

Haut-parleurs électrodynamiques : défauts des moteurs classiques, performances des moteurs sans fer

Résumé

Cet article rappelle les différentes sources de non-linéarités des haut-parleurs électrodynamiques, en insistant sur celles qui sont induites par la présence du fer, notamment l'effet réticent. Il décrit également une structure de haut-parleur qui a été construite et testée au Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine (LAUM) et qui est une structure sans fer. L'absence de fer permet naturellement d'éliminer tous les défauts classiques qui sont liés à ce dernier. L'équipage mobile est assimilé à un piston. La structure présentée supprime aussi la suspension classique au profit d'un joint de ferrofluide et d'une cavité arrière assez petite s'affranchissant par là aussi des défauts afférents aux suspensions.

Abstract

This paper presents the different sources of non linearities in the classical electrodynamic loudspeakers. The nonlinearities induced by the iron are pointed out, and especially the reluctant effect. This paper also describes an ironless loudspeaker structure, which has been designed and tested at the au Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine (LAUM). The absence of iron allows to get rid of all the related drawbacks. The moving part is piston-like. The classical suspension disappears too in the presented structure and is replaced by a ferrofluidic seal and a rather small rear cavity. Therefore the drawbacks linked to the classical suspensions disappear as well.

Guy Lemarquand, Valérie Lemarquand
Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine
Avenue Olivier Messiaen
72085 Le Mans CEDEX 9
Tél. : 02 43 83 32 70
Fax : 02 43 83 35 20
E-mail : laum@univ-lemans.fr

Le domaine de la reproduction sonore est en quête incessante d'améliorations pour créer des environnements sonores toujours plus performants, intégrant le mieux possible le haut-parleur et son enceinte.

Que demande-t-on à un haut-parleur ? On le voudrait puissant, fidèle, mais toujours plus petit, plus léger, moins coûteux et avec une qualité acoustique accrue... !

La puissance est liée au débit acoustique, donc au produit du déplacement par la section de la surface émissive. Si on veut diminuer la taille pour une même puissance, alors il faut augmenter le déplacement de l'équipage mobile. Et dans une structure classique, augmenter le déplacement de la bobine est synonyme d'augmentation d'effets non linéaires et donc de distorsions [1]. En outre, le déplacement est inversement proportionnel à la masse de l'équipage mobile. Donc si on veut de grands déplacements, il vaut mieux avoir une masse faible.

Pour avoir une bande passante correcte en basses fréquences, il faut un volume arrière important, ce qui ne va pas dans le sens d'une diminution de la taille. La fréquence de résonance est inversement proportionnelle à la racine carrée du rapport de la raideur de la suspension sur la masse de l'équipage mobile. On veut une fréquence basse, donc un rapport raideur/masse important. Or, on veut aussi une masse faible, ce qui conduit à choisir une raideur très

faible, donc des suspensions très souples pour éviter une enceinte volumineuse.

Dans un haut-parleur classique, le poids du fer représente entre la moitié et les deux tiers du poids total. L'énergie spécifique des aimants ferrites utilisés est de 30 kJ/m^3 , quand il existe à l'heure actuelle des aimants ayant une énergie spécifique atteignant 550 kJ/m^3 ...

Quant à la qualité acoustique, de nombreuses études ont mis en évidence un certain nombre d'imperfections des haut-parleurs. Il y en a quatre sources principales : les défauts de linéarité du moteur, la propagation acoustique, le comportement viscoélastique des suspensions, les modes de vibrations de la surface émissive et de l'équipage mobile [2,3].

Ces quelques remarques liminaires permettent de constater qu'il est primordial de comprendre comment chaque élément constitutif participe aux qualités et défauts des haut-parleurs. Nous commencerons donc par cet aspect. Elles conduisent également à remettre en question un certain nombre de choix de ces éléments (et ce sera encore plus évident après la description de l'origine des défauts) et nous conduiront à la présentation de nouveaux concepts, qui, permettant de s'affranchir de certains défauts peuvent s'avérer... «MAGIC» !

Les sources de défauts des haut-parleurs électrodynamiques classiques

Le moteur

Structure classique

La structure du haut-parleur électrodynamique classique à aimant ferrite est illustrée sur la figure 1. Le moteur est constitué d'un aimant permanent annulaire, aimanté axialement, de pièces polaires et de plaques de champ en fer, d'une bobine de fil de cuivre ou d'aluminium, portée par un support mobile solide du cône émissif. La bobine est plongée dans l'entrefer du circuit magnétique constitué par l'aimant et le fer. Nous présentons une structure à bobine longue : un tiers seulement de sa longueur est effectivement dans l'entrefer, en face des plaques de champ.

La loi de Laplace est souvent utilisée pour expliquer en première approximation le fonctionnement du moteur. Elle lie la force, F , exercée sur la bobine, à l'induction magnétique créée par l'aimant et au courant, i , circulant dans la bobine. Elle s'écrit : $F = Bli$ où B est la valeur moyenne de l'induction dans la bobine, et l est la longueur du fil de cuivre soumis au champ magnétique.

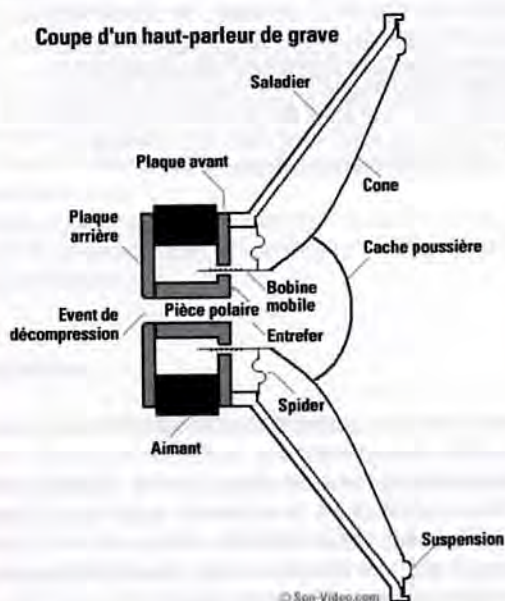


Fig.1 : Structure classique de haut-parleur électrodynamique

Elle signifie que lorsque la bobine est parcourue par un courant, la partie plongée dans le champ magnétique est soumise à une force qui fait se déplacer la bobine. Comme la bobine est solidaire du cône, ce dernier se déplace aussi et crée une onde acoustique. Il y a donc transformation d'un signal électrique en un signal sonore. Le haut-parleur est d'autant meilleur que la transformation est linéaire.

Dans l'approche électroacoustique classique, si on considère que le courant, i , varie sinusoïdalement dans le temps à la fréquence f , au-dessus de la fréquence de résonance, le déplacement x de la bobine est proportionnel à la force de Laplace et de direction opposée. Le déplacement peut être décrit au premier ordre par : $x = -(Bli)/m(2\pi f)^2$, où m est la masse de la partie mobile (modèle de Thiele et Small).

La véritable explication du fonctionnement du haut-parleur est toutefois un peu plus compliquée. En effet, il ne faut pas oublier que la force exercée sur la bobine est en fait due à l'interaction de deux champs magnétiques : le champ créé par l'aimant permanent et le champ créé par la bobine elle-même, quand elle est alimentée. La force devrait donc être calculée à partir de l'énergie emmagasinée dans l'entrefer [4].

Les aimants permanents, sources statiques de champ magnétique

L'aimant permanent est une pièce fixe du moteur qui crée un champ magnétique indépendant du temps. Les aimants les plus fréquemment utilisés sont des ferrites durs, ferrites de baryum ou ferrites de strontium. Leur principal intérêt est leur faible coût. Leurs performances, quant à elles, sont modestes, avec une aimantation rémanente, B_r , de l'ordre de 0,4 teslas (T), une énergie spécifique, BH_{max} , de 30 kJ/m³ et un champ coercitif, H_c , de 200 à 300 kA/m. Rappelons ici que B_r est un indicateur du champ magnétique maximum que l'aimant pourra créer dans un circuit, que BH_{max} correspond à l'énergie emmagasinée dans l'aimant (et qu'il pourra restituer), permettant de quantifier la «puissance de l'aimant», et que H_c est le champ magnétique auquel il faut soumettre un aimant pour le désaimanter.

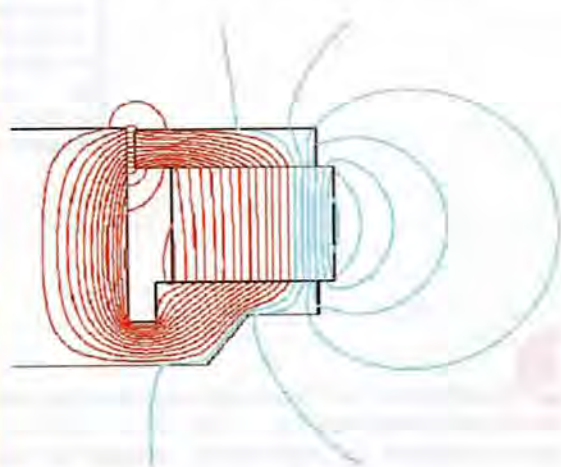


Fig. 2 : Lignes de champ créées par l'aimant dans le moteur

La nature des aimants choisis influe sur la forme du moteur. Ainsi, les premiers haut-parleurs utilisaient des aimants Alnico, qui ont un grand B_r (0,8 à 1,3 T), un BH_{max} de l'ordre de 50 kJ/m³, mais un H_c faible (50 à 160 kA/m) qui imposait de les utiliser sous forme de barreaux allongés situés axialement au centre du moteur, et qui conduisait à des haut-parleurs de hauteur assez importante. Cet inconvénient et le prix très élevé des Alnico ont conduit à leur abandon au profit des ferrites, dans les années 60.

Ces derniers étant plus difficiles à désaimanter ont permis une utilisation sous forme d'anneaux de section à peu près carrée, donnant jour à la structure classique présentée ici. Le dispositif est ainsi plus compact en hauteur, qualité appréciée pour les haut-parleurs de voiture.

La figure 2 montre où passe le flux magnétique créé par les aimants permanents dans la structure. L'espacement des lignes est une image de l'intensité du champ. Le

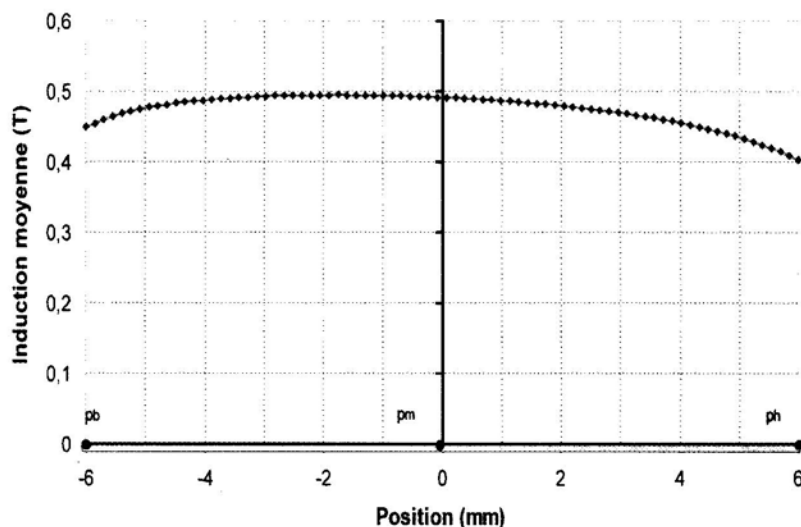


Fig. 3 : Valeur moyenne du champ magnétique dans une bobine longue se déplaçant dans l'entrefer en fonction de la position de la bobine

flux magnétique créé est canalisé par les pièces en fer et traverse l'entrefer dans lequel on mettra la bobine. Toutefois, une partie importante du flux de l'aimant se referme à l'extérieur du moteur, on parle de flux de fuite. Ce flux est «perdu» pour le fonctionnement du moteur, et éventuellement gênant pour l'environnement du haut-parleur. Les écrans cathodiques ou autres ne l'apprécient guère... L'existence du flux de fuite, qui représente environ les deux tiers du flux total, montre aussi que l'aimant est mal utilisé, puisqu'un tiers suffirait au même fonctionnement du haut-parleur.

Les ferrites ne sont pas les seuls aimants disponibles sur le marché. Les années 80 ont vu l'apparition des aimants terres rares, qui représentent un énorme progrès en termes de performances. Les aimants de type Samarium Cobalt atteignent aujourd'hui un $BH_{\max}$ de 160 à 250 kJ/m³ avec $B_r = 0,9$ à 1,2 T et $H_c = 2\,000$ à 1 000 kA/m. On trouve actuellement sur le marché des aimants de type Fer Néodyme Bore, qui sont les plus puissants, ayant un $BH_{\max}$ pouvant atteindre 550 kJ/m³, avec $B_r = 1,4$ T et H_c jusqu'à 1 000 kA/m. Les aimants terres rares ont toujours été chers par rapport aux aimants ferrites. Cependant, leur puissance, la baisse de leurs prix et l'agressivité commerciale des producteurs chinois conduisent naturellement à reconsidérer la possibilité de les utiliser et à réfléchir à des évolutions des structures magnétiques, afin d'exploiter au mieux leur formidable énergie.

Les défauts magnétiques des structures classiques

Champ créé par l'aimant

Le flux de fuite est un inconvénient d'ordre plutôt économique. Mais certains phénomènes liés au magnétisme s'avèrent beaucoup plus gênants, car ils sont sources de distorsions.

L'examen des lignes de champ dans la structure montre que l'induction magnétique n'est pas constante dans l'entrefer. Quand la bobine se déplace, l'induction totale dans la bobine n'est pas la même si la bobine est en position haute ou en position centrée. Il s'ensuit que le facteur de force du

haut-parleur, Bl , n'est pas le même pour toutes les positions de la bobine (Fig. 3). La conséquence est une distorsion qui ressemble à un effet de compression du signal. Cette distorsion ne dépend que de la position de la bobine dans l'entrefer et n'est effective que pour les grands déplacements de la bobine.

Champ créé par la bobine

La deuxième source de champ magnétique dans le moteur est le courant circulant dans la bobine. Le champ créé varie dans le temps, puisque c'est une image du courant, donc du signal à reproduire. Ce champ se referme, lui aussi par les pièces en fer (Fig. 4). Si on néglige la saturation du fer, le flux magnétique est proportionnel au courant et son sens est donné par celui du

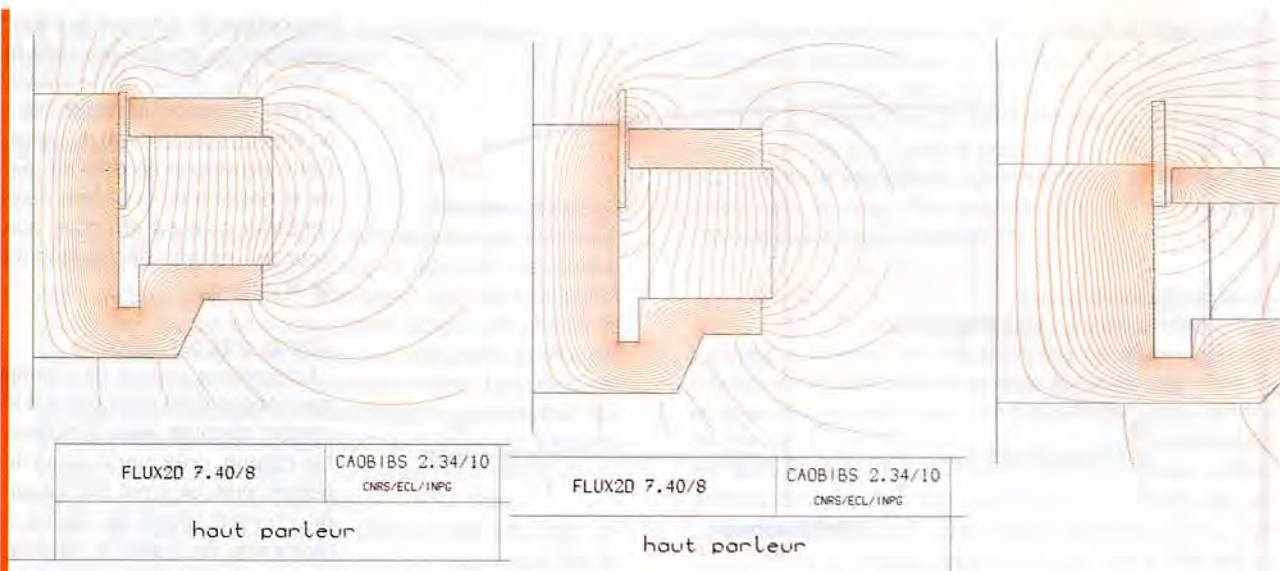
courant. La valeur totale du flux et sa répartition spatiale dépendent de la position de la bobine dans l'entrefer. La Fig. 4 illustre cela pour trois positions de bobine (haute, centrée, basse dans l'entrefer). En fait, le flux suit toujours le chemin magnétique le plus «facile», celui de réluctance la plus faible dans un circuit donné. On peut quantifier la facilité qu'a le flux à circuler par la valeur de la réluctance. Ainsi, on constate que le flux se referme plus difficilement quand la bobine est en position haute : la réluctance du circuit est plus grande pour la bobine haute que pour la bobine centrée. La réluctance dépend de la géométrie du circuit et de la perméabilité magnétique des matériaux le constituant (fer, air, aimant).

D'autre part, l'induction magnétique, B_{bobine} , définit l'inductance électrique, L_e , de la bobine : $L_e = (nS B_{\text{bobine}})/i$, où n est le nombre de spires de la bobine, S sa section. Le terme $n S B_{\text{bobine}}$ représente le flux propre de la bobine. L'inductance électrique est un paramètre facilement accessible par la mesure. Sa valeur peut être relevée à l'aide d'un pont de mesure pour différentes positions de la bobine, l'équipage mobile étant bloqué pour chaque position.

L'inductance est inversement proportionnelle à la réluctance (le coefficient est le carré du nombre de spires). La position correspondant à la réluctance minimale est celle d'une bobine légèrement à l'intérieur du moteur. C'est donc la position d'inductance maximale. Comme la réluctance du circuit magnétique dépend de la position de la bobine, l'inductance de cette dernière dépend aussi de la position de la bobine.

La variation d'inductance conduit à une force réluctante, $F_{\text{réluctante}}$, qui agit sur la bobine.

En effet, on peut exprimer l'énergie magnétique, E , dans la bobine par : $E = L_e i^2 / 2$, et la force réluctante, $F_{\text{réluctante}}$, est obtenue en dérivant cette énergie par rapport à la position de la bobine. Cette force est une force de rappel vers la position d'inductance maximale. Elle est proportionnelle au carré du courant.



(a) Bobine basse

(b) Bobine centrée

(c) Bobine haute

Fig. 4 : Lignes du champ créé par la bobine

La force motrice totale à laquelle est soumise la bobine est donc la somme des deux forces, force de Laplace et force réluctante. On peut noter que la force de Laplace est toujours de même sens que le courant, la force réluctante quant à elle est toujours une force de rappel. Il est important de bien noter que la force réluctante est liée à la présence de fer dans le circuit magnétique.

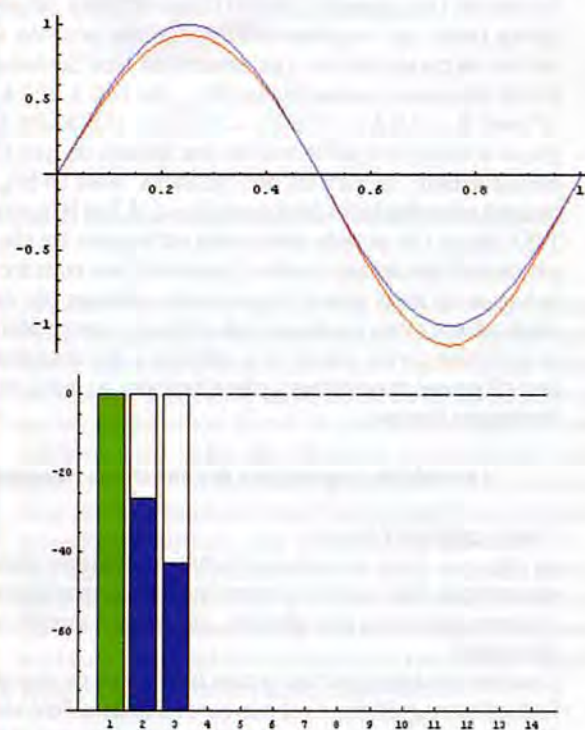
La force totale s'exprime sous la forme suivante : $F_{\text{moteur}} = Bli(1 - d^*i - a^*ix)$, où d^* et a^* sont proportionnels à la valeur maximale de l'inductance et liés aux variations de réluctance.

Lorsqu'on alimente la bobine par une tension sinusoïdale de fréquence f_1 et qu'on suppose la bobine en position d'inductance maximale, si on ne considère que la force de Laplace, on en déduit que la force appliquée à la bobine est elle aussi sinusoïdale, de même fréquence. Le spectre de la force ne contient qu'une fréquence, f_1 . Si on tient compte de la force réluctante, l'allure temporelle de la force est modifiée et l'on voit apparaître une composante spectrale de la force correspondant à l'harmonique trois de la fréquence d'alimentation. Si de plus, on prend le décentrement de la bobine en compte, (c'est-à-dire quand la position de repos, qui correspond au point d'équilibre de la suspension, ne correspond pas à la position d'inductance maximum), on voit apparaître en plus de l'harmonique trois l'harmonique deux de la fréquence initiale (Fig. 5).

Quand la bobine est alimentée par une tension composée de plusieurs sinusoïdes de fréquences différentes, on observe une modification plus importante de l'allure temporelle de la force totale par rapport à la force de Laplace seule. Le spectre de la force totale fait apparaître non seulement les harmoniques deux et trois des fréquences initiales, mais également des composantes d'intermodulation (combinaison par sommes et différences des fréquences de base et

de leurs harmoniques). La figure 6 montre le cas de l'alimentation par trois sinusoïdes de fréquences différentes d'une bobine décentrée. Sur les figures représentant le spectre, le vrai signal correspond aux raies vertes, les raies bleues, ajoutées, le brouillent.

On peut donc voir, sur ces exemples très simples, que la force réluctante est une source importante de distorsion du signal dans un haut-parleur électrodynamique classique.

Fig. 5 : Force en fonction du temps
Spectre en dB

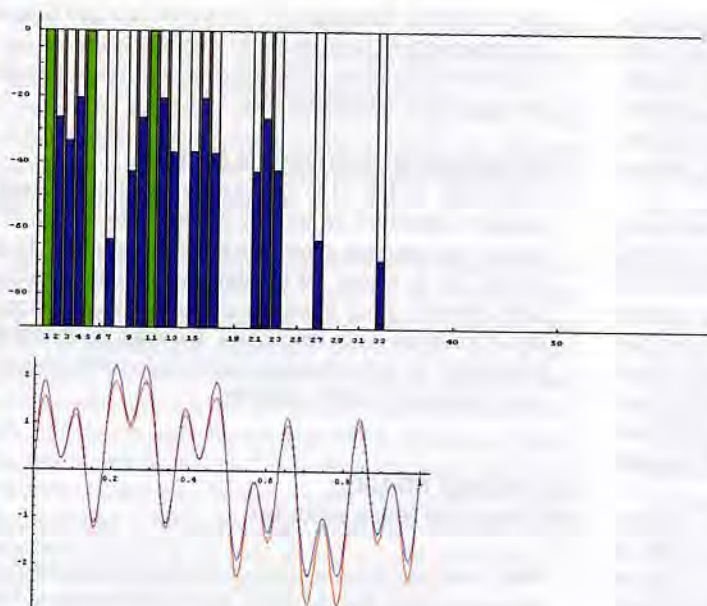


Fig. 6 : Force en fonction du temps
Spectre en dB

À hautes fréquences, le terme prépondérant de l'impédance électrique est l'inductance. Considérons que la bobine est alimentée par une tension sinusoïdale, pour créer un mouvement sinusoïdal. Pendant le mouvement, comme la position de la bobine varie, l'inductance varie, donc l'impédance de la bobine varie et le courant dans la bobine n'est plus proportionnel à la tension sur une période. Il y a apparition d'harmoniques de courant et donc de force. Ce phénomène est d'autant plus sensible pour les haut-parleurs qui ont une valeur nominale d'inductance élevée (ce qui correspond entre autres à une bobine ayant un nombre de spires élevé.) De plus, la tension réelle alimentant le haut-parleur contenant *a priori* de nombreuses fréquences, les termes d'intermodulation deviennent vite très nombreux, et correspondent en outre à une distorsion non harmonique.

L'expression de la force totale met l'accent sur l'importance du modèle de l'inductance. En fonction des valeurs des paramètres a^* et d^* , le poids relatif de chaque terme varier beaucoup, et ainsi, la façon dont la force dépend du déplacement et de la valeur instantanée du courant (un terme peut devenir prépondérant devant l'autre). On constate aussi que l'allure de la force peut s'éloigner beaucoup de l'allure de la force de Laplace. Plus le courant est grand, ou plus le déplacement est important, et plus la différence est grande.

L'effet réactif est prépondérant à basses fréquences. Il est très nuisible quand des notes basses, qui correspondent à de grands déplacements, sont superposées à des attaques, qui correspondent à de grands courants, car alors les détails du son sont perdus.

Rôle du fer

Nous avons vu que le fer était utilisé pour canaliser le flux magnétique et guider ce dernier pour qu'il passe dans l'entrefer du moteur. On exploite ici le fait que le fer est un matériau ferromagnétique doux, qui a une

perméabilité magnétique relative importante, ce qui permet aux portions de circuit magnétique correspondantes d'avoir une réluctance faible. Le fer joue d'autant mieux son rôle que sa perméabilité magnétique relative est élevée. Il faut donc être attentif aux propriétés du matériau choisi et à leur préservation. En effet, le fer doux pur n'ayant pas les qualités mécaniques requises pour un usinage facile, on emploie des aciers magnétiques, et la teneur en carbone de l'alliage a une influence sur sa perméabilité. En outre, il faut prendre garde à la méthode de mise en œuvre de l'acier. Le matriçage ou l'usinage du matériau, par les contraintes mécaniques auxquelles ils le soumettent, peut altérer grandement ses propriétés magnétiques. Il faut généralement effectuer un recuit des pièces après formage afin de libérer les contraintes mécaniques et préserver les propriétés magnétiques.

Le dessin des pièces en matériau doux doit aussi être fait de façon que le matériau ne soit pas saturé magnétiquement, en certains endroits du circuit magnétique. Car si le matériau est saturé, sa perméabilité magnétique relative apparente décroît, la réluctance correspondante augmente et le matériau ne joue plus son rôle de guide

flux. La saturation correspond à une valeur d'induction de l'ordre de 1,5 à 2 teslas selon le matériau doux utilisé. Dans la structure présentée, avec un aimant ferrite, les calculs montrent qu'il y a des zones de saturation, donc qu'on est à la limite d'une mauvaise utilisation du fer. Or, s'affranchir de ces zones passe souvent par une augmentation des sections de fer et donc un alourdissement de la structure totale. Notons que l'utilisation d'aimants plus performants, d'aimantation rémanente trois à quatre fois supérieure, rendra l'utilisation du matériau doux encore plus délicate, car on sera toujours très proche de saturer le matériau. La saturation constitue une limitation du facteur de force. De plus, si le fer est saturé, le flux propre de la bobine n'est plus proportionnel au courant, et l'inductance dépend alors aussi du courant dans la bobine. La non-linéarité en est encore accrue.

Courants de Foucault

Le «fer» - dans le sens du matériau ferromagnétique doux choisi pour guider le flux magnétique - a aussi des propriétés électriques et il est conducteur. La conséquence directe est que les pièces polaires et les plaques de champ vont être le siège de courants de Foucault. Les courants de Foucault ont deux causes : la variation temporelle du courant dans la bobine et le déplacement de la bobine.

L'une comme l'autre a pour effet de faire varier le flux magnétique dans le circuit. Entre alors en jeu une loi bien connue des physiciens, la loi de Lenz, selon laquelle des phénomènes apparaissent pour s'opposer à la cause qui leur a donné naissance. Ici, des courants vont apparaître dans le matériau doux, afin de créer un champ magnétique supplémentaire qui s'oppose aux variations du champ créé par la bobine (le renforcer si le champ de la bobine décroît, le diminuer s'il augmente). Le résultat visible est que le flux magnétique total diminue et la réluctance du circuit augmente. L'inductance électrique apparente de la bobine diminue (Vanderkooy [5] propose de modéliser cela par

une impédance variant comme $\sqrt{\omega}$ et sa résistance apparente augmente pour les hautes fréquences. Cela conduit à un comportement non linéaire, car si le module de l'impédance électrique n'est guère modifié, la phase, elle, varie beaucoup. Si la bobine est alimentée en tension, on observera une intermodulation au niveau des phases des signaux.

D'autre part, les courants de Foucault interagissent avec le courant dans la bobine, ce qui crée une force de traînée proportionnelle à la vitesse de la partie mobile (de la bobine) et au carré de la valeur instantanée du courant dans la bobine. Le mouvement de la bobine est ralenti par cette force de traînée électromagnétique. La force totale exercée sur la bobine diminue, mais cette diminution n'est pas uniforme au cours du temps. Elle est particulièrement marquée pour les pics de courant ou de vitesse, et conduit ainsi à un comportement très non linéaire.

Les courants de Foucault apparaissent donc à haute fréquence, car alors le courant dans la bobine varie à fréquence élevée, mais ils apparaissent aussi à basse fréquence, car dans ce cas, c'est la vitesse de déplacement qui est grande.

En outre, la présence de courants de Foucault peut conduire à une instabilité dynamique de l'équipage mobile. Ce dernier est stable axialement, mais instable radialement, l'instabilité radiale pouvant amener l'équipage mobile à frotter contre les pièces polaires.

Le rayonnement acoustique

De nombreux travaux sont menés à l'heure actuelle sur le rayonnement acoustique de la surface émissive, beaucoup d'entre eux reposant sur de la simulation numérique. Beaucoup d'études se concentrent sur le cas du « piston » (surface émissive rigide), afin de décrire l'influence de sa forme sur le rayonnement, les phénomènes de diffraction sur les bords, ceux de réflexion sur le baffle. Une difficulté n'est pas levée : la question de savoir quelle est l'onde émise par la suspension, qui est souple et déformable, constitue un sujet très complexe. C'est un phénomène gênant en pratique, en particulier pour les haut-parleurs de graves à grands déplacements, puisque la surface de la suspension est importante et donc sa puissance acoustique rayonnée l'est aussi.

Les travaux menés sur la propagation des sons [6] mettent en évidence que les équations de propagation du son sont intrinsèquement non linéaires. Une des conséquences pratiques est que pour les forts niveaux d'émission il y a nécessairement distorsion et intermodulation non harmonique.

Les suspensions

Les suspensions classiques sont généralement réalisées en caoutchouc, en tissu imprégné ou en plastique moulé. Elles se comportent comme des ressorts, mais leur raideur est non linéaire. Cela signifie que leur compliance, C_{ms} , dépend de l'amplitude du mouvement, et que l'amortissement, R_{ms} , dépend et de l'amplitude et de la fréquence des déplacements. Le comportement des suspensions et du spider est très non linéaire et complexe.

Ce sujet a été étudié et approfondi par un certain nombre d'auteurs. Klippel [3] s'intéresse aux non linéarités observées lors des grands déplacements, pour lesquels la raideur n'est

pas constante. Rousseau [7] s'intéresse aux non linéarités qui apparaissent pour de petits déplacements autour de la position d'équilibre, cette position constituant une sorte de « point dur » difficile à quitter.

Les vibrations de la surface émissive

L'équipage mobile et la surface émissive présentent un nombre important de modes propres (de flexion et de torsion) qui peuvent s'avérer très gênants quand ils sont excités par le signal. De nombreuses études spécifiques sont menées pour identifier ces modes et concevoir des structures dans lesquelles, à défaut de disparaître totalement, ils sont repoussés dans un domaine fréquentiel où ils deviennent moins gênants.

Le concept MAGIC : des haut-parleurs sans fer

Nous avons décrit les sources de non-linéarité des structures classiques des haut-parleurs électrodynamiques. Parmi les démarches possibles pour diminuer les non-linéarités, la nôtre a été de supprimer certaines de leurs causes. Le fer est une source importante de non-linéarités ? Nous proposons des structures qui ne contiennent pas de fer [8-10]. Elles sont totalement MAGIC, MAGnetic Ironless Concept !

Les moteurs que nous allons décrire sont donc sans fer, constitués exclusivement d'aimants permanents. En l'absence de fer, l'effet réluctant disparaît, car les aimants ont une perméabilité magnétique relative pratiquement égale à un, ce qui signifie qu'ils ont le même comportement magnétique que le vide. L'inductance électrique, le, de la bobine est en conséquence très faible, et elle reste parfaitement constante pour toute position de la bobine. En outre, on choisit une bobine courte, afin qu'elle soit entièrement dans la zone d'induction uniforme. Le facteur de force en est augmenté. Il n'y a plus de limitation liée à la saturation du fer. De plus, les aimants permanents sont électriquement peu conducteurs : les courants de Foucault sont donc quasiment supprimés (ce n'est que pour les tweeters que le phénomène peut subsister si on n'y prend garde).

Le moteur

La structure la plus simple

La structure la plus simple (Fig. 7-a) est constituée de deux disques d'aimant permanent, aimantés axialement. Les deux disques sont placés l'un au-dessus de l'autre, concentriques, séparés axialement par un espace rempli d'air, les aimantations étant en répulsion (les pôles de même nature se font face). La bobine est extérieure aux disques, et centrée en face de l'espace séparant les disques. Elle est ainsi traversée par un flux radial.

Cette structure a l'avantage d'être extrêmement simple, comportant très peu de pièces, ne requérant aucun usinage particulier des aimants. L'aimantation axiale de ces derniers est aussi la plus facile à réaliser. Une telle structure se prête bien à la réalisation de transducteurs miniatures.

Le revers de la très grande simplicité est que la structure présente des fuites magnétiques importantes, et que la zone dans laquelle l'induction créée est uniforme est très étroite.

Ce dernier point implique que cette structure est adaptée pour des transducteurs où la bobine a un petit déplacement, donc pour les hauts medium et les tweeters.

Dès que le diamètre du haut-parleur augmente, il est économiquement plus intéressant d'utiliser des aimants annulaires ou, pour éviter de les usiner, des bagues portant des tuiles aimantées radialement.

Exemple d'évolution : pour augmenter le facteur de force

La figure 7 présente diverses structures de moteurs sans fer. Elle permet d'illustrer, de façon non exhaustive bien sûr, la diversité de réalisation du concept. Parmi ces exemples, certaines structures de moteurs sans fer sont plus simples que d'autres ou utilisent moins d'aimant, mais les caractéristiques diffèrent aussi d'une structure à l'autre, en termes de fuites ou d'uniformité de l'induction dans l'entrefer. Selon que l'une ou l'autre des caractéristiques apparaît plus importante, et qu'on essaye de chercher la meilleure structure vis-à-vis de cette caractéristique, on arrive à des structures optimales différentes.

Si c'est le facteur de force qu'on cherche à augmenter et surtout à rendre constant sur la plus grande zone possible de déplacements de la bobine, alors c'est une structure du type de celle de la Fig. 7-d qu'il faut adopter. Le moteur est constitué de l'empilement de trois bagues porteuses d'aimants d'aimantations radiales, toutes de même direction centripète (ou centrifuge). La bobine est interne au cylindre d'aimants. C'est une bobine courte, dont la hauteur est une fraction de la hauteur de l'aimant central. La particularité de ce moteur réside dans le fait que les aimants de la bague centrale n'ont pas la même aimantation rémanente que les aimants des deux bagues d'extrémité. Cette famille de structures fait actuellement l'objet des travaux de thèse de Benoît Merit au LAUM. L'induction magnétique dans l'entrefer de ce type de moteur est uniforme sur toute la hauteur de l'aimant central, donc le facteur de force est constant sur toute cette zone. C'est la structure la plus efficace de ce point de vue.

Si on s'intéresse plus à l'aspect «fuites magnétiques», on choisira une structure à aimants prismatiques, car elle est rigoureusement sans fuites.

En termes de poids, les aimants sont aussi lourds que le fer. Mais supprimer le fer et faire travailler l'aimant dans de

meilleures conditions (choix de son point de fonctionnement, conditions optimales si structure sans fuites) permettent de diminuer environ par trois le volume d'aimants par rapport à une structure classique. Sans fer et avec trois fois moins d'aimant, la structure obtenue est beaucoup plus légère qu'une structure classique, et la puissance massique nettement augmentée !

La suspension et les joints ferrofluides

La suspension classique disparaît. Elle est remplacée par deux joints en ferrofluides, qui ont un rôle multiple. Rappelons ici que les ferrofluides sont des solutions colloïdales, dans lesquelles des grains de matériau magnétique (souvent de la magnétite, Fe_3O_4) baignent dans un liquide, eau, huile, hydrocarbure, solvant organique. Comme il s'agit d'une solution colloïdale, on ne peut pas séparer le fluide des grains. Ces matériaux ont des propriétés magnétiques, liées à celles des grains, et viscoélastiques, liées au liquide. Leur comportement est très complexe, relevant de la magnétohydrodynamique.

Les joints ferrofluides sont «fixés» aux extrémités du moteur par les gradients de champ magnétique qui existent à la frontière axiale aimant-air. Les grains sont attirés par les gradients et comme le fluide est «piégé» autour des grains, le ferrofluide reste dans ces zones. L'équipage mobile glisse sur le joint. La raideur axiale du dispositif est nulle. Les propriétés magnétiques du matériau permettent au joint d'assurer le guidage et le centrage de l'équipage mobile. L'utilisation d'un ferrofluide permet d'obtenir le centrage statique, mais aussi le centrage dynamique. Les propriétés du liquide créent l'étanchéité entre les faces du haut-parleur. Le ferrofluide contribue également à l'évacuation de la chaleur et au refroidissement de la bobine. Il joue aussi un rôle d'amortissement des modes de torsion de l'équipage mobile.

L'enceinte : un tube

Dans notre concept, l'équipage mobile est assimilé à un piston. L'enceinte associée au dispositif est un tube de diamètre voisin de celui de l'équipage mobile. C'est l'air contenu dans le tube qui remplit la fonction de suspension. Cette dernière est donc pneumatique et exploite les propriétés de l'air. Elle a ainsi un comportement très linéaire.

La raideur associée est inversement proportionnelle au volume de l'enceinte.

On sait que les haut-parleurs fonctionnent au-delà de la fréquence de résonance mécanique du système, qui est inversement proportionnelle à la racine carrée du rapport raideur sur masse du système. Pour que la fréquence de résonance soit basse, on cherche à avoir un rapport raideur sur masse faible. Et comme on veut aussi une masse faible (diminution de la taille) cela nécessite une

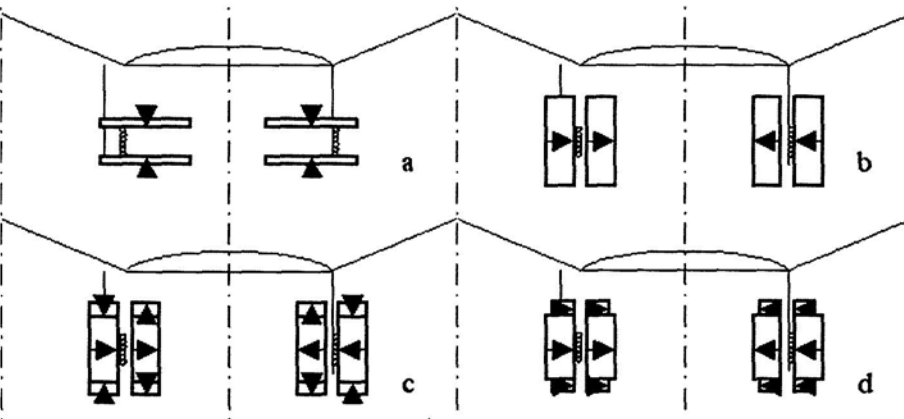


Fig. 7 : Exemples de structures de moteurs sans fers

raideur très faible, donc une suspension très souple et un grand volume d'enceinte, les raideurs correspondantes étant en parallèle l'une sur l'autre.

Dans le cas MAGIC, la raideur associée aux joints ferrofluides est nulle, donc la seule raideur qui intervienne est celle liée au volume de l'enceinte. On peut donc avoir un volume beaucoup plus petit que pour un haut-parleur classique. Par exemple, un volume de 2,7 l donne une résonance à 42 Hz.

La proposition d'un tube pour former l'enceinte relève d'une certaine simplicité, mais il est clair qu'on a toute liberté sur la forme.

Et ça marche... !

Des prototypes ont été réalisés et testés par la société Acoustical Beauty en création à l'incubateur du Maine. Avec un équipage mobile de 55 mm de diamètre, et une enceinte de 2,7 l (tuyau long de 1 m et de diamètre 57 mm), l'écoute dans la gamme bas médium à aigus se révèle tout simplement ... MAGIC !

Références bibliographiques

- [1] M. R. Gander, Moving-coil loudspeaker topology as an indicator of linear excursion capability, *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 29(1/2), pp 10-26, 1981.
- [2] A. Dobrucki, Non typical effects in an electrodynamic loudspeaker with a nonhomogeneous magnetic field in the air gap and nonlinear suspension. *J. Audio Eng. Soc.*, vol 42(7/8), pp 565-576, 1994.
- [3] W. Klippel, Tutorial: Loudspeaker non linearities-causes, parameters, symptoms, *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 54(10), pp 907-939, 2006.
- [4] W.J. Cunningham, Nonlinear distortion in dynamic loudspeakers due to magnetic effects, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 21(3), pp 202-207, 1949
- [5] J. Vanderkooy, A model of loudspeaker driver impedance incorporating eddy currents in the pole structure, *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 37(3), pp 119-128, 1989.
- [6] G. Lemarquand, M. Bruneau, Nonlinear intermodulation of two coherent acoustic progressive waves emitted by a wide-bandwidth loudspeaker, *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 56(1/2), pp 36-44, 2008.
- [7] M. Rousseau, Propriétés des suspensions de haut-parleurs: viscoélasticité et nonlinéarités, présenté à la journée AES-France du 16 mars 2007, Paris (www.aesfrance.org).
- [8] M. Berkouk, V. Lemarquand, G. Lemarquand, Analytical calculation of ironless loudspeaker motors, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 37(2), pp 1011-1014, 2001.
- [9] G. Lemarquand, New structure of loudspeaker, *Proceeding of the 120th AES Convention*, Mai 20-23, Paris, France, preprint 6846, 2006.
- [10] G. Lemarquand, Ironless loudspeakers, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 43(8), pp 3371-3374, 2007