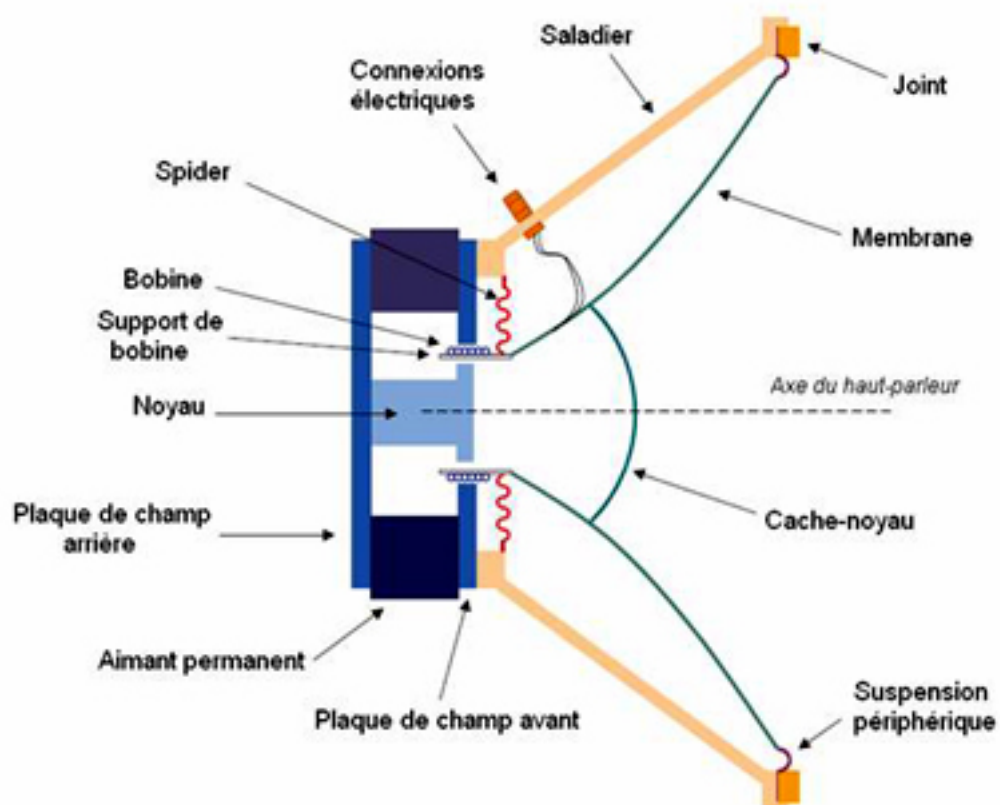


LE HAUT-PARLEUR



SOMMAIRE

Introduction

Principe de fonctionnement d'un haut-parleur

- Principe de l'émission d'un son d'un HP
- Ce qui fait bouger la membrane d'un HP
- Le fonctionnement d'un HP à cône est inverse à celui d'un microphone électrodynamique

Le circuit magnétique

- HP à suspension pneumatique
- HP à trompette acoustique

Impédance d'un HP

Compression thermique

Sensibilité et linéarité en puissances

- Rendement, volume et réponse dans le grave
- Fréquence de résonance (F_s), volume d'air équivalent à l'élasticité de la suspension (VAS) et le coefficient de surtension total du HP (Q_{ts})
- Masse mobile en mouvement du HP (M_{ms}) et le coefficient de couplage électrodynamique (BL)
- Déplacement maximum de la membrane (X_{max})

Directivité d'un HP

- Théorie et pratique

Rayonnement des HP



Introduction

Le but de ce mémoire est de récapituler les principes basics de fontionnement d'un Haut-parleur ainsi que d'apporter un complément d'information sur les caractéristiques technologiques des différents haut-parleurs et des caractéristiques techniques permettants leurs conception.

Principe de fonctionnement d'un hp

Le hp est un transducteur électrique – mécanique – acoustique

La Figure 1 représente une coupe schématique d'un haut-parleur électrodynamique typique, constitué d'une partie fixe et d'une partie mobile. La partie fixe regroupe l'aimant permanent constitué la plupart du temps en ferrite mais de plus en plus fréquemment d'un alliage au Néodyme, les pièces dites polaires (noyau, plaques de champ avant et arrière) en acier doux, perméables au champ magnétique, et le saladier (ou châssis). La partie mobile comprend la bobine, son support cylindrique (en kapton, fibre de verre, voire aluminium), la membrane et le cache-noyau qui empêche la pénétration de poussières magnétiques. L'ensemble de l'équipage mobile est maintenu et guidé par la suspension périphérique et la suspension de centrage (spider), toutes deux fixées (collées) sur le saladier. Le rôle des suspensions est d'exercer une force de rappel contraire au mouvement de la membrane et de maintenir dans le même temps la bobine parfaitement centrée entre la plaque de champ avant et le noyau.

Le principe de l'émission d'un son par un Haut-parleur:

Concernant le Haut-parleur, la reproduction d'un son exige que le Haut-parleur soit capable de mettre en mouvement de l'air et de créer une succession de volume d'air comprimé entre lesquels existent obligatoirement des volumes d'air déprimés. Pour cela, la membrane du Haut-parleur doit avoir des mouvements d'excursion, elle doit bouger d'avant en arrière (ou d'arrière en avant d'ailleurs), ou ce que je vais appeler ci après des allers/retours....

Le nombre d'aller/retour par seconde de la membrane déterminera la fréquence émise...

De ce faite, une grande quantité d'aller/retour en 1 seconde émettra une fréquence relativement élevée ou aigu, mais de relativement faible amplitude (petits mouvements de la membrane) sachant qu'à partir d'une certaine fréquence, les mouvements de la membrane sont invisibles. Par contre un faible nombre d'aller/retour en 1 seconde de la membrane émettra une fréquence relativement basse, mais l'amplitude de la membrane étant toutefois assez importante (grands mouvements de la membrane étant cette fois ci d'autant plus visible que la fréquence reproduite est de plus en plus basse). Car la reproduction des fréquences basses demandent beaucoup d'énergie...et donc de grands mouvements de la membrane.

Ce qui fait bouger la membrane d'un Haut-parleur:

Tout le monde se souviens sans doute de cette expérience simple faite en science physique avec deux aimants dont on titille les deux polarités nord et sud...

Tout le monde se souvient donc que des pôles identiques se repoussent (nord/nord ou sud/sud), que deux pôles différents s'attirent (sud/nord ou nord/sud).

Hors ces deux aimants ne changent pas de polarité mais il est possible en les tournant d'obtenir toutes les combinaisons possibles afin de tester toute les possibilités décrites entre parenthèses un peu plus haut. Maintenant imaginez que nous prenions un aimant et que l'on fabrique un électro-aimant...

L'aimant a la faculté de garder ses polarités fixes, alors que l'électro-aimant suivant la polarité du courant qui le traverse changera de polarité magnétique.

Dans le premier cas, nous allons par exemple créer une attraction en créant dans l'électro-aimant une polarité différente de l'aimant permanent. Puis en inversant la polarité de l'électro-aimant, nous allons créer une répulsion. Nous avons donc trouvé les moyens de provoquer des mouvements alternatifs (répulsions puis attractions) à une bobine électro-aimant soumise à un courant en présence d'un aimant naturel à induction magnétique permanente.

Maintenant imaginez que l'on colle un cône de carton à cette bobine électro-aimant...bien sur, lorsque la bobine va physiquement bouger, le cône en carton avec qui elle est solidaire va aussi se mettre en mouvement.

La membrane du Haut-parleur fonctionne sur ce principe... et la sortie des amplificateurs fourni le courant alternatif nécessaire pour créer les mouvements « aller/retour » du cône...

Suivant la polarité créée dans la bobine mobile (l'électro-aimant) la membrane va avancer ou reculer par rapport à une position de repos (la position de repos est la position de la membrane quand elle n'est soumise à aucun déplacement, et que l'électro-aimant ne reçoit aucun courant de l'amplificateur.).

Le mouvement d'aller/retour de la membrane est appelée course ou plutôt excursion de la membrane. L'augmentation de la tension dans l'électro-aimant va augmenter également la course ou l'excursion de la membrane, la membrane produit à ce moment de plus grands mouvements d'aller/retour. De ce faite, plus on réclame de niveau sonore à un Haut-parleur , plus les débattements de la membrane sont grands. Parce que la quantité de courant mais surtout la tension qui passent dans sa bobine sont plus importants (le produit de la tension par l'intensité étant la puissance bien sur ($P=UI$)).

Le fonctionnement d'un haut-parleur à cône est inverse de celui d'un microphone électrodynamique.

L'aimant permanent crée un champ magnétique qui se retrouve, grâce aux pièces polaires, concentré entre la plaque de champ avant et le noyau, c'est-à-dire exactement à l'emplacement de la bobine. Lorsque l'on applique aux bornes de connexion du haut-parleur un signal audio électrique, le courant traversant la bobine engendre une force variant avec ce courant selon la loi de Laplace : $F = Bli \sin \hat{\alpha}$ où $\hat{\alpha}$ désigne l'angle entre la direction (et le sens) du courant i et le vecteur induction magnétique B , et L , la longueur de fil embrassée par le flux d'induction. L'angle $\hat{\alpha}$ valant 90° , son sinus vaut 1 et donc $F = BLi$. La bobine mobile et la membrane solidaire se mettent ainsi à vibrer selon l'axe du haut-parleur et de façon proportionnelle (dans une bande fréquentielle limitée) aux variations du signal électrique. Le mouvement de la membrane entraîne à son tour des variations de la pression acoustique, et donc la création d'ondes sonores, qui se propagent jusqu'aux oreilles de l'auditeur. Ces variations de pression sont ainsi proportionnelles aux variations du signal audio d'origine.

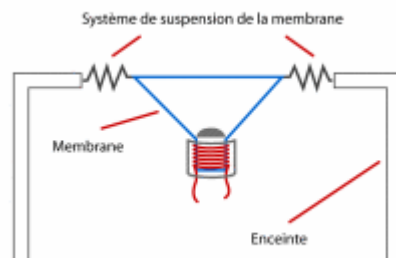
En réalité, un haut-parleur unique n'est pas capable de convertir correctement en ondes acoustiques un signal audio électrique de bande fréquentielle étendue. Un tel haut-parleur devrait en effet posséder des propriétés mécaniques et électromagnétiques différentes et même contradictoires suivant les fréquences. Par exemple, une grande membrane est avantageuse pour fournir l'énergie nécessaire à la restitution des basses fréquences, mais perturbe la reproduction dans un domaine haute fréquence où la longueur d'onde est comparativement petite. Pour permettre une bonne restitution sonore sur l'ensemble du spectre des fréquences audibles, plusieurs haut-parleurs ou combinaisons de haut-parleurs (le plus souvent 2 ou 3) sont habituellement utilisés simultanément. Typiquement, les haut-parleurs à cône reproduisent les basses et moyennes fréquences, et un haut-parleur à pavillon restitue les fréquences élevées. L'aiguillage des différentes fréquences du signal électrique vers le haut-parleur le plus adapté est effectué par des filtres de répartition. Enfin, pour éviter une atténuation du son en basse fréquence induite par des phénomènes d'interférence entre les ondes avant et arrière émises par les haut-parleurs (phénomènes de court-circuit sonore), ces derniers sont enfermés dans une enceinte acoustique.

Le circuit magnétique

Sa conception exerce une influence décisive sur les caractéristiques fondamentale du HP

il détermine le rendement du hp :

La membrane est fixée sur l'enveloppe extérieure à l'aide d'un système de suspension élastique comme décrit dans la figure suivante:



Suspension élastique de la membrane

Le système de suspension doit être réalisé très soigneusement puisqu'il est responsable du parfait centrage de l'enroulement à l'intérieur de l'*entrefer* et de l'atténuation des oscillations. C'est pour cela que la suspension est réalisée avec un matériel lourd et ondulé en mesure d'atténuer les oscillations qui ne sont pas directement produites par le signal électrique.

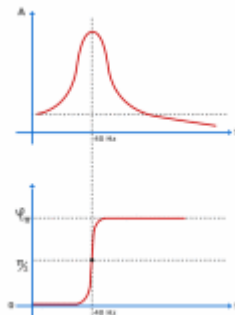
Quand un système élastique est soumis à une sollicitation oscillatoire, il réagit différemment selon la fréquence de la sollicitation. En particulier le système élastique commence à osciller à la même fréquence de la sollicitation quand celle-ci est similaire à la fréquence de résonance du système. Chaque système élastique a en effet sa propre fréquence de résonance qu'on peut calculer en utilisant des formules mathématiques qui décrivent les grandeurs concernées par le système même.

Ceci dit, laissons le côté théorique et voyons ce qu'il signifie en pratique. Imaginons que notre système élastique soit un haut-parleur (donc un système composé de différentes parties: la membrane, l'enroulement et autres), qui aurait sa propre fréquence de résonance que nous supposons, pour mieux cerner l'idée, de 40Hz.

En appliquant au haut-parleur un signal électrique sinusoïdal et en variant la fréquence du signal, nous obtiendrons que la membrane du haut-parleur ne sera pas sollicitée tant que la fréquence du signal ne se rapproche pas de la

fréquence de résonance du haut-parleur (disons plutôt qu'elle le sera de façon minime). Quand, par contre, on arrive autour des 40Hz, la membrane commencera à osciller elle aussi à cette fréquence et nous pourrons entendre un son qui sort du haut-parleur de fréquence équivalent à la fréquence du signal électrique appliqué.

La figure ci-après illustre l'amplitude de l'oscillation du haut-parleur en question, sollicité par un signal dont on varie la fréquence:



Sollicitation d'un système élastique

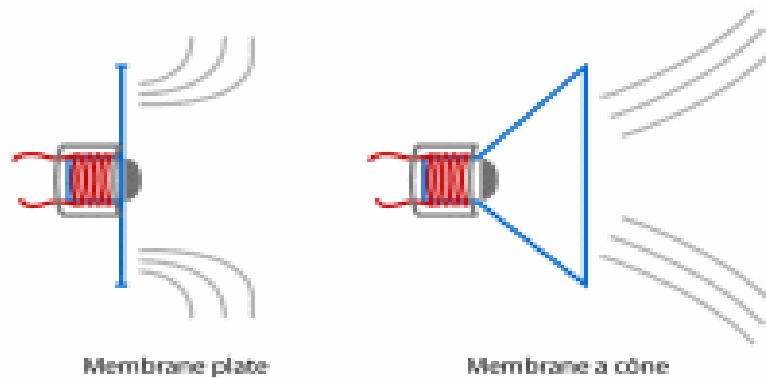
On peut voir comme l'amplitude de l'oscillation atteint son maximum aux alentours de la fréquence de résonance, alors qu'elle est presque nulle ailleurs. On peut voir également, dans la figure, le diagramme de phase de ce système élastique qui montre comment les fréquences supérieures à celle de résonance en sont inverties en phase (un déphasement de 180 degrés implique une inversion de polarité soit une inversion de phase). Evidemment cette situation est tout à fait indésirable dans le cas d'un haut-parleur qui ne doit pas introduire des altérations sur le signal d'entrée et encore moins une inversion de phase dans la bande de fréquence qu'il doit reproduire. En fait, le diagramme de phase d'un haut-parleur n'a jamais le développement figuré, dont on s'est servi pour mettre en évidence une fois de plus les questions relatives au déroulement de la phase qui sont souvent négligées.

C'est la mesure effective de la puissance acoustique du haut-parleur, autrement dit, sa capacité de transformer l'énergie électrique en énergie acoustique. Naturellement, plus l'efficacité du haut-parleur est bonne, plus grande sera la quantité d'énergie électrique transformée en énergie acoustique. La partie d'énergie électrique qui n'est pas convertie en énergie acoustique est dissipée par le haut-parleur sous forme de chaleur. C'est la raison pour laquelle l'enroulement à l'intérieur de l'entrefer est souvent maintenu sous vide: la présence d'air produirait une augmentation de la

température à cause de l'énergie dissipée, avec pour risque d'endommager l'enroulement même.

L'efficacité varie en fonction de la fréquence et pour cela un haut-parleur est utilisé dans la bande de fréquence où son efficacité est maximale et plus ou moins constante. L'efficacité d'un haut-parleur est généralement très basse, de l'ordre de 1-2% jusqu'à un maximum de 8%.

Pour en augmenter l'efficacité, on adopte différentes méthodes selon également la bande de fréquence reproduite. Pour les basses fréquences, on réalise des membranes à forme de cône qui recueillent mieux l'air à déplacer qu'une membrane plate, comme il est décrit ci-après:



Comparaison entre membrane a cône et membrane plate

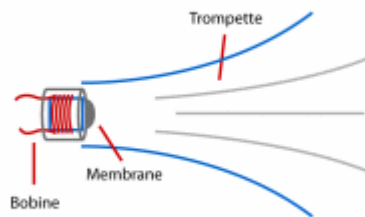
Hauts-parleurs a suspension pneumatique

Dans les hauts-parleurs à basses fréquences, l'efficacité est plutôt basse à cause de la suspension qui atténue énormément les oscillations pour empêcher la production des sons indésirables. Pour en augmenter l'efficacité, on réalise des hauts-parleurs à suspension pneumatique. Dans ce cas, le haut-parleur est fixé à un récipient de maintien de l'air et le matériel qui rejoint la membrane au restant de la structure est privé de ses caractéristiques d'atténuation qui est, cette fois, obtenue grâce au vide d'air qui tente de compenser les variations de pression produites par l'oscillation de la membrane. En d'autres mots, vu que la zone arrière de la membrane est sous vide, son mouvement provoque une variation de la pression interne qui est rétablie par le vide d'air. Ce système consent une excursion supérieure de la membrane et en conséquence une augmentation

substantielle de l'efficacité.

Haut-parleur à trompette acoustique

Les hauts-parleurs, destinés à la reproduction des hautes fréquences, sont fixés à la base d'un conduit en forme de trompette afin d'en augmenter l'efficacité, comme décrit ci-dessous:



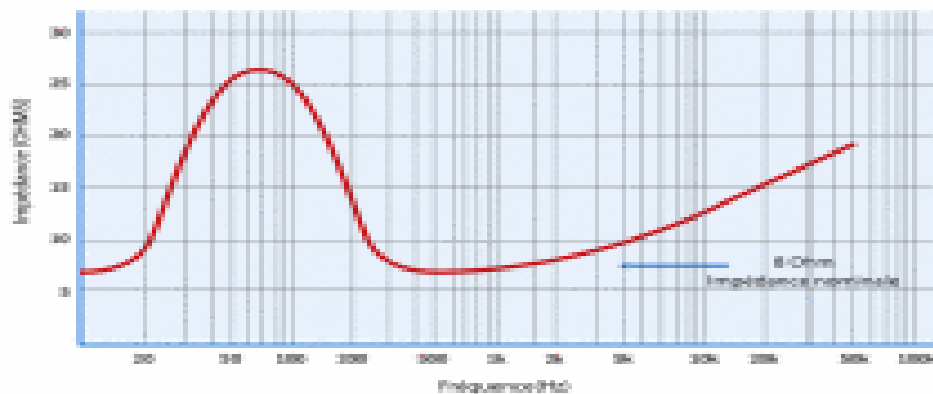
Haut-parleur à trompette acoustique

De cette manière on réalise l'adaptation ainsi dite de impédance acoustique. En l'absence de la trompette la membrane se trouve en contact d'une superficie d'air théoriquement beaucoup plus élevée que celle de la membrane même et ceci produit une dispersion de l'énergie acoustique dans toutes les directions. Dotée de la trompette, par contre, la membrane se trouve au contact d'une superficie d'air semblable à sa surface. La première couche d'air (avec une superficie légèrement plus grande que celle de la membrane) est à son tour en contact avec la couche d'air successive qui, par la forme de la trompette, sera un peu plus grande que la précédente et ainsi de suite. De cette manière le mouvement de l'air est transmis progressivement d'une couche à l'autre avec des superficies de plus en plus grandes et ceci permet de mieux canaliser l'énergie acoustique et d'éviter les dispersions. Il existe naturellement plusieurs formes de trompettes, chacune avec ses propres caractéristiques même si le principe de fonctionnement reste le même. Avec ces systèmes on obtient une augmentation de l'efficacité jusqu'à 30%.

En dehors de l'amélioration de l'efficacité, ce système est utilisé pour diriger les hautes fréquences que nous savons être particulièrement dépendantes de la direction de propagation.

Impédance d'un HP

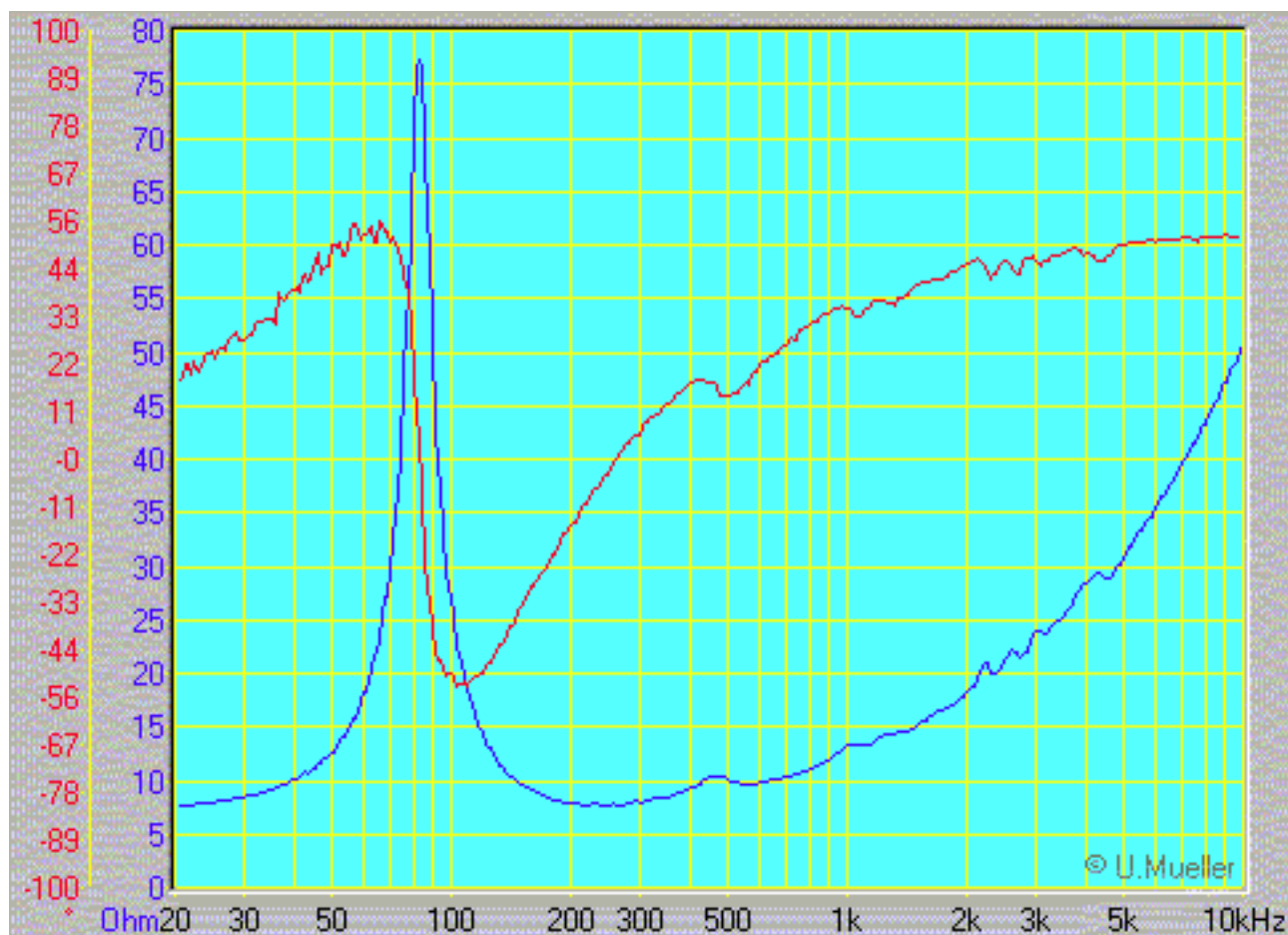
Les hauts-parleurs, qui, étant en substance des circuits, ont une impédance qui varie en fonction de la fréquence du signal appliqué. On considère généralement l'impédance d'un diffuseur acoustique comme la combinaison des impédances de chaque haut-parleur et des circuits qui en font partie. Les valeurs typiques pour l'impédance des diffuseurs sont de: 4 Ohm, 8 Ohm, 16 Ohm. Ce sont plutôt des valeurs indicatives vu que, comme il a été déjà dit, l'impédance varie en fonction de la fréquence. La figure suivante montre un déroulement typique de l'impédance d'un haut-parleur duquel est fournie la valeur de l'impédance nominale équivalent à 8 Ohm:



Les fabricants nous donnent la valeur de l'impédance pour une fréquence de 1 kHz, qui est appelée impédance nominale.

En continu ($f = 0\text{Hz}$), il ne reste que la résistance ohmique RDC du fil de la bobine mobile. Nous pouvons accepter un lien entre l'impédance nominale et la valeur ohmique de l'ordre de $Z_{\text{nom.}} = 1,25 \text{ RDC}$ ($\text{RDC} = 0,8 Z_{\text{nom.}}$)

La pointe aux fréquences basses est due à la résonance mécanique de l'équipage mobile du HP. Plus la fréquence augmente, plus l'impédance augmente (X_L est proportionnelle à f) et le circuit devient inductif (déphasage).



Compression thermique :

En effet, la bobine du haut parleur possède une résistance de quelques ohms (à ne pas confondre avec l'impédance mais le principe reste le même). Cette résistance mesurée avec un ohmmètre (contrôleur universelle régler sur ohmmètre) est appelée " R_e "...

Au repos, le haut parleur est soumis à une température ambiante, soit en général 20°C. Lorsque le haut parleur est utilisé et que l'amplificateur lui envoie un signal électrique, ce signal passant par la bobine du haut parleur provoque inévitablement une élévation de température. Cette élévation de température modifie la valeur de résistance du fil de la bobine mobile.

Compte tenu du fait que le haut parleur possède une bobine mobile de relativement faible valeur ohmique, l'intensité (en ampère) du courant sera relativement importante et ceci avec une tension assez modeste. Certains haut parleur sont capables de supporter une tension de plus de 100 volts!!... En conséquence, la puissance dissipée par la bobine va être très forte. Compte tenu de la faible résistance, ou d'ailleurs de la faible impédance du fil de la bobine mobile. Mais cette température élevée va bien sûr faire grimper la valeur ohmique de la bobine mobile, ce qui aura pour conséquence de limiter le courant. Donc avec une tension identique, le courant plus faible se traduira par une puissance plus faible...

Ceci indique qu'un haut parleur soumis à une puissance électrique importante pendant un bon moment, va voir une limitation de la puissance électrique que la bobine mobile va dissiper. Dans le monde audio professionnel, cette particularité est largement combattue pour améliorer la réponse impulsionnelle du haut parleur...

Comme le graphique l'indique, jusqu'à un certain niveau, la moindre progression de la puissance électrique se traduit par une augmentation de la pression acoustique générée par le haut parleur. A partir d'un niveau "intermédiaire", le niveau de pression acoustique ne progresse plus même si on augmente encore la puissance électrique (ce qui indique le début de l'effet de compression thermique). Arrivé au dernier stade avant destruction (fusion de la colle ou fusion des soudures du fil de bobine) une augmentation de la puissance électrique se traduit par une diminution de la pression acoustique produit par le haut parleur...

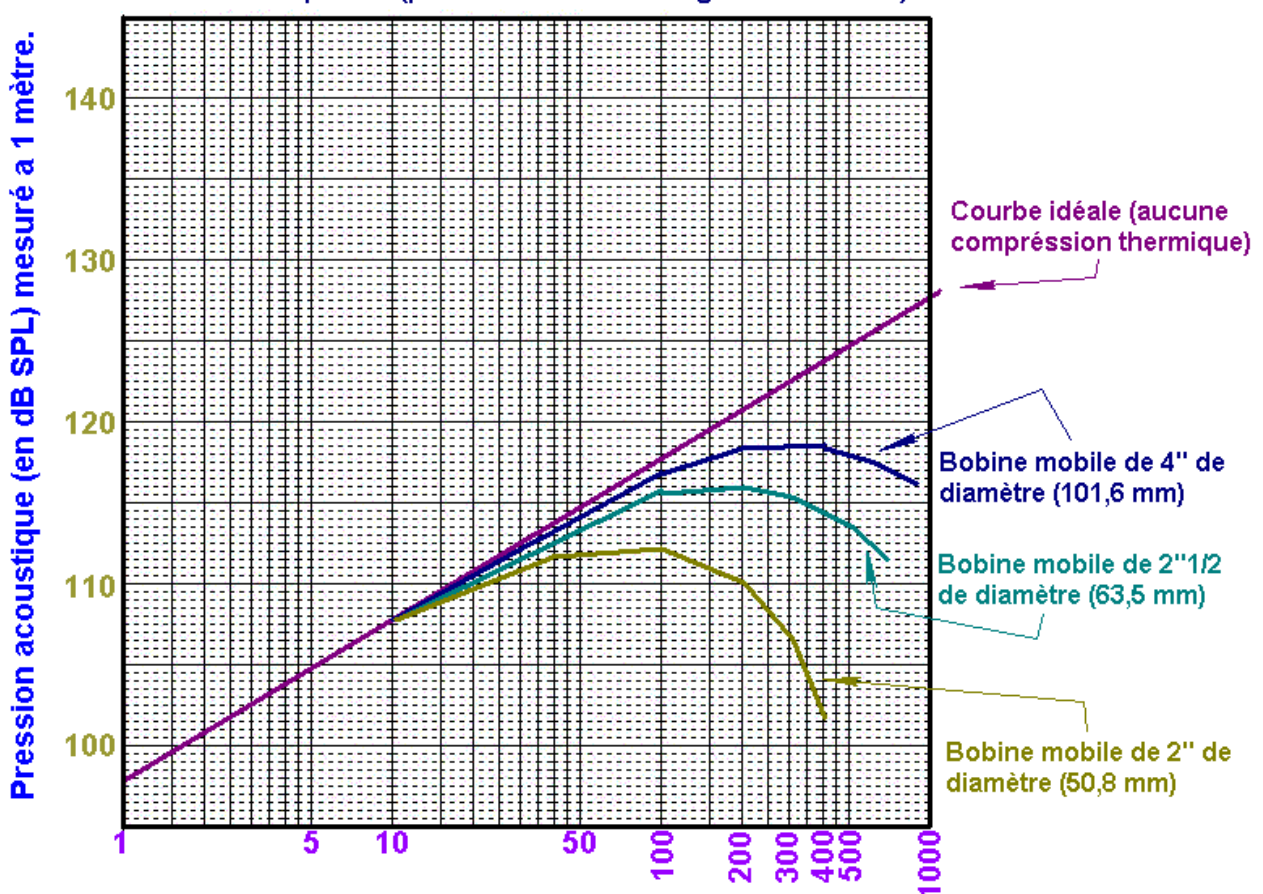
le haut parleur est limité en puissance admissible par deux facteurs:

- température de la bobine mobile approchant la destruction de la colle qui solidarise le fil de cuivre avec son support
- excursion de la membrane qui atteint les limites mécanique de résistance des matériaux par un écrasement de la membrane a sa périphérie

...Cependant, les fabricants sérieux de haut parleurs produisent des bobines

Compression thermique constatée sur plusieurs haut parleurs

A impédance de bobine mobile identique, avec un fil de bobine d'autant plus gros que la bobine a un diamètre important (puissance admissible également accrue)



Puissance (en watts électrique) fournie au haut parleur par l'amplificateur audio.

mobiles qui admettent des puissances électrique bien supérieur a la puissance admissible mécanique de sorte de réduire cette compression thermique aussi fortement que possible. De ce faite, les haut parleurs audio professionnels sont très souvent conçu avec des bobines de 4" (4 pouces de diamètre ou 4 Inchs. Un pouce anglais vaut 2.54 cm), sauf dans le cas de bobine pour haut parleur avec forte excursion...dans ce cas...la réduction du diamètre de la bobine est compensée par sa longueur... la surface d'échange thermique est alors identique...

Les moyens de combattre cette compression thermique sont nombreux...les ferro-fluides en sont. Il existe aussi des moyens techniques comme les trous d'aération situé a l'arrière du haut parleur...ce fut le cas par exemple des haut parleurs JBL professionnel qualifié de "VGC" (vented gap cooling). Ces haut parleur étaient pourvu de trois trous permettant d'évacuer efficacement les calories produites par la bobine mobile soumise a un fort passage de courant électrique. Ce faisant, la température destructrice était plus difficile a atteindre tout en permettant au haut parleur de fournir des niveaux de pression supérieurs!...la puissance admissible du haut parleur a vu une sensible amelioration.

Il n'est pas rare que la température de la bobine mobile s'élève a plusieurs centaines de degrés Celsius. Cette élévation de température peut engendrer plus de 5 dB de perte par rapport au résultat obtenu par calcul (ce calcul faisant intervenir la sensibilité du haut parleur et sa puissance admissible). La société turbosound par exemple, dans la brochure technique qui accompagne sont caisson d'extrême grave TSW 121, signal une compression thermique de 2 dB avec la puissance maximum admissible de l'enceinte atteinte par la puissance de l'ampli (et 1 dB avec 500 Watts)

Il me vient a ce moment l'idée de faire une comparaison avec différents haut parleur, notamment les haut parleurs destiné a l'usage domestique d'une part et bien sur, d'autre part, les haut parleurs audio professionnels... Les haut parleurs audio professionnels sont caractérisés par une sensibilité moyenne bien supérieures a celle des haut parleurs "hi fi domestiques". Leur puissance admissible est également très supérieure...

Quand on cherche a reproduire avec réalisme un niveau de pression suffisant pour restituer un instrument de musique, on arrive très rapidement aux limites de la plus part des équipements audio domestique, chose qui n'arrive pas ou rarement avec le matériel audio pro. J'en veux pour preuve l'existence de percussion tel que la batterie dans de nombreux extrait musicaux. la présence de "cuivres" n'étant pas non plus facile a restituer (trompettes, trombone a coulisse). Les niveaux de pression sont naturellement élevés...voir très élevés dans le cas de la batterie.



Arrive alors le problème du réalisme sonore et de la dynamique qui seraient sensée être correctement restituées par un équipement audio domestique. Les enceintes ou plus précisément les haut parleurs d'hi-fi domestique souffrent d'une sensibilité faible du a l'encombrement réduit exigé par le client. Ainsi la taille réduite des enceintes mais aussi des hps provoquent une réduction significative de la sensibilité des enceintes...les haut parleurs de grave tirant les autres haut parleur de médium et d'aigu vers le "bas" si je puis dire. En effet, la pression dans le grave dépend de la valeur de l'excursion de la membrane mais aussi de sa surface. les paramètre d'excursion " X_{max} " multiplié par la surface active " S_d " donnent la valeur du volume déplacé " V_d ". La restitution des graves sera d'autant plus facile en niveau de pression acoustique que la valeur de " V_d " sera importante. Le problème est que pour les enceintes acoustiques hi-fi domestiques, la surface active des haut parleur de grave sont plutôt réduite, il faut donc compenser par une excursion plus importante pour obtenir un " V_d " honorable...mais une excursion importante induit une baisse significative de sensibilité du hp du fait de sa conception (une grande partie de la bobine mobile se trouve en dehors du champ magnétique qui circule dans l'entrefer).

Cette faible sensibilité induira une puissance électrique nécessaire plutôt importante pour une pression acoustique plutôt modeste...qui dit puissance électrique élevée (alors qu'on est loin d'avoir atteint les niveaux acoustiques réalistes de certains instruments), dit qu'une compression thermique va se produire plus facilement et réduire encore plus le niveau de pression qui n'était déjà pas très élevé...Un tel problème sur un haut parleur audio pro est repoussé très loin. En conclusion, le haut parleur de hi-fi est amoindrie dans ses performances par une sensibilité médiocre, une puissance admissible modeste, et une compression thermique qui arrive assez tôt et dont les répercussions sont assez forte car très souvent les bobines mobiles sont de tailles réduite sur ce type de haut parleur.

A contrario, le haut parleur audio professionnel est capable de fournir des niveaux de pression acoustique très élevé du fait d'une forte sensibilité (encore plus grâce a l'utilisation des techniques du pavillon). Du fait d'une bien meilleurs technique de refroidissement, la compression thermique n'intervient que tardivement et dans des proportions sensiblement plus modeste que le cas du haut parleur hi-fi domestique...le seul inconvénient du haut parleur audio-pro concerne la place occupé par celui ci...puisque'il prend sensiblement plus de surface au sol comme de volume. C'est bien le seul défaut, et très franchement ça vaut le coup de se priver d'un peu de place pour avoir une restitution sonore qui ne laisse aucun doute possible sur la restitution du réalisme sonore avec des haut parleurs audio-pros par opposition a l'utilisation des haut parleurs domestique hi-fi!...



Sensibilité et linéarité en puissance :

Sur ce point, il y avait un silence radio total de la part des fabricants, sauf de la part de JBL. Aujourd'hui plus de fabricants indiquent les choses. Les haut-parleurs ne sont pas tous linéaires devant l'augmentation de puissance.

La logique voudrait que chaque fois que l'on double la puissance aux bornes du haut-parleur, le niveau sonore augmente de 3 dB. Cette règle est à peu près vraie aux très faibles puissances et le devient de moins en moins aux fortes puissances.

La résistance de la bobine mobile augmente avec la température :

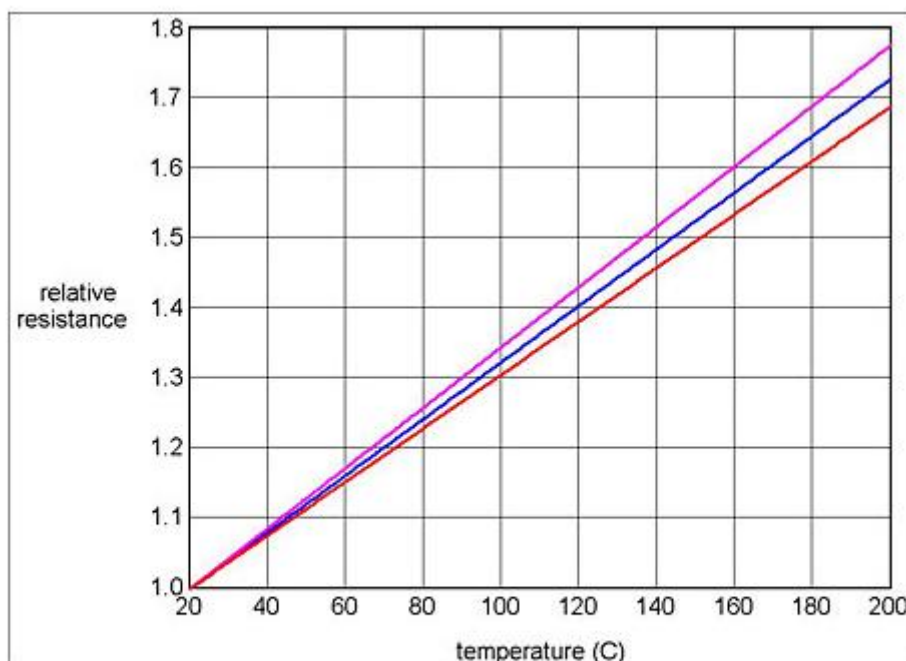


Fig.1 Relative resistance vs temperature for copper (blue trace), aluminum (red), and silver (purple).

Cette partie concerne surtout **l'usage en sonorisation**, aux puissances moyennes élevées.

En usage HI-FI domestique, avec une puissance moyenne faible, les phénomènes sont beaucoup plus réduits sans être totalement absents.

JBL annonce une perte de :

- 0.5 à 0.8 dB à $1/10^e$ de la puissance nominale, -10 dB.
- 1.7 à 2.5 dB à la moitié de la puissance nominale, -3 dB.
- 3.2 à 4.3 dB à la puissance nominale, 0 dB.

BEYMA, sur le 18P1200Nd par exemple, indique une courbe.

- 1 dB à $1/10^e$ de la puissance nominale (120 W), -10 dB.
- 3.8 dB à la moitié de la puissance nominale (600 W), -3 dB.
- 5.5 dB à puissance nominale (1200 W), 0 dB.

Les haut-parleurs à haute sensibilité s'en sortent beaucoup mieux que d'autres :

Pour un même niveau sonore, ils se contentent de beaucoup moins de Watts à leur bornes.

Avec moins de Watts, il y a moins de pertes :

- Si vous restez à -20 dB du niveau maxi possible pour le HP, vous êtes dans la zone linéaire.
- Si vous arrivez au niveau maxi du haut-parleur, vous aurez la perte de 3.2 à 4.3 dB.
- Si votre HP n'est pas aussi bien construit



qu'un JBL, la perte peut être plus importante.

Indépendamment de la sensibilité, et pour des raisons subtiles de conception et de fabrication, vous avez beaucoup plus de chances de trouver un haut-parleur linéaire en dynamique dans les séries haut de gamme des fabricants que dans les séries économiques.

Prenons trois systèmes :

- Avec un 13 cm et capable de 100 dB maxi.
- Avec un 21 cm à basse sensibilité et capable de 103 dB maxi.
- Avec un 30 cm à haute sensibilité et capable de 110 dB.

Imaginons que le morceau de musique, a votre niveau d'écoute, ai une pointe de dynamique à 100 dB :

- Le 13 cm reproduire $100 - 4.3 = 95.7$ dB.
- Le 21 cm reproduira $100 - 2 = 98$ dB.
- Le 31 cm reproduire $100 - 0.5 = 99.5$ dB.

Je vous laisse deviner lequel des trois est le plus linéaire en dynamique, et pourquoi la basse sensibilité est dans l'impasse totale.

Le raisonnement n'est pas tout à fait juste :

- Une pointe de puissance n'a pas le temps de faire chauffer assez la bobine du haut-



parleur pour que l'effet de limitation dynamique se produise totalement.

- Une bobine de grand diamètre à une inertie thermique plus grande qu'une bobine de petit diamètre. Une pointe de puissance sera donc plus sensible sur une petite bobine que sur une grande;

C'est à ce niveau que se trouve aujourd'hui le silence radio des fabricants.

Rendement, volume et réponse dans le grave :

3 paramètres importants d'une enceinte sont liés par une seule et même équation. Ces paramètres sont :

- Le volume de l'enceinte.
- La fréquence de coupure à -3 dB dans le grave.
- Le rendement dont on vient de voir l'importance. Rendement exprimé en %, ou sensibilité exprimé en dB/2.83V/m.

En pratique c'est très simple : Si vous voulez un haut rendement en descendant très bas dans le grave, vous aurez un très grand volume d'enceinte. Les mini enceintes qui descendent dans le grave, pas forcément très bas, ont toutes un faible rendement. Les évolutions technologiques n'y changeront rien, c'est une loi physique qui sera encore valable dans plusieurs milliers d'années.

Fs, VAS et Qts :

Ces 3 paramètres permettent de choisir un haut-parleur.

Fs est la fréquence de résonance sur baffle plan normalisé CEI du haut-parleur. Si vous voulez descendre bas dans le grave, il faut un Fs bas.

VAS est le volume d'air équivalent à l'élasticité de la suspension. En première approche, pour un bass-reflex et un TQWT, le volume interne de l'enceinte sera égal à $1.1 \times VAS$. Si vous voulez une enceinte de 20 L, ne choisissez pas



un VAS de 200 L...

Q_{ts} est le coefficient de surtension total du haut-parleur. Le Q_{ts} est calculé à partir du Q_{ms} coefficient de surtension mécanique, et du Q_{es} coefficient de surtension électrique.
$$Q_{ts} = Q_{ms} * Q_{es} / (Q_{ms} + Q_{es})$$

Voir la rubrique "Mesure des paramètres d'un HP" dans ce chapitre.

Pour un montage en baffle plan le Q_{ts} doit être compris entre 0.45 et 0.80, idéalement 0.70.
Pour un bass-reflex, le Q_{ts} doit être compris entre 0.25 et 0.50, idéalement de 0.35 à 0.40.
En TQWT, le Q_{ts} doit être compris entre 0.25 et 0.35.

Conclusion : il n'est pas possible de choisir un haut-parleur sans connaître au départ son application.

BL et Mms :

M_{ms} est la masse mobile en mouvement du haut-parleur. C'est la masse de la membrane + la bobine mobile + la réactance de rayonnement de l'air de chaque côté de la membrane. L'unité est usuellement le Gramme, et pour les calculs le Kg.

BL est le coefficient de couplage électrodynamique. L'une des unités est N/A. Les autres unités (équivalentes) sont le Tm (Tesla x mètre) et le Vs/m. Exprimé en N/A, c'est la force qui pousse la membrane pour un Ampère aux bornes du haut-parleur.

Le facteur le plus intéressant est BL/M_{ms} . L'une des unités est $N / (A * Kg)$. Sachant que $N = Kg * m / s^2$, l'unité devient $m / (s^2 * A)$. En physique, vous avez certainement appris que des m / s^2 sont l'unité d'une accélération.

La signification du BL/M_{ms} est quelle est l'accélération possible de la membrane pour un ampère aux bornes du haut-parleur.

La musique est faite de dynamique, et d'écart de niveau important pendant un temps très court. Pour reproduire ces écart avec le maximum de fidélité, il faut des haut-parleurs capable d'accélération, donc avec un BL/M_{ms} élevé. La difficulté est d'évaluer le BL/M_{ms} minimum nécessaire pour reproduire le signal sonore a votre niveau d'écoute souhaité.



Un BL élevé est obtenu avec un gros aimant. Une masse faible est obtenue avec des membranes légères. Vous tombez directement sur les haut-parleurs à haut rendement qui demandent un grand volume de charge pour descendre bas en fréquence.

De là à penser que les haut-parleurs n'ont fait aucun progrès depuis 20 ou 30 ans, il y a un pas que je franchis allègrement. Les meilleures solutions qui marchent aujourd'hui existaient déjà il y a 30 ans. Les recettes pour faire un bon haut-parleur n'ont pas changé. PHY-HP qui fait des haut-parleurs qui peuvent sembler rétrograde, ne fait qu'optimiser un tas de solutions connues, avec le talent en plus...

La comparaison des BL/Mms doit se faire à surface de membrane comparable: La masse des membranes augmente avec le diamètre des haut-parleurs.

Xmax :

Xmax est le déplacement maximum de la membrane.

$(\text{hauteur entrefer} - \text{hauteur bobine}) / 2$ quand la bobine est courte.
 $(\text{hauteur bobine} - \text{hauteur entrefer}) / 2$ quand la bobine est longue.

J'entends plutôt par ces équations : Le déplacement linéaire sous l'aspect magnétique, que je n'hésite pas effectivement à considérer comme le "Xmax" pour des applications de qualité. On espère bien sûr que la rigidité imparfaite de la membrane ne va pas dénaturer prématurément cette linéarité. Ensuite on peut évoquer la limitation plus lointaine de la suspension, mais en haute-fidélité, cette extrême devant rester non atteinte, devient une information presque accessoire.

Une façon de définir Xmax est de le mesurer, avec pour limite un taux de distorsion. Par exemple 3% comme le propose Mark Gander (JAES = 1-2/81).

Il existe plusieurs valeurs :

- Linéaire, qui est la seule qui nous intéresse.
- Maximum, qui correspond à la puissance maximum. Cette valeur est supérieure au X linéaire, et il y a pas mal de distorsion. Inutile en HI-FI, à connaître en SONO.



- Damage, (ou casse), quand la bobine vient toucher le fond de l'aimant il y a de la casse mécanique. (Oui, certain HP sont mal foutus car il suffit de laisser un peu plus de place au fond de l'aimant et ça ne touche plus...)

La valeur du X_{max} n'est utile que pour calculer le niveau SPL maxi théorique du HP. C'est surtout utile en SONO, mais c'est à prendre en compte en HI-FI pour les HP de moins de 25 cm de diamètre si vous voulez avoir 105 dB dans votre pièce à coup sur. Le niveau SPL calculé est théorique, car il vient se retrancher les effets de compression thermique surtout sensible en SONO, et a ne pas négliger en HI-FI si la sensibilité des HP est faible.

Pour donner cette valeur, certain fabricant enfonce la membrane à fond, puis l'avance et fond, et donne comme valeur du X_{max} la différence entre les deux.

Cette valeur dite "crête à crête" est totalement fausse.

Une membrane de haut-parleur a un point d'équilibre donné par les suspensions.

Par rapport à ce point d'équilibre, la membrane avance et recule. Le X_{max} est la valeur entre le point d'équilibre et la plus faible des deux valeurs entre le déplacement maxi vers l'avant ou vers l'arrière.

Les fabricants sérieux donnent la bonne valeur. D'autres donnent une valeur crête à crête. Enfin pour les HP annoncés pour SUB ou pour CAR AUDIO, il n'est pas rare de lire n'importe quoi.

Ma base de données haut-parleurs dans la version gratuite va permettre de tordre le coup une bonne fois aux données fantaisistes. J'affiche la marque, référence, diamètre et type en données générales, et F_s , VAS, Q_{ts} et X_{max} en données techniques. Si vous avez un X_{max} supérieur à la moyenne des autres HP de même diamètre, posez vous la question du pourquoi. Et vous ne savez pas répondre pourquoi, demandez le aux fabricants. Quand ils en auront mare, ils donneront des données justes...

De même si vous entrez vous même un HP dans la base de données temporaire, vérifiez bien le X_{max} . Je vois trop d'erreur à ce niveau. Maintenant qu'il y a un moyen de vérification je vais pouvoir être intransigeant. Corollaire, vos allez me trouver tout un tas d'erreurs à corriger.



Directivité des Haut-parleurs

Théorie :

Lord Rayleigh dans son livre « Theory of sound » résout l'étude théorique du haut-parleur électrodynamique.

Par hypothèse et simplification, Il assimile la membrane du haut-parleur à un piston circulaire, rigide, plat, mince et de rayon a . Ce piston est animé d'un mouvement oscillatoire selon un axe normal à sa surface.

Les résultats de cette étude théorique montrent clairement qu'il y a une augmentation de la directivité de l'émission acoustique avec l'augmentation de la fréquence :

- Lorsque la circonférence de la membrane est plus petite que la longueur d'onde, le piston n'est pratiquement pas directif,
- La directivité devient appréciable dès lors que la longueur d'onde (λ) est voisine de la demi circonférence du haut-parleur ($\lambda > 3,1416 a$).

Pour rappel, $\lambda = c / f$ avec c vitesse du son (343.4 m/s à 20° Celcius) et f la fréquence.

Exemples :

- Pour un haut parleur de 380mm, $\lambda > 0,60$ m, soit une fréquence de 570 Hz.
- Pour un haut-parleur de 20mm, $\lambda > 0,031$ m, soit une fréquence de 10 800 Hz.

Dès que $\lambda = 1,64a$, des lobes secondaires apparaissent. Pour les spécialistes, ceci correspond au premier zéro de la fonction de Bessel de degré 1, trouvée lors de la résolution de l'équation différentielle qui décrit le comportement du piston. Pour cette longueur d'onde précise le haut parleur est directif, mais cette directivité est compensée par l'apparition de lobes secondaires.

En fonction de l'augmentation de la fréquence, il y a une alternance de ventres (émissions peu directive) et de noeuds (émissions nulles). Cette modulation de la directivité, importante au début, s'atténue de plus en plus avec l'augmentation de la fréquence. Pour les hautes fréquences et les très hautes fréquences, la théorie montre très clairement qu'un piston rigide, est



alors très directif.

L'explication physique du phénomène est la suivante :

Pour les basses fréquences, le mécanisme d'interférence n'introduit pas de différences de phases suffisantes entre les différents éléments de la membrane car la longueur d'onde est supérieure aux dimensions de la membrane. Le haut parleur rayonne dans toutes les directions, il n'est pas directif.

Pour les fréquences élevées, chaque élément dS de la membrane (piston plat de surface S) rayonne une onde élémentaire qui va donner lieu à une vibration générale en phase seulement dans des directions voisines de l'axe normal de la surface S . Dans les directions inclinées par rapport à cet axe normal tout s'éteint par interférences, seulement et d'autant plus si l'écartement entre les points élémentaires dS est inférieur à la longueur d'onde. Le mécanisme d'interférence joue d'autant mieux que la fréquence est élevée et donc que la longueur d'onde est petite (ou la fréquence est grande) par rapport aux dimensions de la membrane.

Pratique :

Dans la pratique une membrane de haut-parleur ne peut être considérée rigide que lorsqu'elle reproduit des basses fréquences. Aux fréquences plus élevées la membrane est un subtil compromis entre :

- La masse et la quantité de matériaux de la membrane.
- La méthode de fabrication de cette membrane qui change, à masse égale, la rigidité.
- Les liants utilisés dans la membrane.
- La forme de la membrane, le profil exponentiel étant généralement plus rigide.
- Les corrugations qui permettent de contrôler le fractionnement. Elles peuvent être soit simplement plus épaisses d'un côté, ou creusées proportionnellement sur la face arrière. Suivant les cas elles font office de ressorts ou de masse, elles créent un chaîne masse ressort dans le sens radial de la membrane permettant un fractionnement contrôlé et progressif de la membrane. Ceci d'autant plus qu'elles rigidifient la membranes dans le sens axial



La membrane perd son comportement rigide quand la fréquence augmente (diminution de la longueur d'onde), elle se fractionne. On tombe ici dans les théories classiques de la mécanique vibratoire des plaques.

Il n'y a plus alors de mouvement d'ensemble de la membrane. Seule la zone de la membrane proche de la bobine mobile (et plus particulièrement là où la membrane est collée à la bobine mobile) arrive véritablement à suivre les mouvements imposés par le moteur du haut-parleur. Plus exactement, c'est cette zone dont on perd le contrôle en dernier.

Le reste de la membrane vibre de façon d'autant plus incontrôlée que la surface dS considérée est éloignée de la zone centrale du haut-parleur. Le pourtour de la membrane qui est collé à la suspension périphérique est nettement rigidifié et ne vibre plus à partir d'une certaine fréquence (variable suivant la membrane, la suspension et le collage). Cette mauvaise coordination d'ensemble se traduit par une aggravation de l'extinction des ondes de cisaillement comme le démontre la théorie du piston rigide.

Les ondes de cisaillements parcourant la membrane dans le sens radial, sont d'autant plus amorties que la membrane est «molle». L'avantage va ici aux membranes relativement souples, séchées, ou au traitement de surface ou autres.

Ce mécanisme joue d'autant plus que l'on s'éloigne de la zone centrale du haut-parleur (autour de la bobine mobile) et que la longueur d'onde à reproduire est petite (les fréquences augmentent).

Ainsi dans la pratique une membrane au fractionnement progressif et/ou contrôle deviens directive beaucoup plus tard du fait que la surface rayonnante de la membrane est diminuée.

Rayonnement des haut-parleurs :

Retour à travers la membrane de l'onde sonore émise à l'arrière par le HP :

Si on amortit entièrement l'onde sonore arrière dans une enceinte par des cavités accordées et des matériaux insonorisant, on amortit aussi l'onde avant, d'où certaines enceintes avec d'excellentes mesures, mais sans dynamisme et détails. L'onde avant et l'onde arrière ne sont séparées que par une fine membrane de papier, de plastique ou matériaux composites. Ces enceintes sont souvent équipées de membranes épaisses et lourdes pour éviter ce retour à travers elles.

On peut au contraire essayer d'utiliser l'onde arrière pour renforcer l'onde avant, enceintes bass-reflex ou ligne d'onde. Mais quoique l'onde arrière ne peut arriver en phase qu'avec un retard d'au moins une demi période. Ce n'est pas de la HI-FI, car la musique est constituée d'impulsions et non de train d'ondes. Enfin, évidemment, tout est affaire de compromis. La seule enceinte vraiment fidèle n'est pas une enceinte, mais le baffle plan ou encore mieux l'enceinte infinie comme un mur entre deux pièces.

Ce facteur ignoré est que le HP se comporte comme un micro et produit un signal électrique qui ne se trouve pas dans le signal émis par l'amplificateur. Ce signal parasite est réinjecté dans l'amplificateur via la rétroaction. L'amplificateur va tenter de corriger, mais en retard, un signal parasite qui n'est pas de la distorsion créée par ses circuits. Je ne suis pas partisan de supprimer ou réduire drastiquement le taux de contre-réaction.

La bague en cuivre autour du noyau des bons HP de grave / médium ou à large bande diminue ce signal parasite ainsi que la distorsion dans le haut médium et l'aigu, en réduisant l'inductance de la bobine mobile. Ce truc existe depuis plus de cinquante ans mais est peu employé. En France, ATOHM utilise ce dispositif sur ses haut-parleurs de grave/médium, mais pas AUDAX, DAVIS ou FOCAL, alors que le coût est insignifiant et l'efficacité réelle.

A l'étranger, des marques comme DAYTON, PEERLESS, USHER, SCANPEEK l'utilisent sur presque toutes leurs productions.



Un des effets secondaires de rajouter une résistance en série sur les HP à Qts faible est de diminuer le retour de ce signal parasite à l'entrée de l'amplificateur.

Les transformateurs des amplificateurs à lampes font écran à ce signal parasite.