

# RECOMMANDATIONS

**D**u point de vue scientifique et technologique, l'ensemble de ce qui précède amène à mettre en exergue un certain nombre de thèmes de recherche ou d'activités qui présentent à la fois un intérêt pour les applications industrielles, sociétales ou environnementales et un intérêt du point de vue scientifique : s'attaquer à des problèmes difficiles pour les chercheurs est le meilleur moyen d'assurer une compétence solide pour le futur. Et ce qui peut motiver au mieux les chercheurs, ce sont les défis. La difficulté des problèmes scientifiques peut être d'ordre théorique (ainsi : comment séparer dans un fluide une composante de vitesse dite acoustique d'une composante dite turbulente ?) ; d'ordre numérique (ainsi : comment calculer un champ complexe d'un fluide à grand nombre de Reynolds ?) ; d'ordre expérimental (ainsi : comment identifier des sources acoustiques dans le rayonnement de systèmes complexes ?) ; d'ordre technologique (ainsi : comment réaliser les prototypes de matériaux qui auraient des propriétés nouvelles ?).

Comme on va le voir, les mesures prises par les décideurs peuvent être de nature variée : elles peuvent être d'incitation à la recherche, mais elles peuvent aussi être des mesures réglementaires, ou encore de sensibilisation du public. Pour la recherche, il nous paraît essentiel de favoriser la pluri-disciplinarité, les problèmes industriels et sociétaux étant rarement monodisciplinaires, tout en veillant à assurer les fondations disciplinaires.

## 1. Recommandations portant sur des thèmes scientifiques

### 1.1 Audition

Nous commençons par l'audition : il s'agit d'un vrai problème sociétal, en raison notamment du vieillissement de la population, mais aussi du manque de sensibilisation des jeunes au problème des effets néfastes des sons forts (emploi de sons de niveau très élevé dans les baladeurs, les auto-radios, les cinémas, les spectacles). Nous recommandons d'intensifier les campagnes de sensibilisation, car le problème est autant un problème d'usage et de comportement que de réglementation. À ce propos les associations qui agissent pour populariser l'importance du son dans la vie quotidienne peuvent être soutenues.

Du point de vue technologique, il ne fait aujourd'hui guère de doute qu'il est possible de réaliser des prothèses auditives bien meilleur marché : un défi serait de les réaliser au prix du remboursement actuel de la sécurité sociale et d'une mutuelle moyenne, quitte à simplifier les visites d'entretien pour les personnes dont les besoins prévisibles à cet égard sont limités. Ce pourrait d'ailleurs être une voie pour réinstaller à terme la France dans la compétition économique dans ce secteur. Bien entendu ceci n'est pas antinomique de progrès techniques, possibles grâce aux progrès de la compréhension des mécanismes de l'audition. Et dans ce domaine, nous avons montré que la France est plutôt en retard, surtout du point de vue industriel.

À la frontière entre le sociétal et le médical, la métrologie des pertes d'audition devrait faire l'objet de travaux plus actifs. La situation actuelle est qu'une surdité peut ne pas être évaluée au même niveau en un point de France ou un autre, en particulier du fait de l'absence d'oreille artificielle qui puisse servir de référence

indiscutable (notons que dans un cadre de maladie professionnelle, chaque surdité à un coût de l'ordre de 100 k€).

Enfin, la qualité sonore est un enjeu industriel (véhicules, appareils ménagers), qui vient se coupler avec la perception multisensorielle, comme en témoigne en particulier le développement du design sonore. Mettre en place des programmes de recherche pluridisciplinaires (sciences de l'ingénieur, biologie, neurosciences) s'impose, s'appuyant sur des savoirs et savoir-faire existant en France depuis longtemps. Il est également nécessaire de mettre plus efficacement en relation les chercheurs et les industriels. Enfin agir au niveau international pour que les revues scientifiques acceptent des disciplines et des approches nouvelles est également important.

### 1.2 Applications médicales

Il semble que les applications médicales autres que l'appareillage auditif, comme le diagnostic ou la thérapie, ne bénéficient pas encore d'un développement industriel suffisamment important, malgré un fort potentiel scientifique en France et le développement récent d'entreprises technologiques. Il conviendrait donc de soutenir vigoureusement ce développement (cf aussi le paragraphe sur les systèmes et milieux complexes), par exemple en renforçant le partenariat public-privé dans ce domaine.

### 1.3 Bruit

Il est inutile de s'étendre longuement sur les différents aspects du bruit, qui constitue à l'évidence déjà une grande priorité dans les politiques gouvernementales (cf ci-dessus). Il faut cependant mentionner d'abord l'importance prioritaire que l'on devrait donner au traitement des problèmes à la source, aussi bien par des études fondamentales (sur les mécanismes de génération de bruit, cf notamment le paragraphe suivant sur certains aspects physiques essentiels du bruit) que par des études psycho-sociologiques sur la maîtrise des comportements bruyants (pots d'échappement trafiqués, chiens, balladeurs...). Ces efforts coûtent a priori beaucoup moins cher à la collectivité que de traiter à grands frais les voies de propagation !

Ajoutons tout de même que des efforts scientifiques doivent encore être réalisés pour la définition d'indicateurs plus adaptés à rendre compte de la gêne sonore, en raison de la multiplicité et la simultanéité des expositions sonores, etc. Les effets du bruit sur la santé ne portent pas seulement sur l'audition : il existe également des effets non auditifs importants tels que les effets sur le sommeil par exemple. La mise au point de systèmes de contrôle passifs ou actifs, silencieux comme écrans, reste aussi de grande actualité tant pour les transports que pour le bâtiment, avec la question de la compatibilité avec d'autres fonctions (thermique, économie d'énergie ou encore compatibilité électromagnétique par exemple). Une meilleure compréhension et modélisation de la propagation du bruit vers les riverains, en particulier en milieu urbain, est également nécessaire. La France est bien placée du point de vue scientifique comme industriel, et doit le rester. Il est cependant important de noter que malgré les progrès dus à la recherche et l'innovation, et malgré l'affichage politique ambitieux, les progrès de la mise en œuvre de solutions sur le terrain tardent souvent, entretenant l'insatisfaction de la population. Toutes les professions d'acousticiens doivent en prendre conscience plus fortement et faire évoluer leurs actions en conséquence.

#### 1.4 Aéroacoustique et vibroacoustique

Il est bon de rappeler que certains problèmes scientifiques liés au bruit et aux vibrations, mais dont la problématique est beaucoup plus large, restent d'une extrême difficulté et seront encore au programme des recherches les plus avancées à moyen terme. Les méthodes numériques et expérimentales, en plein développement, doivent être soutenues. On peut citer d'abord la problématique de l'aéroacoustique, qui inclut les sources de sons liées à l'aérodynamique (pour tous les moyens de transport, mais aussi pour certaines sources d'énergie), ainsi que la propagation du son dans des milieux turbulents, que ce soit en milieu confiné ou en milieu ouvert. On peut aussi citer les effets respectifs de la combustion et de l'acoustique. Enfin plusieurs problèmes relevant de la vibroacoustique doivent être mentionnés : les bruits liés au frottement (crissement, contact roue-rail ou pneu-chaussée), ou au rayonnement de structures vibrantes.

#### 1.5 Systèmes et milieux complexes, ondes linéaires et non linéaires

Il reste, rappelons-le, important de comprendre la propagation linéaire et non linéaire dans les milieux complexes : anisotropes, hétérogènes, aléatoires, diphasiques, multi-échelles, granulaires, phononiques..., pour toutes sortes d'applications aussi diverses que l'aide à la conception de nouveaux matériaux, en particulier absorbants, le contrôle de ces matériaux, le bang sonique, la détection des explosions nucléaires par la mesure d'infrasons, l'aide à la combustion ou l'imagerie médicale..., la liste étant loin d'être exhaustive. Les micro- et nano-technologies offrent également un vaste champ de réflexions et d'applications qui posent autant de défis scientifiques que technologiques. Un effort important doit être maintenu et développé pour comprendre et modéliser la propagation des ondes dans tous ces milieux, naturels, qu'ils soient biologiques, géophysiques, ou manufacturés.

Remarquons que l'acoustique physique et ultrasonore n'est que très brièvement traitée dans les priorités gouvernementales, et seulement via les applications médicales et sous-marines, et un peu pour le contrôle non-destructif. Ceci ne semble pas refléter la réalité de la recherche en France, et risque de renforcer l'impression sans doute fréquente chez les « décideurs » que l'acoustique s'identifie au bruit, comme dans le grand public l'acoustique s'identifie au « son ». Or l'avenir de l'acoustique réside aussi dans son caractère interdisciplinaire, comme moyen de « sonder » (par exemple imager) toutes sortes de milieux. D'où à la fois une certaine force (l'acoustique est très présente dans un grand nombre de disciplines) et un certain manque de visibilité (elle n'est souvent considérée que comme une technique expérimentale).

Ces remarques amènent à recommander à la fois aux acousticiens de ne pas négliger la coordination de leurs travaux, ni d'ailleurs la coordination avec les autres sciences portant sur les ondes, et aux pouvoirs publics de considérer l'importance du soutien à la recherche fondamentale (« non finalisée ») : ceci doit être fait en finançant conjointement des projets dits « blancs », et en finançant la recherche à long terme via ce qu'on appelle le soutien de base aux unités de recherche, grâce à leur évaluation périodique.

#### 1.6 Thermoacoustique

La thermoacoustique suscite un intérêt croissant compte tenu des applications envisagées (génération d'électricité à partir d'une source de chaleur renouvelable, récupération de l'énergie perdue sous forme de chaleur, réfrigération « propre »). Bien que des progrès significatifs aient été réalisés récemment dans l'étude des systèmes thermoacoustiques, qu'ils soient de grandes tailles ou miniaturisés,

certain aspects des phénomènes thermoacoustiques restent encore aujourd'hui mal compris en raison de leur complexité (« vent acoustique », instabilités, couplage avec la thermique, etc.) et nécessitent la poursuite d'études fondamentales. Toutefois, au vu des performances atteintes par les prototypes de machines thermoacoustiques (moteurs et pompes à chaleur) développés dans les laboratoires, il est également souhaitable de développer dès aujourd'hui le transfert de technologie, en partenariat avec le monde industriel.

#### 1.7 Acoustique sous-marine, pollution sonore sous-marine

L'acoustique sous-marine a connu, en France, une « époque glorieuse » dans les années 1980, que ce soit pour des applications militaires (développement d'une nouvelle génération de sous-marin silencieux) ou civiles (dans le cadre du programme européen MAST, Marine Science and Technology). Vers la fin des années 90, elle a fortement régressé, et ce pour diverses raisons : restructuration de la DGA, disparition du programme MAST... Aujourd'hui elle est en phase de disparition par manque de volonté politique et par absence d'unités possédant une masse critique de recherche dans ce domaine. Il est important que les pouvoirs publics, militaires et civils, mesurent l'importance de conserver cette spécialité en France, en raison des nombreuses applications liées à l'océanographie, l'environnement, la pollution et l'énergie (outre les applications militaires). L'investigation par voie acoustique de l'environnement côtier, la surveillance acoustique des pêches, l'imagerie et la cartographie acoustiques constituent un enjeu majeur pour le futur. À terme, l'acoustique sous-marine française risque de disparaître laissant la voie libre à d'autres grandes puissances qui, elles, continuent à investir dans le domaine et même de manière massive, comme les Etats-Unis ou la Chine. Des forces éparpillées en France existent néanmoins et il serait important pour inverser cette tendance lourde de les fédérer générant ainsi une masse critique essentielle pour maintenir un savoir dont on peut craindre la disparition.

Dès le milieu des années 90, il s'est développé un intérêt croissant pour la pollution acoustique sous-marine et l'effet des sources anthropogéniques sur la biomasse en général et les mammifères marins en particuliers : transport maritime, exploration et production de gaz et pétrole, systèmes sonar, charges explosives sous-marines, travaux offshore, construction de parcs à éoliennes...

Plusieurs études ont été menées en Europe et outre Atlantique sur le sujet depuis. La France a été longtemps « simple observateur » dans ce débat. En 2004, le parlement européen a voté une résolution demandant aux états membres d'instaurer un moratoire sur le déploiement des sonars navals actifs à haute intensité en attendant d'en savoir plus sur leur impact sur l'environnement. En 2008, dans le cadre de la directive pour une stratégie marine européenne durable, la Commission européenne a lancé une large réflexion sur la définition de critères de « bon » environnement marin, incluant tous les apports énergétiques anthropogéniques, y compris l'énergie acoustique. Même si l'on trouve un intérêt scientifique auprès d'individus, la France possède un retard certain de plus de dix ans par rapport à des pays comme le Royaume Uni, l'Espagne ou l'Allemagne, qui ont développé à la fois des recherches en bioacoustique marine et développé des méthodes de réduction de l'impact des sources industrielles et du risque associé (construction d'éoliennes, par exemple).

## 1.8 Bioacoustique

La recherche sur l'acoustique des animaux, qui porte principalement sur les émissions sonores des animaux, est une recherche fondamentale presque absente de France, et en tout cas extrêmement dispersée. Or elle peut permettre des avancées dans la compréhension des mécanismes de production et de rayonnement du son. Le plan stratégique du CNRS à 2020 prévoit les études sur le développement des êtres vivants ; la production du son est un aspect de la biologie des animaux, et en outre elle est un outil de repérage, et peut donc aussi permettre le suivi de la biodiversité et de la qualité de l'environnement. Une fois encore la pluri-disciplinarité est indispensable.

## 1.9 Applications audio

Les applications dites « audio » représentent aujourd'hui un enjeu industriel, que ce soit pour le multimédia, l'interaction homme-machine ou la réalité virtuelle. L'audio-numérique et le son 3D pour la réalité virtuelle ont toutes sortes d'applications dans les communications mais aussi dans les transports et l'industrie. L'aspect fondamental n'est absolument pas négligeable, que ce soit du point de vue physique ou du point de vue de l'audition, et l'aspect technologique aussi, avec la question des sources et des capteurs. Mais il faut introduire l'acoustique dans des disciplines dominées par l'informatique, qui en sous-estiment l'importance. Evidemment là encore la pluri-disciplinarité est incontournable, afin que la France se hisse au niveau des pays de l'Europe du Nord.

## 1.10 Instruments de musique

On trouve encore en France les deux plus grands fabricants mondiaux d'instruments à anche haut de gamme. Il serait d'actualité d'encourager la mise au point d'instruments optimisés, ce qui n'est plus du domaine du rêve, mais fait appel à des connaissances en acoustique comme en ergonomie ou en processus de fabrication. On peut ajouter qu'une production artisanale d'instruments de musique se maintient en France, avec pour seule issue face à la concurrence, notamment asiatique, la fabrication d'instruments haut de gamme. Une telle position ne pourra être maintenue qu'au prix d'une structuration toujours plus forte des réseaux d'artisans, tout en favorisant le transfert des connaissances avec les réseaux de chercheurs en acoustique musicale.

## 2. Autres recommandations d'ordre général

La **normalisation** fait partie des enjeux de la compétition économique. Les pouvoirs publics devraient encourager les chercheurs et les ingénieurs à participer à son élaboration, en trouvant notamment des solutions d'aides financières. L'intérêt est multiple : d'abord des possibilités d'approfondissement des concepts, ensuite l'amélioration de la précision du vocabulaire qui est importante en soi pour la recherche scientifique, enfin la rencontre entre des professions différentes et les synergies qui peuvent en découler. Cette participation des chercheurs en lien avec les industriels pourrait aussi être favorisée par les sociétés savantes, et ceci vaut à l'échelle nationale comme à l'échelle européenne et internationale. Les commissions AFNOR ont souvent impulsé des recherches dans le passé, c'est le cas notamment en acoustique. On doit ajouter que l'incitation, notamment financière, à la participation des PME-PMI est aussi un enjeu important, et que l'exemple de la COFREND, en convention avec le ministère chargé de l'industrie pour le domaine du contrôle non-destructif, pourrait être étendu.

À propos de la normalisation, et plus particulièrement en ce qui concerne l'acoustique du bâtiment et de l'environnement, l'un des problèmes récurrents, paradoxalement non réglé, est qu'aujourd'hui les résultats de mesures sont donnés sans incertitudes. Depuis plusieurs années toutes les nouvelles normes de mesurages acoustiques intègrent pourtant ce calcul d'incertitudes. Les acteurs économiques ne les utilisent pas car leur prise en compte augmente les niveaux mesurés ou diminue les performances affichées, en apparence. Le point le plus crucial est celui des seuils réglementaires, par nature binaires et vérifiés sans beaucoup d'essais pour des raisons d'économie.

Plus généralement, et ceci constitue un autre enjeu, la normalisation est le support technique de la **réglementation** acoustique. Cette dernière est soit d'origine purement française, comme la réglementation du bruit dans l'environnement, soit d'origine européenne, comme celles du bâtiment et des machines, soit mondiale comme celles de l'automobile et de l'aéronautique. Les réglementations utilisent suivant le cas des normes françaises, européennes et, le plus souvent, internationales élaborées par l'ISO, par exemple. Trop souvent, l'absence de travaux pré-normatifs entraîne une faiblesse technique des normes et une difficulté à bien réglementer. Ces mêmes travaux pré-normatifs permettraient de faire reconnaître les positions françaises, d'abord dans les normes puis automatiquement dans les réglementations d'origines supranationales qui les utilisent. Pour les non spécialistes, les normes sont souvent parées de toutes les vertus alors que les utilisateurs en déplorent souvent la faiblesse, l'imprécision ou l'irréalisme même s'ils en apprécient le confort, le pire étant l'absence de norme. Elles sont des plus petits dénominateurs communs qui s'élaborent par consensus et où celui qui amène une solution n'a pas besoin de beaucoup la justifier pour la faire adopter. Toute modification ultérieure d'une norme demande beaucoup de temps et d'énergie, surtout quand la réglementation l'utilise. Indépendamment des normes, la fixation de seuils réglementaires mériterait des études plus poussées, par exemple dans les domaines de l'audition, de la perception et de la gêne.

Les **sociétés savantes**, au moins en Europe, jouent un rôle crucial dans les échanges scientifiques. Elles vivent pour la plupart principalement de l'organisation de congrès, dont les frais sont payés par des organismes publics, soit via l'inscription des participants, soit via des subventions. Ce sont souvent les congrès qui permettent de financer les revues scientifiques. Le soutien direct aux associations par les pouvoirs publics, reposant sur **une évaluation et un contrôle stricts**, qui supposent une organisation qui aurait elle-même un coût, présenterait beaucoup d'avantages et limiterait des activités inutiles. Ceci est particulièrement vrai à l'échelle européenne, où à l'évidence les sociétés savantes européennes jouent un rôle très important pour la structuration de l'Espace Européen de la Recherche, avec un rapport efficacité/prix sans commune mesure avec celui des autres mécanismes.

La **revue *Acta Acustica united with Acustica*** mérite de rivaliser avec son homologue américaine JASA. Ceci est de la responsabilité de tous : auteurs comme experts et rédacteurs associés, mais surtout à travers les contacts avec les autres européens, le but n'étant pas d'en faire une revue française.

Structurer les formations aux **professions du son**, de niveau allant du baccalauréat à la licence, permettrait aux différents métiers de techniciens du son d'être formés sur des bases solides, particulièrement importantes pour ce type de métiers en perpétuelle évolution. Ceci pourrait être fait par la création de BTS ou DUT, allant au-delà d'une simple option, et ne concerne pas a priori le niveau d'ingénieur du son, pour lequel les formations sont bien identifiées.