Aspects acoustiques :

Le système précédent modélise très bien un haut-parleur dans ses basses fréquences en considérant les quelques simplifications utilisées à l'exception d'une chose: Il est abstrait et est assimilé à un point infiniment petit émettant du son dans toutes les directions. Il nous faut donc lui rajouter une membrane pour créer une interaction avec le milieu ambiant.
L'influence de la géométrie du haut-parleur et l'interaction de la membrane avec l'air est primordiale car elle conditionne en grande partie sa réponse en fréquence et dans l'espace. Beaucoup d'études ont été faites sur le rayonnement acoustique d'un haut parleur, et d'autres sur les enceintes. Ce ne sont pas des problèmes triviaux car le rayonnement est tridimensionnel et dépend non seulement du haut-parleur lui-même, mais aussi de l'environnement par les obstacles rencontrés et les milieux traversés. De par cette complexité, il est très délicat de développer ici les aspects acoustiques sans quelques mathématiques et formules. Sans cela, le "parachutage" serait bien trop important et il serait difficile de saisir la physique sous-jacente des phénomènes rencontrés.
En poursuivant sur le modèle du disque bafflé que nous venons d'aborder, il importe ici d'introduire la notion d'impédance dont nous avons pu nous passer jusque lors. De manière simple, l'impédance d'un système est un ratio entre une grandeur dynamique (force, tension, pression...) et une grandeur cinématique (vitesse, courant, débit...). Elle est généralement désignée par la lettre Z:

l'Impédance mécanique $Z_m = \frac{F}{v}$, force sur vitesse, s'exprime en kg.s^{-1}

l'Impédance électrique $Z_e = \frac{U}{I}$, tension sur intensité, s'exprime en kg.m^2.A^{-2}.s^{-3}

l'Impédance acoustique $Z_a = \frac{P}{v}$, pression sur vitesse, s'exprime en kg.m^{-2}.s^{-1}

On peut voir que le passage entre l'impédance mécanique et l'impédance acoustique se fait multipliant cette dernière par une surface. Aussi, il est couramment désigné et utilisé:

l'Impédance mécanique de rayonnement $Z_{mr} = S \frac{P}{v}$, s'exprime en kg.s^{-1}

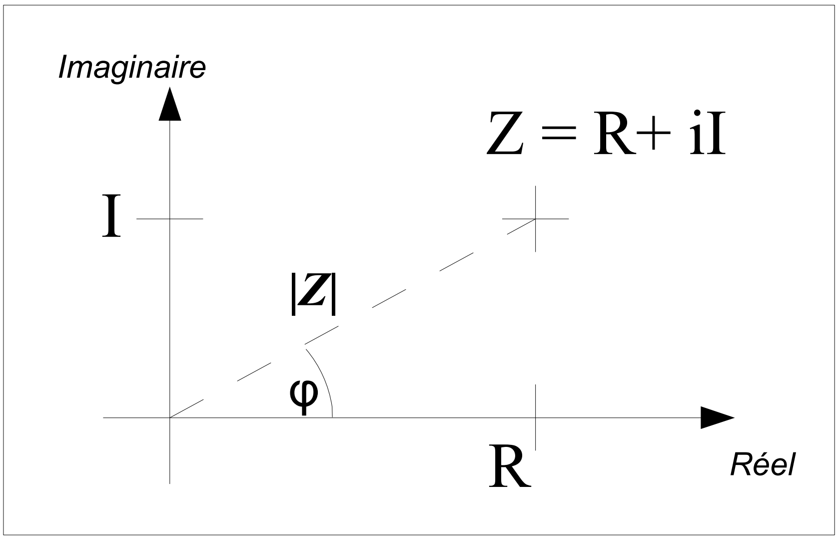
Au passage, on peut voir aussi grâce aux unités que la relation entre l'impédance mécanique et l'impédance électrique peut s'exprimer sous la forme:

$$Z_m = \frac{(B.l)^2}{Z_e}$$

Relation à rapprocher de celle du chapître précédent sur la modélisation électrique.
Comme nous pouvons le voir, il n'y a pas qu'une impédance. Toutes celles-ci sont différentes et s'expriment aussi dans des unités différentes. L'impédance n'est pas une grandeur physique absolue mais un ratio, et il y a autant d'impédances que de domaine concerné, voir de manière de considérer la question. Mais elles traduisent toutes la notion

de réponse d'un milieu à une sollicitation et le déphasage entre les deux.

L'impédance est en fait, la somme conjuguée de deux valeurs orthogonales: La résistance qui est sa composante réelle, et la réactance qui est sa composante imaginaire.
Rien à voir ici avec "rêve et réalité", réel et imaginaire sont les 2 notions permettant de définir le repère des nombre complexes. Ici aussi, "complexe" ne veux pas dire compliqué, c'est même assez simple et les nombres complexes permettent de résoudre facilement et élégament nombre de problèmes mathématiques. Comme l'impédance est un nombre complexe, elle s'inscrit donc dans un plan:



Représentation d'un nombre complexe

Ainsi, l'impédance peut être définie de deux manières: En coordonnées cartésiennes par ses composantes réelles et Imaginaires, en coordonnées polaires par ses composantes de modules et d'angle de déphasage.

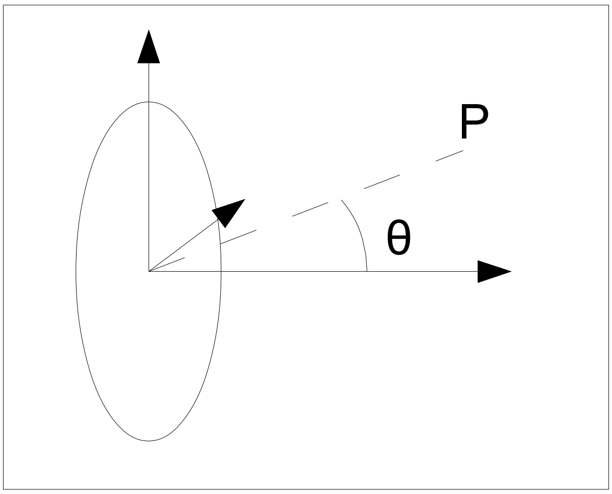
Mais ce serait déborder ici sur un domaine que l'on voulait éviter dans un tutoriel que d'approfonfir cet aspect que nous venons de résumer, déjà que nous venons de voir deux ou trois mots en "ance" qu'il était promis de contourner au maximum... Bref, on s'égare et j'invite donc le lecteur à découvrir de lui-même la magie des nombres complexes si ce n'est pas déja fait. De même, j'invite aussi le lecteur à se familiariser sur la toile avec la notion d'impédance s'il ne la maîtrise pas.

Nous allons dans ce chapître développer et discuter principalement de l'impédance acoustique qui permet de modéliser la manière dont le haut-parleur rayonne. Pour cela, la longueur d'onde est une notion incontournable: Elle est communément désignée par la lettre grecque lambda (λ) est le rapport entre la vitesse du son et la fréquence. C'est la distance dans l'air que parcours une onde sonore pendant un cycle.

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{2\pi c}{\omega}$$

c, vitesse du son dans l'air en $m.s^{-1}$

Pour modéliser l'acoustique du haut-parleur electrodynamique, il est assez usuel d'utiliser le modèle du disque plan placé dans un baffle infiniment grand. Ce cas a été résolu analytiquement et en mis en équation dans la seconde moitiée du 19eme siècle par Lord Rayleigh, un éminent savant anglais. Autant dire que la science prends de l'avance sur la technologie... Le développement et la démonstration n'ont rien à faire dans cette vulgarisation, mais il est intéressant d'en examiner les résultats pour en saisir des concepts qui seront fort utiles à d'autres aspects.



Représentation d'un disque plan bafflé infini

Notons de suite qu'il a été choisi de prendre **S_d** (surface active du haut-parleur ou du disque) comme variable élémentaire au lieu de a, le rayon du disque. Cela s'explique par le fait qu'un haut parleur a toujours une surface mais peut prendre différentes formes, auquel cas le rayon n'a plus de sens.
Du point de vue moteur et mécanique, on caractérise l'effet du rayonnement par la force à exercer pour mouvoir le disque à une intensité et une fréquence donnée. Le fait donc de déplacer la membrane du haut parleur de surface **S_d** dans l'air ambiant introduit deux grandeurs dépendantes de la fréquence qui sont respectivement les parties réelles et imaginaires de l'impédance mécanique de rayonnement du disque):

$$R_{mrd} = S_d \, \rho \, c \left(1 - \frac{J_1(2\alpha)}{\alpha}\right)$$

$$X_{mrd} = S_d \, \rho \, c \, \frac{S_1(2\alpha)}{\alpha}$$

S_d, surface du disque en m^2
ρ , densité de l'air en $kg.m^{-3}$

Avec α qui est une variable assimilable à un rapport entre dimensions du haut-parleur et longueur d'onde :

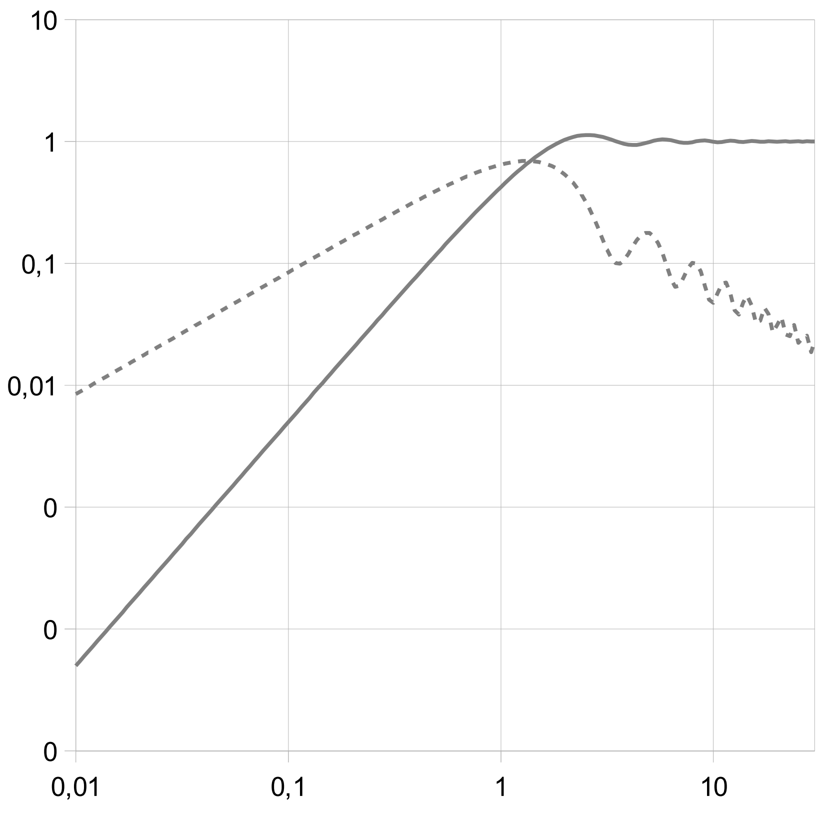
$$\alpha = \frac{a\,\omega}{c}$$

J_1 et S_1 sont deux fonctions mathématiques aux propriétés intéressantes (fonctions Bessel et Struve d'ordre 1) mais que nous n'aborderons pas ici. Elles ont fait l'objet de nombreux travaux et notons juste qu'elles sont généralement utilisées sous forme de développement limité. Nous nous sommes contenté d'utiliser les premiers termes du développement limité et de les approximer pour $\alpha < 1$, ou bien encore pour une fréquence inférieure à la fréquence de transition suivante:

$$f_{transition} = \frac{c}{2\pi a}$$

C'est à dire pour une longueur d'onde inférieure à la circonférence du disque rayonnant.

Ces grandeurs correspondent aux courbes suivantes:



Rmrdp / (Sd ρ c) (continu) et Xmrdp / (Sd ρ c) (pointillé) en fonction de α

En première approximation avec le développement limité de ces fonctions, nous pouvons écrire dans le domaine concerné:

$$R_{mrd} = S_d \, \rho \, c \, \frac{\alpha^2}{2}$$

$$X_{mrd} = S_d \, \rho \, c \, \frac{8\,\alpha}{3\,\pi}$$

R_{mrd} correspond à une force que divise une vitesse. Elle est assimilable à un terme d'amortissement mécanique et peut être imagée par la viscosité de l'air brassé par le mouvement du disque. Ce terme peut-être donc directement utilisé dans le bilan des forces comme terme amortissant ou terme résistif.

X_{mrd} divisé par la pulsation ω est directement assimilable à une masse, Cette grandeur correspond à la masse de l'air que doit mouvoir le disque.

$$M_{mrd} = \frac{X_{mrd}}{\omega} = S_d \, \rho \, \frac{8\,a}{3\,\pi}$$

Ce qui correspond physiquement et approximativement à la masse de l'air contenu dans un volume cylindrique de section Sd et de hauteur d'un peu moins que le rayon (0.85.a).

Pour conceptualiser un bilan global à partir de ce modèle de disque plan, il est usuel de considérer que la membrane d'un haut-parleur présente deux faces et que chacune contribue de façon égale à ce bilan, c'est un artifice qui marche assez bien pour la mise en équation. L'une de ces faces est généralement orientée vers l'auditeur, l'autre, vers un volume quelconque. Ces deux faces pourraient posséder le même comportement en théorie, mais dans la pratique, le haut parleur n'est pas symétrique: l'arrière de celui-ci comprend le moteur ce qui entraîne réflexions et diffractions. Néanmoins, cet aspect qui implique écarts au modèle, sera négligé pour simplifier le propos.
On pose que la masse mobile est égale à la masse au repos plus la masse d'air totale déplacée:

$$M_{ms} = M_{md} + M_{mr}$$

et dans une extrapolation à deux demi espaces, nous avons la contribution de chacune des faces de la membrane:

$$M_{mr} = 2.M_{mrd}$$

La masse M_{mr} est donc déjà comprise dans M_{ms}. On ne s'en soucie généralement pas mais il est bon de se rappeler qu'elle existe et qu'elle n'est absolument pas négligeable, juste couramant passée sous silence tout comme généralement **M_{md}** qui est la masse de l'équipage mobile au repos. M_{mr} dépend, non seulement de la surface mais aussi de la géométrie de la membrane, du cache-noyau, des suspensions... Aussi les deux faces du haut-parleurs présentent-elles des caractéristiques différentes, et on en détermine généralement la somme tout simplement par la mesure, un vrai calcul est impossible analytiquement et fastidieux numériquement.

De la même manière, pour le terme de résistance au mouvement, assimilable à la viscosité de l'air, on peut poser:

$$R_{ms} = R_{md} + R_{mr}$$

Ici aussi, en extrapolant sur deux demi-espaces:

$$R_{mr} = 2.R_{mrd}$$

R_{mr} ou R_{mrd} sont des paramètres assez particuliers: ils dépendent du carré de la fréquence. Autrement dit, il n'est "vraiment pas" fois "vraiment pas" constant et il apparaît intéressant de le confirmer en examinant quelque peu les ordres de grandeur:

	fs	Sd	Mms	Bl	Re	Rmr	Rms	Rms/Rmr	Res	Res/Rmr	Mmr
Unités	Hz	m^2	kg	T.m ou $N.A^{-1}$	Ω	$N^2.A^{-2}.\Omega^{-1}$	$kg.s^{-1}$		$kg.s^{-1}$		kg
U. normalisées	s^{-1}	m^2	kg	$kg.s^{-2}.A^{-1}.m$	$kg.m^2.A^{-2}.s^{-3}$	$kg.s^{-1}$	$kg.s^{-1}$		$kg.s^{-1}$		kg
Audax PR380T4	49	$8{,}92\ 10^{-2}$	$108\ 10^{-3}$	23,39	5,6	$8{,}4\ 10^{-1}$	8,2	10	97,7	**120**	**$3{,}0\ 10^{-2}$**
Audax PR240T0	90	$3{,}44\ 10^{-2}$	$25\ 10^{-3}$	7,95	3,4	$4{,}2\ 10^{-1}$	4,14	10	18,6	**45**	**$7{,}4\ 10^{-3}$**
Audax PR170Z0	185	$1{,}4\ 10^{-2}$	$6{,}2\ 10^{-3}$	10	6,2	$3{,}0\ 10^{-1}$	2,6	10	16,2	**55**	**$1{,}9\ 10^{-3}$**
Audax HM170Z0	40	$1{,}38\ 10^{-2}$	$9{,}9\ 10^{-3}$	6	6,2	$1{,}4\ 10^{-2}$	0,4	30	5,8	**450**	**$1{,}8\ 10^{-3}$**
Audax AT080M0	82	$0{,}29\ 10^{-2}$	$2{,}5\ 10^{-3}$	2,85	6,1	$2{,}5\ 10^{-3}$	0,58	220	1,33	**500**	**$1{,}7\ 10^{-4}$**

On peut voir tout d'abord dans le cas de ces haut-parleurs que M_{mr} correspond grossièrement à 10% de la masse mobile, ce n'est pas négligeable et ce paramètre peut varier en fonction de la géométrie de la membrane du haut-parleur, du bafflage et de l'environnement.

Il faut surtout retenir que la vraie masse du matériel au repos est M_{md} mais que la masse mobile en fonctionnement est M_{ms}, celle celle qui est donc vraiment utile. Le fait que ces deux paramètres liés à l'impédance de rayonnement soient généralement passés sous silence s'explique par le fait que les mesures se font bien sûr dans l'air (tant il est vrai que dans le vide il est impossible d'avoir du son) et il est donc difficile de dé-corréler les paramètres mécaniques des paramètres acoustiques (sauf en mesurant l'impédance du haut-parleur dans le vide par exemple).

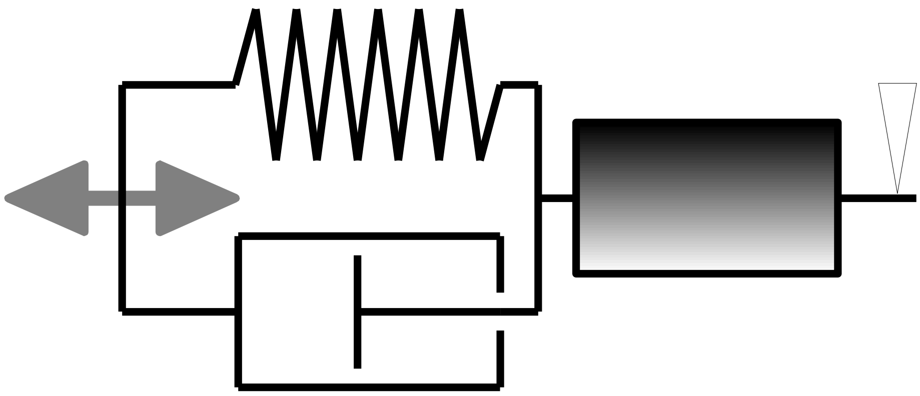
C’est pourquoi M_{ms} comprend ipso-facto masse acoustique et masse de l’équipage mobile. Ce paramètre est bien suffisant pour déterminer les différents comportement aux basses fréquences.

On peut voir aussi qu'à la fréquence de résonance, R_{mr} est très petit devant R_{es}, entre 50 et 500 fois plus petit. Cet effet est plus marqué avec les haut-parleurs de faible rendement et basse f_s. Il est est donc de même pour R_{ms} qui inclue R_{mr}
Ceci montre qu'avec ce type de haut-parleurs et dans les limites posées, le facteur d'amortissement acoustique n'a pas à être pris en considération car sa contribution à l'amortissement est négligeable (et probablement en dessous des erreurs de mesure et des divergences des caractéristiques des produits à la fabrication).

Ainsi pour les relatives basses fréquences dans lesquelles opèrent le modèle, la contribution de la partie acoustique peut se résumer à l'introduction d'une masse acoustique qui est généralement passée sous silence et occultée lors des mesures.
Il en est de même pour la résistance au mouvement aux basses fréquences.

Un point important: Les approximations faites et qui permettent aussi d’introduire des notions de masse et de viscosité en ce qui concerne l’air, ne le sont que pour une circonférence de haut-parleur inférieure à la longueur d’onde. Ceci est une des premières limitations de ce modèle : Il ne vaut que pour les basses fréquences d'un haut-parleur et plus le haut-parleur est grand, plus cette fréquence sera basse.
Mais attention! Cette modélisation marche tout aussi bien pour des tweeters, sa limite haute n'est pas fonction uniquement de la fréquence mais de la corrélation entre géométrie et dimensions du haut-parleur et fréquence.

D’où maintenant,le modèle suivant, strictement identique à celui développé pour l'électromagnétisme mais avec l'introduction de deux relations:



Avec

$$R_{total} = R_{ms} + \frac{B^2 l^2}{R_e} = R_{ms} + R_{es} = R_{md} + R_{mr} + R_{es}$$

et

$$M_{ms} = M_{md} + M_{mr}$$

Soit donc la somme de la masse au repos et de la masse du rayonnement acoustique.
En ayant toujours en qualité de terme de raideur de ressort:

$$C_{ms}$$

Qui n'est introduit que mécaniquement.

Bibliographie

[1] "Traité d'Électricité Volume XXI / Électroacoustique". Par M.Rossi. Presse Polytechnique Romande

[2] "Acoustics". Par L. L. Beranek. 1993 Edition

[3] "Fundamentals of acoustic". Par L. E. Kinsler.

[4] "Lexique d'acoustique". Par X. Boutillon, R. Caussé, A. Chaigne, B. Fabre, J. Gilbert.

[5] "Approximation of the Struve function H1 occuring in impedance calculation". Par M. Aarts & A. J. E. M. Janssen. J. Acoust. Soc. Am., Vol. 113, No. 5, 2003.

… et d'autres bribes glanées sur la toile sans conservation du lien …