

10ème Congrès Français d'Acoustique

Lyon, 12-16 Avril 2010

Impact des performances des transducteurs acoustiques pour le contrôle actif

Philippe Herzog

Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, CNRS-UPR 7051, 31 chemin Joseph Aiguier, F-13402 Marseille cedex 20, herzog@lma.cnrs-mrs.fr

Les dispositifs de "contrôle actif", qui rejoignent aujourd'hui ceux de "reproduction sonore", sont des applications des transducteurs qui prennent une importance croissante depuis quelques temps. Selon les stratégies de pilotage (variant d'une simple commande en boucle ouverte à des algorithmes adaptatifs en temps réel), les performances des transducteurs peuvent être plus ou moins cruciales. Néanmoins, aucune stratégie de contrôle ne permet de repousser significativement les limites technologiques des transducteurs qu'elle utilise.

Cet exposé vise dans un premier temps à rappeler quelques-unes des limites technologiques associées aux transducteurs acoustiques disponibles commercialement aujourd'hui, et montrer comment des modèles électroacoustiques simples permettent d'obtenir très efficacement un premier dimensionnement. Dans un deuxième temps, l'exposé abordera des aspects qui sont modélisés moins efficacement (rayonnement, couplage acoustique, retards, non-linéarités, etc) ainsi que l'influence de "l'environnement acoustique" des transducteurs (confinement, obstacles proches, rayonnement mutuel), en faisant le lien avec les limites qu'induisent ces aspects sur différentes stratégies de contrôle. Ces deux parties seront illustrées par quelques exemples de réalisations ou de simulations.

1 Introduction

Les transducteurs acoustiques (essentiellement écouteurs, haut-parleurs et microphones), sont aujourd'hui plutôt associés au marché du "multimédia", et plus particulièrement à la reproduction sonore et aux télécommunications. Ces domaines d'application, quasiment disjoints (téléphonie *vs* HiFi) depuis le début de l'électroacoustique jusqu'à la fin du XX^e siècle [1], convergent aujourd'hui sous forme de produits "nomades" multifonctions.

Pendant quasiment la même période mais à l'arrière-plan de ces marchés établis, le contrôle actif a connu également une montée en puissance [2], bien plus liée aux possibilités de traitement du signal qu'à l'évolution des transducteurs. Le contrôle actif a ainsi bénéficié avant tout de l'essor considérable des moyens de calcul, qui ont permis d'étudier puis d'implémenter des algorithmes de plus en plus sophistiqués, avec toujours la contrainte bien spécifique du "temps réel" [3]. Cette évolution a bénéficié dans un premier temps de technologies issues de la défense (sonars, ...), et plus récemment de celle des télécommunications qui a banalisé l'usage des processeurs "DSP".

Deux tendances sont cependant en train de modifier peu à peu ce panorama. D'une part la reproduction sonore a tendance à utiliser de plus en plus une approche "multicanal" : le succès commercial des "line-array" en sonorisation, ou le "home-cinema" côté grand public, conduit l'industrie à explorer peu à peu les principes de la synthèse de champs sonores (WFS, HOA, etc) [4, 5]. Dans le même temps, un travail de fond

est mené depuis bien des années pour faciliter l'applicabilité des stratégies de contrôle, en développant sa complémentarité avec les solutions passives, et en cherchant à "décentraliser" le contrôle (*ie* réaliser un "grand système" en juxtaposant de nombreuses cellules de contrôle indépendantes et génériques) [6]. Ainsi le contrôle et la synthèse de champ tendent à nécessiter des technologies similaires, notamment en termes de transducteurs : c'est ce dernier besoin qui est considéré ci-après.

2 Approches de contrôle

La reproduction sonore a longtemps été effectuée "en boucle ouverte" : un signal électrique alimente une chaîne électroacoustique conçue pour obtenir une "bonne" réponse. Le contrôle actif utilise peu cette approche, car elle ne permet pas de prendre en compte les variations du champ à annuler. Inversement, le premier principe de contrôle a été la "boucle fermée" (feedback), qui soustrait simplement au signal de commande l'image d'un signal d'erreur capté par un microphone (voir figure 1). Ce principe a également été celui de certaines enceintes asservies. La plupart des algorithmes modernes différencient cependant un signal de "référence", qui fournit une "définition" du spectre à traiter, et le signal d'erreur, qui quantifie un écart à corriger [2, 7]. Cet approche (feedforward) commence également à être utilisée en synthèse de champs acoustiques, illustrant encore la convergence progressive entre les installations de reproduction sonore et de contrôle actif [8].

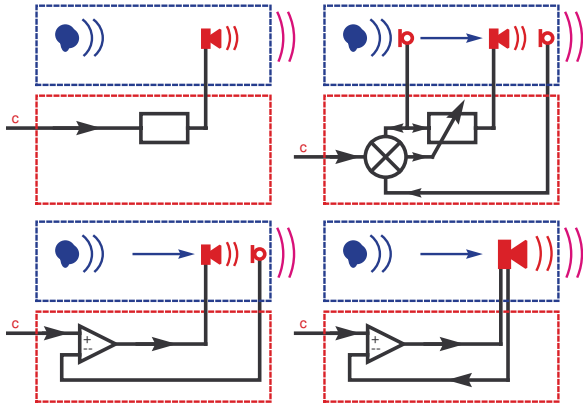


FIG. 1: Approches de contrôle : "boucle ouverte" (HG), "feedforward" (HD), et "feedback" (bas)

Chacune de ces approches doit fournir des échantillons de signal à la cadence de reproduction (en "temps réel"). Ceci implique un temps de latence, correspondant au délai de filtrage éventuel, mais aussi au temps de réponse des transducteurs - nécessairement fini, et parfois très significatif. Ce délai impacte directement les performances d'un contrôle en "boucle fermée" (il retarde le signal de contrôle par rapport à celui à contrôler), et doit être borné dans le cas des autres approches; il est rarement critique en reproduction sonore.

Les approches de contrôle se différencient également dans leur capacité à s'adapter en fonction des circonstances : celle-ci est maximale en "boucle fermée", peut être paramétrée en "feedforward", et est nulle en "boucle ouverte". L'échelle de temps d'adaptation varie ainsi de celle de reproduction à l'infini. Elle doit correspondre à l'évolution prévisible du champ : mouvement des sources, modifications environnementales, et variations liées aux transducteurs. Le contrôle "en boucle fermée" semble ainsi le plus intéressant pour traiter des phénomènes stationnaires, réagissant a priori plus vite qu'un contrôle "feedforward", mais la stabilité du contrôle est d'autant moins garantie qu'il doit s'adapter rapidement. Les variations de comportement des transducteurs peuvent ainsi être compensées par un contrôle "rapide", mais en le détournant alors en partie de sa mission principale, et peuvent éventuellement nuire à sa stabilité.

3 Réponse linéaire

Tous les dispositifs évoqués ci-avant utilisent le principe de superposition des contributions des différents transducteurs. Cela suppose au moins la linéarité des phénomènes acoustiques, mais en général aussi celle des transducteurs. Dans les simulations, ceux-ci sont donc usuellement considérés comme des "filtres" linéaires et invariants "SISO" (une entrée, une sortie), et donc caractérisés chacun par une simple réponse fréquentielle ou temporelle. Même si cette notion est en elle-même discutable (*cf* §4), elle constitue un premier critère de choix des transducteurs. Elle a donc fait l'objet de

nombreuses publications traitant de la modélisation et de l'identification des transducteurs; en particulier, les modèles électroacoustiques permettent d'obtenir très efficacement des éléments quantitatifs aux basses fréquences [9].

3.1 Réponse fréquentielle

La réponse en fréquences donne une indication rapide du spectre qu'un transducteur peut reproduire ou contrôler. Elle est toujours de type "passe-bande", avec des pentes de coupure élevées, dépendant en partie des technologies et des circuits de conditionnement associés. Aux limites de la bande passante, ces coupures induisent des rotations de phase susceptibles de nuire à la stabilité dans le cas d'un contrôle "feedback". Aux très basses fréquences, l'égalisation de pression statique des charges acoustiques arrières résulte en général de fuites mal contrôlées, notamment pour les capsules microphoniques à bas coût (électret). Pour cette raison (parmi d'autres), la coupure "basse" est souvent susceptible d'évoluer avec le temps ou l'environnement.

Dans la bande utile, la réponse est en général de plus en plus irrégulière quand la fréquence augmente. La cause principale en est le comportement vibratoire des membranes, considérablement plus complexe dans le cas d'un haut-parleur que dans celui d'un écouteur ou d'un microphone. Toutes les irrégularités de la réponse doivent être compensées par le système de contrôle, ce qui utilise "inutilement" une partie de sa dynamique. Par rapport à la reproduction sonore, le contrôle actif est en général cantonné aux basses fréquences : il est donc possible de sélectionner des haut-parleurs à bande passante limitée, mais dont la réponse est particulièrement régulière aux basses fréquences. Cela correspond à des composants a priori destinés aux caissons de basse, quand leur taille ou leur coût sont acceptables. Par contre, ces composants ont une réponse souvent très irrégulière "hors bande", et doivent donc être filtrés.

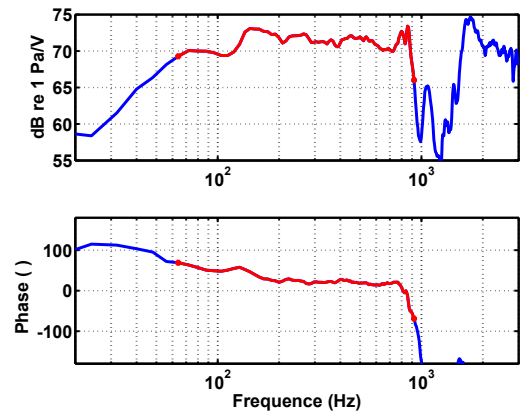


FIG. 2: Réponse d'une enceinte BF

La figure 2 présente un exemple de réponse d'une enceinte "subwoofer" de bonne qualité mesurée en chambre anéchoïque (le retard de propagation est

compensé). Les irrégularités proviennent en partie des imperfections de la mesure [10], et la réponse du microphone est ici négligeable. La partie surlignée en rouge correspond à la bande "utile", pour laquelle la réponse en phase permettrait un contrôle "feedback". Au-delà de cette bande, la forte remontée de la réponse peut cependant rendre un tel contrôle instable, ou en limiter les performances.

3.2 Réponse temporelle

Le comportement temporel des transducteurs impacte directement les performances de contrôle en participant très significativement au délai de latence. Le comportement temporel est directement lié au comportement fréquentiel (réponse à phase minimale), avec d'éventuels retards supplémentaires [11]. Ceci est illustré par la figure 3, qui représente les simulations de deux systèmes passe-bande différenciés par leur amortissement.

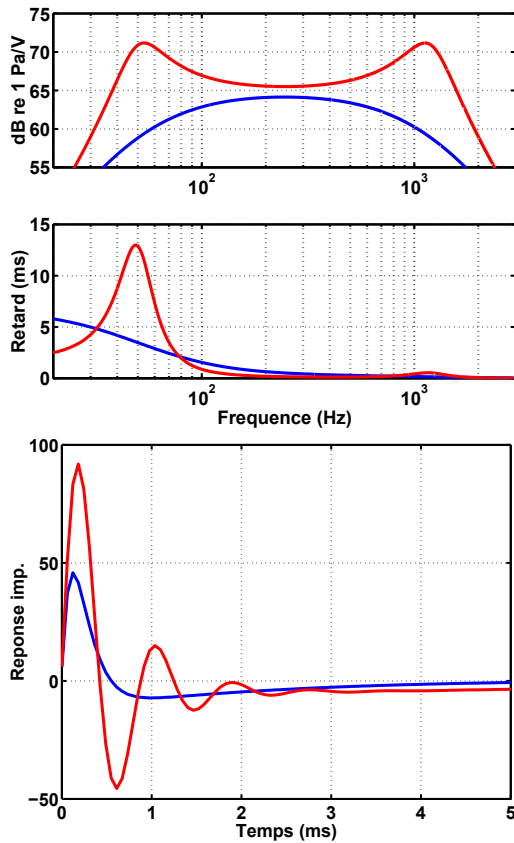


FIG. 3: Réponse (H), retard de groupe (M) et réponse impulsionnelle (B) d'un passe-bande

Pour cette situation usuelle (mais idéalisée), le retard de groupe est de plusieurs millisecondes : cela correspond au délai de propagation aérienne sur une distance de l'ordre du mètre ! Cette figure rappelle aussi que pour des amortissements voisins, c'est la coupure aux basses fréquences qui est la plus critique. La réponse impulsionnelle est ainsi dominée par d'éventuelles oscillations liées à cette coupure ; elle peut avoir une amplitude significative pendant plusieurs millisecondes, ce qui fixe indirectement la longueur des

filtres devant la compenser. L'allure de la réponse des transducteurs a donc une triple influence : elle joue sur la stabilité du contrôle, sur le délai de latence, et sur la puissance de calcul nécessaire. Ceci différencie les exigences correspondant d'une part à des systèmes stables et à grande latence (typique de la reproduction sonore) qui peuvent gérer des réponses résonantes, et d'autre part aux systèmes rapidement adaptatifs pour lesquels il est préférable de choisir une réponse plus amortie (donc en général moins étendue). C'est un des critères de choix des charges acoustiques des enceintes.

4 Impédances

Le couplage électromécanique étant réciproque, il relie deux paires de grandeurs : tension et courant électriques d'une part, force et vitesse (ou pression et débit acoustiques) d'autre part. L'examen des relations qui décrivent ce couplage montre que la réponse mesurée usuellement (*eg* pression rayonnée par un haut-parleur en fonction de sa tension d'alimentation) dépend de l'impédance des circuits électroniques et du milieu acoustique auxquels est associé un transducteur. Il n'y a donc pas de réponse spécifique à un transducteur, mais uniquement la réponse d'un ensemble électroacoustique auquel il appartient [12] - ce qui peut être peu intuitif dans le cas d'un système multicanal.

4.1 Impédance de transfert

Les caractéristiques d'un haut-parleur le rapprochent d'une source de débit acoustique, car l'impédance mécanique de l'équipage mobile est très supérieure à la plupart des charges acoustiques dans lesquelles il rayonne. La pression résultant de sa vibration est donc extrêmement dépendante de cette charge acoustique, comme l'illustre la figure 4.

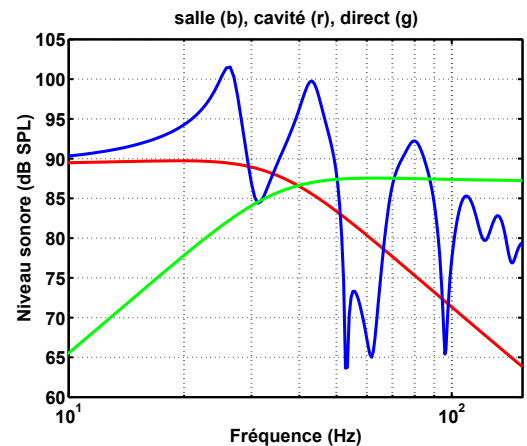


FIG. 4: Réponse d'un même haut-parleur dans trois charges acoustiques : volume clos (r), salle ordinaire (b) et espace "infini" (v)

Cette réponse est ici calculée par une décomposition modale, qui permet d'obtenir l'impédance Z_t reliant la pression en un point de mesure au débit du haut-parleur. Pour un débit acoustique Q imposé, cette

pression s'exprime classiquement comme $p = Z_t Q$, où la réponse de la charge joue un rôle équivalent à celle du haut-parleur. Ce comportement est particulièrement marqué aux basses fréquences, où le comportement modal de la charge perturbe aussi bien la reproduction sonore que le contrôle actif.

4.2 Impédance de charge

Malgré une impédance mécanique élevée, un haut-parleur usuel ne constitue pas une source de débit "parfaite". En présence d'un champ fortement résonant, son débit peut être modifié par rapport à ce qu'il serait en champ libre. En notant p_{ga} et Z_{ma} les éléments du générateur équivalent (pression en circuit ouvert et impédance interne), le débit est estimé par $Q = p_{ga}/(Z_{ma} + Z_r)$, où Z_r est l'impédance acoustique présentée par la charge sur la membrane. En général, l'influence de Z_r reste assez faible sur les haut-parleurs "lourds" utilisés aux très basses fréquences. Cependant, elle peut devenir significative pour des haut-parleurs à rendement élevé (à membrane légère).

Dans le cas d'un système à grand nombre de canaux, la pression acoustique exercée sur la membrane d'un haut-parleur résulte de son propre débit, de la charge acoustique, mais aussi du débit de tous les autres haut-parleurs du système : les équations ci-dessus font alors intervenir des matrices pleines, dont les termes non-diagonaux couplent les différents haut-parleurs. Le débit d'un haut-parleur donné peut alors être largement modifié lorsque que le contrôle modifie la réaction de la charge acoustique en pilotant les autres haut-parleurs : le principe de superposition ne s'applique alors plus aussi simplement, ce qui peut perturber les performances ou même la stabilité du système. Cet effet n'est pas en contradiction avec la linéarité acoustique : il résulte du fait que le système de contrôle ne pilote qu'une seule des deux grandeurs électriques qui constituent le signal d'entrée du haut-parleur (qui pourrait être considéré comme un système MIMO, et non SISO).

De ce point de vue, un système de contrôle actif diffère d'un système de reproduction sonore : là où le deuxième génère une pression, le premier l'annule. L'impédance acoustique chargeant l'actuateur peut alors être abaissée, et ainsi contribuer à modifier l'accord d'une éventuelle charge résonante [13].

5 Dimensionnement

Le comportement linéaire des transducteurs est un point important de la conception d'un système, mais il ne suffit pas à en déterminer les caractéristiques. En effet, il faut également assurer que la gamme dynamique des transducteurs est compatible avec le champ à reproduire (ou annuler) : le système doit pouvoir créer la pression désirée sans dépasser les possibilités des actuateurs, et détecter les erreurs par rapport à cette consigne sans être trompé par la saturation ou le bruit de fond de ses capteurs.

5.1 Détermination du besoin

Cette compatibilité est plus délicate à chiffrer qu'il n'y paraît au premier abord, car l'approximation d'un champ primaire donné par un ensemble discret de sources ne peut être qu'approximatif. Les interactions entre actuateurs contribuent en général à créer un champ réactif "parasite" (lié au phénomène de "repliement spatial") qui correspond à des échanges de débit entre les différents actuateurs. Ceux-ci doivent ainsi générer un débit plus important que le débit "utile" lié à "leur part" du champ à reproduire.

Selon la stratégie de contrôle, la proportion du débit utile peut être plus ou moins élevée : si le problème acoustique est "mal posé" (distribution d'actuateurs inadaptée au problème à reproduire), le débit des actuateurs peut être très supérieur à celui correspondant au champ désiré. La conception acoustique préalable du système (position et caractéristiques des sources) et le paramétrage du contrôle (préconditionnement, pénalisation) conduisent normalement à limiter ce problème, mais le débit des actuateurs de contrôle reste en général supérieur au débit correspondant au champ primaire (à reproduire ou à annuler). Une modélisation électroacoustique complète peut être nécessaire pour déterminer ce débit avec précision, mais en général un coefficient arbitraire de surdimensionnement est utilisé pour estimer le débit maximal nécessaire pour un problème donné.

5.2 Niveau nominal

Ainsi, le dimensionnement des actuateurs électroacoustiques est en général basé sur la détermination d'un débit "nominal", qui conduit aux pressions maximales à reproduire aux positions de mesure. Ce débit nominal peut être obtenu d'après une estimation des termes diagonaux de l'impédance Z_t , souvent réduits à une approximation "monopolaire" quand aucun autre modèle n'est disponible : $Z_t(i, j) \approx j\omega\rho/N\pi R_{ij}$, en prenant $N = 4$ en problème extérieur, ou $N = 2$ en espace clos. Alors la densité spectrale de débit $Q(\omega)$ peut être calculée d'après celle de la pression à reproduire $P(\omega)$: $Q(\omega) = Z_t^{-1}(\omega)P(\omega)$.

Pour la plupart des actuateurs électroacoustiques, il existe une limite mécanique au-delà de laquelle leur fonctionnement n'est plus correct. Cette limite correspond en général à un déplacement, et est donc déterminée en intégrant (sur la bande utile $[\omega_{min}, \omega_{max}]$) la densité spectrale $Q(\omega)/j\omega$. La valeur résultante est un volume d'air à déplacer, qui permet de sélectionner un modèle d'actuateur dans un catalogue, ou d'en déterminer le cahier des charges. Les actuateurs électrodynamiques (notamment les haut-parleurs usuels) doivent de plus respecter une deuxième limite, qui découle de leur très faible rendement énergétique : la dissipation dans leur bobine mobile ne doit pas conduire à un échauffement excessif. Il est donc a priori nécessaire d'estimer aussi la puissance électrique consommée pour créer le débit nominal, et d'inclure cette contrainte lors du choix. Aux basses fréquences,

c'est en général le volume déplacé qui constitue la limite principale [9].

Le dimensionnement des capteurs (en général des microphones) est un peu plus simple : ils doivent essentiellement pouvoir supporter la pression maximale existante sans saturer. Cependant, cette pression diffère a priori de la pression à reproduire : elle doit permettre un dépassement occasionnel de la consigne, et prendre en compte les signaux issus de sources parasites, y compris "hors bande". A ce titre, le bruit lié à des écoulements (vent, ...) est très riche en composantes subsoniques qui peuvent facilement saturer des microphones à bas coût, ou leur préamplificateur, s'ils ne sont pas protégés par une bonnette. Pour limiter ce problème il est possible de prévoir un filtre passe-haut dans le préamplificateur, mais ceci augmente alors considérablement le retard de groupe (cf §3).

5.3 Linéarité

Le fait d'avoir choisi des transducteurs ayant une dynamique adaptée, et d'avoir réglé correctement les gains dans la chaîne électroacoustique, permet de garantir que le contrôle (ou la reproduction) peut être basé sur le principe de superposition. Cependant, les transducteurs ont en général un comportement qui n'est qu'approximativement linéaire - notamment les haut-parleurs électrodynamiques [14]. Lorsque les niveaux sonores s'approchent de leur niveau nominal, les actuators sont donc susceptibles de créer des distorsions des signaux à reproduire.

Ce défaut est capital en reproduction "en boucle ouverte" (HiFi, ...), car l'oreille y est très sensible - bien que certains types de distorsion soient considérés comme relativement peu gênants [15]. Il prend moins d'importance dans le cas d'un contrôle "feedback", qui a tendance à réduire la distorsion de l'actuateur (c'était une de ses premières applications en audio, pour les enceintes dites "asservies") - tout au moins si la distorsion ne modifie pas trop la stabilité de la boucle fermée. En contrôle "feedforward", l'effet de la distorsion n'est pas très important a priori, mais peut limiter l'efficacité du contrôle : des composantes supplémentaires découlant de la distorsion de l'actuateur sont détectées par le capteur d'erreur. Si le niveau augmente, ces composantes croissent, ce qui est interprété comme une croissance de l'erreur. Un algorithme adaptatif est donc amené à limiter son action pour que les composantes de distorsion restent voisines de la pression résiduelle, qui n'est alors pas totalement minimisée. En pratique la distorsion des haut-parleurs usuels, conçus pour la reproduction sonore, est en général suffisamment faible pour avoir peu d'impact sur les performances du contrôle.

La linéarité des actionneurs est donc un aspect capital en restitution sonore, mais de moindre importance apparente en contrôle. Cette disparité provient en grande partie de la différence entre les métriques utilisées pour les deux applications : le contrôle acoustique minimise en général une erreur quadratique moyenne,

avec une efficacité de l'ordre de 10 à 20 dB. Cette dynamique est a priori très inférieure à celle de l'oreille. Cependant, la gêne liée au bruit résiduel peut être accrue par la distorsion des actuators, du fait qu'il s'agit en général de composantes mieux perçues que la fondamentale. L'efficacité perceptive du contrôle est donc probablement bien plus impactée par la linéarité des actuators que cela n'apparaît dans les mesures.

6 Rayonnement

Un système de reproduction sonore ou de contrôle actif met en jeu un nombre fini de transducteurs, et peut donc reproduire un nombre limité de degrés de liberté (*ddl*) indépendants (inférieur ou égal à celui de ses canaux). Dans le cas d'un champ acoustique confiné, cela peut décrire le champ à reproduire avec une grande précision si le nombre de *ddl* contrôlés est supérieur ou égal au nombre de modes non évanescents dans la bande de fréquences considérée. Dans ce cas, une conception correcte du dispositif permet de minimiser le débit de chaque actuateur, et d'en obtenir les commandes via l'inversion (régularisée) de la matrice des fonctions de transfert des actuators.

Mis à part des cas simples (casque anti-bruit, gaines de ventilation, ...), peu de problèmes concrets correspondent à cette situation quasi-idéale. En général, le système peut contrôler un nombre de *ddl* [très] inférieur à celui du problème physique, et n'en réalise donc qu'une approximation, meilleure au voisinage d'éventuels microphone de contrôle. La propagation ayant tendance à homogénéiser la pression, l'erreur commise devrait être faible si l'écart entre microphones est suffisamment faible (de l'ordre d'une demi-longueur d'onde au maximum). En maillant ainsi une surface fermée avec des points de mesure, il est même possible de reproduire correctement le champ dans l'ensemble de son volume [16].

Cependant les performances du contrôle dépendent aussi des caractéristiques de rayonnement des transducteurs. Ainsi le conditionnement de la matrice des fonctions de transfert dépend beaucoup des couplages acoustiques entre voies, qui peuvent être réduits en choisissant les emplacements et les orientations de transducteurs ayant une réponse sélective spatialement. Une combinaison idéale conduirait à une matrice quasi-diagonale ne posant aucun problème d'inversion, voire permettant la mise en oeuvre d'un contrôle décentralisé.

La sélectivité spatiale des transducteurs peut être caractérisée par leur directivité, s'ils sont en champ lointain les uns des autres - sans quoi cette notion perd son sens. Dans un système de contrôle "compact", le champ rayonné comporte une autre composante : la partie évanescente, ou "champ proche", qui peut totalement dominer la partie propagative au voisinage immédiat des sources. Le système de contrôle tend alors à annuler le champ primaire en lui opposant le champ proche de ses actuators, qui varie différemment

dans l'espace. L'effet du contrôle est alors quasi-local, alors que la mesure de la seule composante propagative permettrait un contrôle efficace à grande distance, comme l'illustre la figure 5.

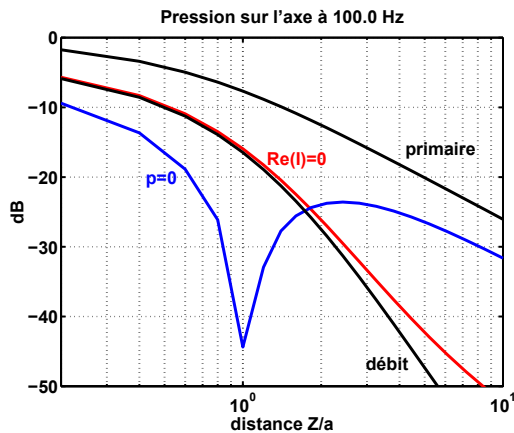


FIG. 5: Contrôle d'une source primaire de rayon a par une source secondaire concentrique. Noir : champ primaire, et contrôle annulant le débit total. Bleu : minimisation de pression en un point. Rouge : minimisation de la composante propagative.

Plus généralement, un système de reproduction gagne à ce que les fronts d'onde générés par ses actuateurs aient une forme voisine de celle du champ à reproduire, pour améliorer la qualité de l'approximation spatiale. Un système de contrôle a également avantage à ce que ses capteurs soient capables de sélectionner la partie pertinente du champ rayonné par ses actuateurs (en général la partie propagative), et qu'ils soient couplés de manière sensiblement "diagonale". Ces deux points sont donc des axes de recherche intéressants pour l'étude des transducteurs.

7 Conclusion

L'objectif de cette présentation générale est de rappeler les caractéristiques essentielles des transducteurs utilisés en contrôle actif acoustique, et de montrer qu'elles peuvent être choisies de manière à faciliter le fonctionnement d'un système de contrôle actif [17] ou de reproduction sonore [18]. Cela pourra être illustré à l'oral par des exemples qui n'ont pas trouvé leur place dans ces quelques pages.

Remerciements

L'auteur souhaite remercier ses collègues du LAUM, du LEMA, du CTTM et du LMA pour les nombreuses (et souvent longues) discussions qui lui ont permis d'aborder les aspects évoqués dans cet exposé.

Références

[1] Hunt F.V., "Electroacoustics : The Analysis of Transduction, and its Historical Background",

Acoust. Soc. Am. Melville (1982).
 [2] Nelson P.A., Elliott S.J., "Active Control of Sound", *Academic Press* (1992).
 [3] Kuo, S.M. and Morgan, D.R., "Active noise control systems. Algorithms and DSP implementations", *Wiley* (1996).
 [4] Berkhout A. J., de Vries D. and Vogel P., "Acoustic control by wave field synthesis", *J. Acoust. Soc. Am.* 93 (5), 2764-2778 (1993).
 [5] Urban M., Heil C. and Bauman P., "Wavefront Sculpture Technology", *J. Audio Eng. Soc.* 51(10), 912-932 (2003).
 [6] Elliott S. J. and Boucher C. C., "Interaction between multiple feedforward active control systems", *IEEE Trans. Speech Audio Process.* 2(2), 521-530 (1994).
 [7] Mangiante G., "Contrôle actif des bruits", *Techniques de l'ingénieur*, BR3010 (2008).
 [8] Gauthier P.A., Berry A., "Sound-field reproduction in-room using optimal control techniques : simulations in the frequency domain", *J. Acoust. Soc. Am.* 117(2), 662-678 (1992).
 [9] Small R., "Direct-Radiator Loudspeaker System Analysis", *J. Audio Eng. Soc.* 20(5), 383-395 (1972).
 [10] Melon M., Langrenne C., Herzog Ph. and Garcia A., "Evaluation of a method for the measurement of subwoofers in usual rooms", *J. Acoust. Soc. Am.* 127(1) 256-263 (2010).
 [11] Buck K., Zimpfer-Jost V., Dancer A., Hamery P., and Herzog Ph., "Are electromagnetic receivers suitable for ANR earplugs?", *Joint Congress CFA/DAGA '04* Strasbourg, 85-86 (2004).
 [12] René P.J., "Contributions aux études sur le couplage électroacoustique dans les espaces clos en vue du contrôle actif", *Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne*, thèse 3413 (2006).
 [13] Herzog Ph., "Perturbations de l'impédance de rayonnement d'une source compacte", *Actes du 5^{ème} Congrès Français d'Acoustique* Lausanne, 664-667 (2000).
 [14] Klippel W., "Tutorial : Loudspeaker Nonlinearities-Causes, Parameters, Symptoms", *J. Audio Eng. Soc.* 54(10), 907-939 (2006).
 [15] Cheever D. H., "A New Methodology For Audio Frequency Power Amplifier Testing Based On Psychoacoustic Data That Better Correlates With Sound Quality", *University of New Hampshire*, MSEE thesis (2001).
 [16] Epain N., Friot E., "Active control of sound inside a sphere via control of the acoustic pressure at the boundary surface", *J. Sound Vib.* 299(3), 587-604 (2006).
 [17] Le Roux J.C. et Roure A., "Conception d'actuateurs dipolaires pour dispositif de contrôle actif de bruit", *Acoustique et Techniques* 52, 6-11 (2008).
 [18] Le Roux J.C., Herzog Ph. et Poulain N., "Conception et Qualification d'Actuateurs pour un Moyen d'Essais Utilisant un Contrôle du Champ Acoustique", *Actes du 10^{ème} Congrès Français d'Acoustique* Lyon (2010).