un titre, à tel point qu'elles ne sont pratiquement jamais publiées par les constructeurs. Celles que je présente ici ont été établies à la fréquence de 200 Hz sur quelques haut-parleurs à ma disposition, représentatifs de la production actuelle. La première constatation est que quel que soit le haut-parleur considéré, il existe une limite à l'efficacité de la transduction, au-delà de laquelle le fait d'augmenter la puissance électrique appliquée en entrée ne provoque plus d'augmentation de la puissance acoustique en sortie.

Cette limite se situe vers 60 W environ pour le petit haut-parleur diamètre 13 cm déjà présenté plus haut, qui ne peut rayonner qu'un peu moins de 0,1 W. Le niveau maximal qu'il peut produire est par conséquent limité à un peu plus de 100 dB à 1 m. C'est pourtant un excellent modèle dont l'élongation maximale est de 8 mm et capable de descendre vers 50 Hz. La puissance maximale qu'il peut supporter en continu étant de 40 W (donnée constructeur) il ne peut fonctionner en limite de saturation que de manière passagère. La plupart de ses homologues de même diamètre rayonnent seulement 25 à 50 mW...

Un modèle de plus grand diamètre également de très haute qualité, de 17 cm et de rendement nettement plus élevé, avec une sensibilité de 91 dB/1 W à 1 m présente des limitations du même type bien qu'un peu plus éloignées. Il sature vers 50 W bien qu'il soit capable d'en supporter 60, et peut rayonner environ 0,3 W, ce qui est acceptable. Remarquons au passage qu'un plus grand haut-parleur ne supporte pas forcément une plus grande puissance d'entrée.

C'est en comparant ces haut-parleurs à faible rendement avec leurs concurrents à rendement élevé, supérieur à 1 % que l'on peut constater une énorme différence dans les valeurs de puissance acoustique rayonnée, avec environ 1 W pour le haut-parleur de 30 cm, et plus de 3 W pour le 38 cm professionnel. La linéarité de la transformation est également supérieure, avec une courbe qui commence à s'incurver dès 15 W pour le 13 cm, soit 35 mW acoustiques, vers 20 W pour le 17 cm, soit 130 mW acoustiques, et seulement vers 40 W pour les 30 et 38 cm, soit respectivement 0,6 W et plus de 2 W acoustiques.

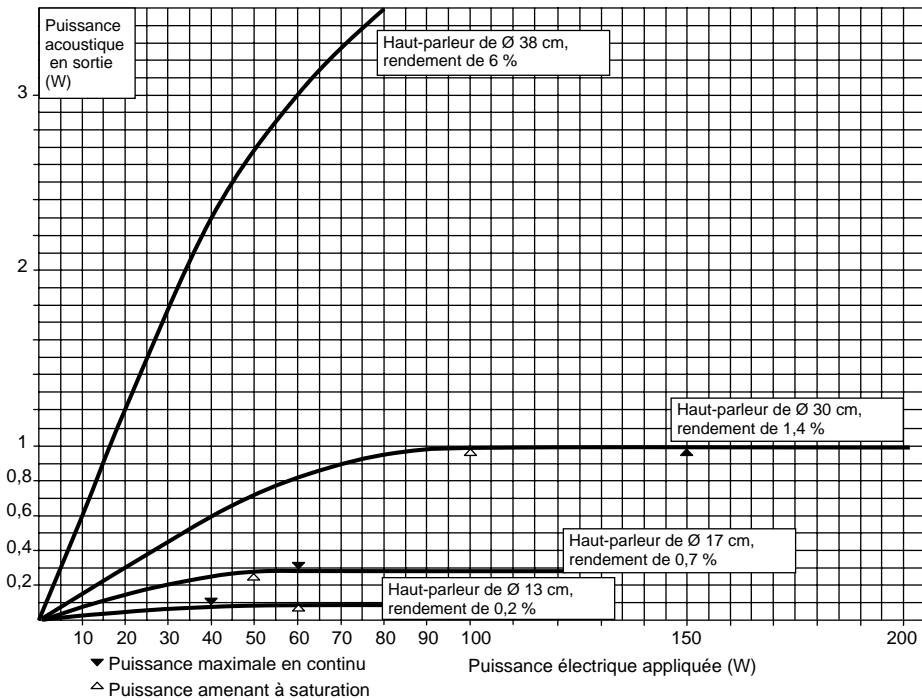


Figure 120 - Courbes de transfert de puissance de différents H-P.

Une conclusion peut immédiatement être tirée de l'examen de ces courbes : pour obtenir un transfert d'énergie linéaire jusqu'à une puissance acoustique maximale de l'ordre de 0,5 W, un diamètre minimal de haut-parleur de 30 cm est requis. Il pourra produire un niveau acoustique de crête d'un peu moins de 108 dB à 1 m, soit 100 à 102 dB à la distance normale d'écoute. C'est tout juste suffisant pour parler de réalisme.

Un tel haut-parleur a une sensibilité comprise typiquement entre 92 et 98 dB/1 W à 1 m, soit un rendement compris entre 1 % et 4 %, et il demandera par conséquent des puissances électriques de 50 W dans le premier cas et de seulement 12,5 W dans le second.

Je crois utile de rappeler que ces niveaux de crête sont atteints pendant des temps très brefs, de quelques ms seulement, et ne sont mesurables qu'à l'aide d'un sonomètre équipé pour détecter et mémoriser ces crêtes. Un sonomètre intégrateur habituel ne donnera que le niveau équivalent pendant le temps de mesure sélectionné, c'est-à-dire le niveau moyen qui est de l'ordre de 20 à 30 dB inférieur au niveau de crête, selon la dynamique du signal. Un niveau de 105 dB crête ne correspond absolument pas à un volume sonore élevé. Bien sûr, si vous essayez de produire ce niveau avec

des haut-parleurs de 17 cm, vous n'y arriverez pas : avec un niveau moyen de 75 dB les crêtes seront aux environs de 100 dB et c'est la limite mécanique des haut-parleurs. Que se passe-t-il si vous montez le volume sonore de 5 dB ? Le niveau moyen passe à 80 dB, mais les crêtes restent à 100 dB, la dynamique est donc réduite, tassée, surtout pour les sons graves. Si vous montez encore de 5 dB, le niveau moyen passe à 85 dB, ce qui commence à être désagréable, et les crêtes restent inchangées. Le résultat est que vous avez l'impression d'un son très fort parce que le niveau moyen est trop élevé, alors que les crêtes ne sont pas assez fortes, et manquent d'impact. Au contraire, l'écoute de haut-parleurs de grand diamètre à haut rendement donne l'impression que le son n'est pas très fort, mais tout à fait normal, naturel, à la fois ample et clair, alors qu'une mesure du niveau crête laisse l'auditeur stupéfait, avec des indications de 105 à 110 dB !

Finalement, la taille du haut-parleur est le prix à payer pour respecter la dynamique et la vivacité de la musique, c'est-à-dire les niveaux de crête, avec l'immense avantage de sauvegarder nos précieux tympans, en les préservant des niveaux moyens trop intenses, générateurs de fatigue auditive.