

Electroacoustique(s)

Philippe Herzog, Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique du CNRS, Marseille

E

n composant le «menu» de ce numéro spécial, la première question était de savoir ce que ce terme «électroacoustique» signifie aujourd'hui. Il suffit d'en discuter rapidement avec quelques personnes pour constater qu'il évoque des notions très diverses, souvent contradictoires. Il est aussi caractéristique que peu de personnes le revendiquent comme une spécialité, au point que le congrès Acoustics'08, qui se tiendra à Paris au mois de juillet, n'a pas prévu de session sur ce thème.

Faut-il pour autant considérer que l'électroacoustique a disparu aujourd'hui ?

Ce n'est probablement pas aussi simple, mais force est de constater que le terme est ambigu : il recouvre tant de facettes que presque tout le monde est amené à utiliser des notions liées à l'électroacoustique, sans forcément les considérer comme telles. Comme le suggère son étymologie, l'électroacoustique est avant tout l'étude d'assemblages de connaissances : si chaque spécialité est une brique d'un édifice scientifique, on peut considérer l'électroacoustique comme un mortier qui permet de les unir. Plutôt que de dresser un catalogue exhaustif, ce numéro spécial est focalisé sur un domaine bien particulier : la reproduction sonore audible. D'autres numéros ont traité de domaines d'application où l'électroacoustique est présente en filigrane. Il paraissait donc légitime de traiter ici du domaine qui est à l'origine même de l'électroacoustique, et que toute personne connaît a priori, au moins en tant qu'utilisateur.

Dans notre société hyper-médiatisée, l'importance des outils de communication est une évidence. Ce qui l'est moins, c'est que l'évolution technologique de ces outils a souvent mis l'électroacoustique en première ligne, posant des défis scientifiques fondamentaux, tout en lui réclamant de résoudre efficacement des problèmes très concrets.

Électricité - Acoustique : un lien de longue date

Il est impossible de dater avec précision l'histoire de la connaissance, mais il est intéressant de donner quelques repères dans l'histoire parallèle de l'électricité et de l'acoustique.

On peut ainsi évoquer la bouteille de Leyde, au milieu du XVIIIe siècle : Franklin a fait osciller une balle entre deux électrodes (vibreux électrostatique), qui ont été par la suite modifiées pour en permettre la résonance, donnant naissance à un «clavecin électrique» vers 1861, ou un «télégraphe électrostatique» vers 1774. La première de ces applications peut ainsi être vue comme le lointain ancêtre de nos synthétiseurs, alors que la deuxième est à l'origine des moyens de télécommunication caractéristiques de ce début de siècle. C'est la création d'un générateur électrochimique par Volta, vers 1800, qui a permis l'essor de l'électricité. Il a ouvert la voie à de nombreuses découvertes : la transduction électromagnétique (1802), le magnétisme (Oersted, Arago, Davy, Ampère, et bien d'autres, autour de 1820), la compréhension des pertes électriques (Ohm, 1826), celle des bobinages (Henry, 1828), pour aboutir à la renaissance d'un ancien concept : le télégraphe, sous forme cette fois électromagnétique (1831). C'est donc après environ 60 années de gestation que cet outil de communication a pu être concrétisé. Il est difficile de concevoir l'impact énorme sur le XIXe siècle de cette idée qui semble désuète aujourd'hui ; c'était pourtant une étape capitale dans l'accélération de la transmission des informations par un codage (Morse) qui permettait d'utiliser un support immatériel («virtuel», si l'on préfère ...). Le rapport entre l'électricité et l'acoustique s'est atténué dans le télégraphe, jusqu'à ce qu'un écrivain suggère, dans une nouvelle de 1854, qu'une future version du télégraphe pourrait reproduire la voix humaine. Effectivement, un premier prototype de téléphone est apparu vers 1860, a été amélioré par Gray puis Bell, dont le principal brevet date de

1876. C'est sans doute à cette époque que l'électroacoustique est devenue un domaine d'étude spécifique, du fait des bouleversements de la société auxquels elle a été associée. Cette émergence d'une approche technique rigoureuse des transducteurs utilisés par le téléphone, s'est doublée d'une avancée considérable sur le plan théorique : c'est vers 1873 que Maxwell a publié la théorie de l'électromagnétisme, et vers 1877 que Lord Rayleigh a publié les bases de l'acoustique. Cette quasi-simultanéité illustre à nouveau à quel point ces deux domaines sont proches, et se sont ainsi développés en harmonie. Entre-temps, un autre mécanisme de transduction avait été étudié : le couplage magnétostrictif, abordé par Page en 1837. Il a été en partie à l'origine des travaux de Joule, en ce qui concerne les aspects énergétiques (1845), mais a également conduit à mettre en évidence un « effet inverse » (Villari, 1864). Cette découverte est capitale : la compréhension des échanges d'énergie au sein du transducteur, et le couplage bidirectionnel (« réciproque ») entre les grandeurs électriques d'une part, et mécaniques d'autre part, sont à mon avis les notions les plus importantes dans l'étude des transducteurs. De nouveaux principes de transduction ont été découverts par la suite : piézoélectrique et thermoacoustique (1880), puis électrodynamique (1914). Leur étude mélange électromagnétisme, mécanique et acoustique.

Ainsi, la deuxième moitié du XIX^e siècle a vu naître les bases théoriques communes aux deux domaines que sont l'électromagnétisme et l'acoustique : la plus universellement utilisée est la théorie de la propagation, dans laquelle la nature physique des phénomènes est un peu occultée au profit de l'étude spatio-temporelle de « signaux » porteurs d'information. Elle est donc utilement complétée par une description des échanges d'énergie associés, et des couplages entre différentes formes d'énergie, nécessaires pour l'étude théorique mais aussi pour la mise au point de nombreuses inventions. L'électroacoustique a donc continué à se développer en filigrane de l'avancement de l'acoustique et de l'électromagnétisme, sous le couvert d'une notion qui y est centrale depuis son origine : l'impédance, qui caractérise la réaction d'un milieu face à une sollicitation qui peut être aussi bien mécanique qu'électrique. En France, toutes les spécialités de l'acoustique sont classées dans le « giron scientifique » de la mécanique (ce n'est pas le cas dans tous les pays). Cela ne signifie pas pour autant que les notions communes à l'électromagnétisme et à l'acoustique aient perdu de leur intérêt - au contraire. Comme tout « découpage », forcément un peu arbitraire, cette classification masque des liens pourtant très forts. L'électroacoustique en reste, dans le domaine (français) de la mécanique, une trace indélébile - du moins espérons-le !

Modèles électroacoustiques : simples ou complets

La similitude des opérateurs électromagnétique et acoustique a conduit à vouloir utiliser en acoustique des méthodes de résolution usuelles en électricité, en segmentant un problème sous forme du couplage de sous-problèmes élémentaires simplifiés à l'extrême : dans un volume très confiné, seule l'élasticité du fluide est considérée ; dans un volume à grande divergence géométrique, seule son inertie est retenue, etc. Cette approximation est voisine de celle qui consiste à ne considérer que l'induction dans un bobinage électrique, ou la

capacité dans un condensateur : elle est d'autant meilleure que des particularités locales tendent à faire dominer un unique phénomène physique. En électromagnétisme comme en acoustique, ces approximations sont a priori limitées aux « basses fréquences », c'est-à-dire celles dont la longueur d'onde est grande par rapport aux dimensions mises en jeu. Dans de tels cas, il a semblé pratique de représenter les modèles acoustiques sous forme de schémas équivalents utilisant des symboles de composants électriques, traduisant les analogies entre des phénomènes décrits par des équations de formes identiques dans les deux domaines. Cette représentation par « schémas électriques équivalents » résulte de ce que l'étude des transducteurs a été initialement menée par des personnes spécialisées en génie électrique, pour qui ces schémas sont facilement lisibles ; les mécaniciens pourraient tout aussi bien représenter des filtres électriques sous forme d'assemblages de masses, ressorts et amortisseurs ! Cependant, la validité de cette approximation « localisée » n'est pas la même en acoustique qu'en électromagnétisme : pour réaliser une inductance ou un condensateur, il est possible de jouer sur la géométrie des conducteurs et isolants, mais aussi sur les propriétés des matériaux. Les composants électriques peuvent ainsi être considérés comme quasi-parfaits dans une large plage de fréquences et de niveaux, justifiant l'approche par schéma à constantes localisées. Inversement, les éléments d'un système acoustique partagent un seul fluide, leur forme n'est pas libre, et le domaine des longueurs d'onde audible couvre les dimensions de nombreux objets usuels : l'approximation par constantes localisées est donc en général moins pertinente qu'en électricité, car bien plus rarement utilisable. Cette approximation par constantes localisées a donc été complétée par des modèles plus réalistes, en général analytiques. Cependant, l'analogie avec l'électromagnétisme s'arrête inévitablement lorsque les lois de comportement des matériaux ne sont pas similaires - notamment pour décrire les pertes. Cela n'empêche pas d'établir des modèles acoustiques simplifiés, de les coupler, et de représenter ces assemblages sous forme de « schémas-blocs » : même sans équivalent électromagnétique, un tel modèle rend compte des phénomènes physiques réels, pour autant qu'il soit possible de segmenter le problème global en sous-parties où dominent des comportements particuliers : on peut alors parler d'« éléments physiques ». Il est alors possible d'étendre cette approche à l'assemblage de sous-modèles analytiques et numériques, utilisable sur des gammes de fréquences étendues, et éventuellement en régime non-linéaire : l'électroacoustique est alors essentiellement une représentation synthétique d'un problème d'acoustique physique complexe.

Inversement, un modèle très simple peut être très utile dans des situations où la rapidité de calcul prime sur la rigueur. C'est le cas notamment lors de la conception d'un dispositif, où le dimensionnement de différentes options permet de prendre rapidement des décisions, avant d'entreprendre une étude plus approfondie. Malgré les limitations évoquées ci-dessus, des modèles électroacoustiques simples utilisés à bon escient permettent en particulier de concevoir des sources acoustiques aux basses fréquences, c'est-à-dire aux fréquences où leur dimensionnement est souvent le plus critique. C'est aussi l'efficacité de ces modèles qui permet de les utiliser pour optimiser des combinaisons complexes de sources, dans des applications telles que

celles qui sont présentées dans les articles «Conception d'actuateurs dipôlares pour dispositif de contrôle actif de bruit» et «Réseaux de haut-parleurs pour la sonorisation de grands volumes», dans ce numéro de la revue. Enfin, l'identification expérimentale des paramètres des modèles électroacoustiques est en général aisée ; elle ne doit pas être considérée comme la mesure de grandeurs physiques, mais conduit néanmoins à une excellente correspondance entre simulations et mesures.

Transducteurs : de la physique à l'audio

L'étude des transducteurs est à l'origine de l'essor de l'électroacoustique, et reste un des rares thèmes qui y est assez systématiquement associé, mais il ne faut pas pour autant y voir une spécialité réservée à un petit nombre : les transducteurs sont présents dans beaucoup de laboratoires, mais aussi dans les nombreuses applications multimédia actuelles. Selon les cas, leur comportement est vécu comme un centre d'intérêt, une donnée technique, ou une limitation frustrante, selon le degré d'attention que l'on veut leur porter. Mais rares sont les personnes qui peuvent approfondir un problème concret sans devoir tenir compte de la différence entre les transducteurs dont ils disposent et leur concept idéalisé (source/capteur ponctuel, linéaire, invariant, etc). Depuis la découverte des différents principes de transduction, un dialogue constant (bien que pas forcément formalisé) a permis aux scientifiques et aux industriels de faire progresser les concepts théoriques nécessaires à la compréhension du fonctionnement des transducteurs, mais aussi et surtout leur technologie, et leur réalisation. La bonne qualité de certains produits à très bas coût commercialisés aujourd'hui est surprenante, et ne pouvait probablement pas être envisagée, il y a seulement vingt ans. Pourtant, même les produits haut de gamme souffrent encore de nombreuses limitations ; les travaux de recherche continuent donc dans les laboratoires, et de nouveaux brevets concernant les transducteurs sont déposés chaque mois.

En restant dans le cadre de sources sonores audibles, des exemples d'actualité sont, par exemple, le transducteur ionique (déjà ancien), mais aussi le principe de la source «paramétrique», dans laquelle deux champs ultrasonores de grande amplitude interagissent pour créer une source audible au sein d'un volume d'air distant, du fait de la non-linéarité des phénomènes acoustiques. Le caractère «immatériel» d'une telle source permet de réaliser des géométries de volume source très particulières, conduisant à des directivités inhabituelles (sources très directives aux basses fréquences, etc). Son autre originalité est que le mécanisme de transduction «audible» est purement acoustique (même si des transducteurs ultrasonores sont néanmoins nécessaires). De tels principes sont encore expérimentaux, et assez limités en dynamique, ce qui les cantonne encore essentiellement dans les laboratoires. Les haut-parleurs électrodynamiques classiques restent largement plus répandus, mais réservent pourtant encore maintes surprises, et sont donc toujours l'objet de recherches, comme cela est exposé dans l'article «Haut-parleurs électrodynamiques : défauts des moteurs classiques, performances des moteurs sans fer» dans ce numéro. Un des principaux points faibles de ce transducteur s'avère être son comportement magnétique, longtemps occulté par une description principalement électrique.

Le marché de la reproduction sonore a aussi largement évolué vers d'autres modes d'écoute. Ainsi, les dispositifs d'écoute individuelle se répandent largement, apportant leurs problèmes spécifiques, en ce qui concerne les transducteurs eux-mêmes, mais aussi en ce qui concerne leur métrologie : ils ne rayonnent pas dans un espace extérieur, mais dans une partie de l'oreille, qui constitue une charge confinée très variable d'un individu à l'autre. L'article intitulé «La mesure des dispositifs d'écoute individuelle» présente un travail important qui est en cours, et constitue une fois encore un problème d'acoustique physique fondamentale. Une meilleure compréhension des phénomènes permet ainsi d'affiner les modèles et les méthodes de mesure, réduisant a priori l'écart qui les sépare. Cependant, estimer cet écart pose aussi un problème fondamental quand il s'agit d'analyser un système de reproduction sonore : il n'y a pas de corrélation directe entre la plupart des critères de mesure usuels, et la dissimilarité perçue par un auditeur. Comme l'expose l'article intitulé «Enceintes acoustiques : perception et mesures», les mécanismes de l'audition ont une sélectivité très particulière, ce qui modifie l'importance relative des composantes des dissimilarités à estimer. Ce problème prend encore plus d'importance de nos jours, avec le développement de la dimension spatiale de la reproduction sonore. En effet, il est inenvisageable de synthétiser exactement un champ sonore arbitraire dans un local quelconque, car cela nécessiterait une énorme quantité d'informations pour couvrir l'intégralité des fréquences audibles. La reproduction spatiale reste donc approximative, même si les développements récents sont impressionnants. Deux écoles coexistent depuis longtemps en ce domaine : soit une synthèse rigoureuse basée sur une représentation limitée du champ, qui fait l'objet de l'article intitulé «Le son 3D dans toutes ses dimensions», soit une approche créant plutôt une illusion sonore, basée elle aussi sur des méthodes rigoureuses, mais qui relève autant d'une dimension artistique que scientifique. L'article «L'approche scientifique appliquée à la prise de son» donne donc la plume à un ingénieur du son, illustrant le lien entre l'électroacoustique et la communauté «audio». Un dernier article aurait dû figurer dans ce numéro, sans un problème de santé de l'auteur. En effet, la reproduction sonore ne met pas uniquement en jeu les transducteurs : l'environnement d'écoute joue un rôle essentiel, à la fois en modifiant physiquement le fonctionnement des transducteurs, et en filtrant les signaux qu'ils délivrent. L'électroacoustique est donc aussi liée à l'acoustique des salles, que ce soit en concert, à domicile, ou dans un véhicule. Et ce dernier marché représente aujourd'hui une part de marché très importante, tout en constituant un argument de vente important pour les constructeurs automobiles. Il est donc à souhaiter que l'influence de l'environnement d'écoute puisse être traitée dans un prochain numéro de la revue.

Contacts :
LMA-CNRS
31, chemin Joseph Aiguier
13402 Marseille CEDEX 20
E-mail : herzog@lma.cnrs-mrs.fr