



Ecole d'été de Physique – e2Phy

Villeneuve d'Ascq – Août 2004

**« DE LA PHYSIQUE DU SON ...
À L'ART DE S'EN SERVIR ! »**

Jean-Claude DAMIEN

*Université des Sciences et Technologies de Lille + Enic TELECOM Lille 1
Professeur – Dr ès Sc.*

1. Introduction

Le son est, sans aucun doute pour moi, ... un inconnu célèbre !

Le son, tout comme la lumière, le courant électrique ou la gravité, est en effet un phénomène physique connu de tous mais, en revanche, l'Acoustique est beaucoup moins souvent enseignée que ne le sont l'Optique, l'Electricité ou la Mécanique.

Dans le langage courant, le mot « son » désigne aussi bien la sensation auditive que le phénomène physique qui la provoque.

Parole, musique et bruit sont les 3 catégories dans lesquelles on peut ranger la quasi totalité des sons d'origine naturelle ayant une certaine importance pratique.

Dans le domaine « audio », l'être humain est naturellement capable d'émettre des sons (voix parlée ou voix chantée) et capable de les recevoir (audition).

Ce n'est pas le seul être vivant à posséder un « émetteur-récepteur audio », mais c'est sans conteste celui qui a développé, avec la parole, le codage sonore le plus sophistiqué dont il se sert de façon permanente pour échanger, avec les autres humains, des informations élaborées et pas uniquement des sons d'alerte ou de reconnaissance.

Le système dual parole/audition est notre mode de communication interpersonnelle le plus ancien, le plus utilisé et le plus rapide.

Ceci a comme conséquence logique que, dans de très nombreux cas concrets, l'oreille humaine est la destination finale de systèmes ou processus utilisant le son.

Y a t'il un lien entre Acoustique et Art ?

Si on associe couramment bruit et nuisance, on accroche plus facilement à la production artistique la musique, la voix chantée et même la voix parlée au théâtre ou au cinéma ... et c'est pour cette raison que j'ai jugé pertinent d'y consacrer un peu d'attention.

Je me permettrai en outre d'attirer l'attention sur le fait que, sur un plan esthétique et en dehors de ses performances acoustiques qui sont stupéfiantes, la forme joliment contournée, la taille raisonnable et la position dans l'espace de ce petit appendice que nous avons sur le côté de la tête font de l'oreille humaine un objet qui n'a jamais laissé indifférent l'artiste qui sommeille en chacun de nous !

Je me propose, dans cet exposé qui est le point d'appui écrit d'une présentation multimédia faite pendant e2Phy, de présenter de façon condensée un florilège d'éléments que je considère comme incontournables et illustratifs de l'Acoustique pour la replacer dans le grand ensemble des Sciences et des Technologies.

Le propos n'est pas de vous imposer un cours de Physique mais plutôt de m'attacher à la présentation d'applications qui sont associées à des facettes variées de l'Acoustique pour en montrer l'étendue.

2. Eléments d'Acoustique physique

2.1 - Les grandeurs physiques

Le son est une perturbation de pression provoquée dans un milieu élastique et qui s'y propage.

Contrairement aux ondes électromagnétiques, la présence d'un milieu matériel est indispensable et les phénomènes sonores correspondent donc à la propagation d'ondes dites « de matière », ce qui ne veut pas dire qu'il y a transport de matière mais simplement transmission de proche en proche d'une perturbation de ce milieu matériel, sous la forme d'un état de compression ou de dilatation du milieu.

Dans les fluides, les conditions de la propagation sont liées directement à la compressibilité.

Pour en rendre compte, il faut alors décrire l'état du fluide (pression, volume, masse volumique) ainsi que le processus thermodynamique mis en œuvre lors du passage de l'onde (température, compressibilité, célérité).

Cela fait intervenir des grandeurs permettant de décrire les propriétés mécaniques d'oscillation des milieux étendus et de propagation de perturbations (masse, élasticité, amortissement, fréquence, déplacement, vitesse vibratoire, amplitude, intensité, viscosité, ...).

Les principales grandeurs acoustiques utiles pour l'étude des sons audibles sont :

- la fréquence (mesurée sur un échelle linéaire, elle varie entre 20 Hz et 20 kHz)
- la pression acoustique (mesurée sur un échelle linéaire, elle varie entre 20 μ Pa et 200 Pa)
- l'intensité acoustique émise par une source (mesurée sur un échelle linéaire, elle

varie entre 10^{-12} et 100 W/m^2)

- l'intervalle de fréquence (mesuré sur une échelle logarithmique \log_2 , par rapport à une origine à 1000 Hz, il est défini en octaves)
- le contenu fréquentiel du son émis (pour un même fondamental, il comporte souvent une série harmonique caractéristique de la source)
- la célérité c du son (qq hm/s pour les gaz, # 1500 m/s pour l'eau et qq km/s pour les solides)
- l'impédance acoustique spécifique ρc d'un milieu de masse volumique ρ , mesurée en Rayl (SI) et variant de # 415 dans l'air ambiant à $45 \cdot 10^6$ ou plus dans l'acier.
- la durée d'émission du son avec une valeur critique de # 170 ms pour l'oreille.
- la directivité de la source ou du récepteur, qui affectent certains paramètres précédents (pression, intensité) selon la direction considérée pour la propagation du son.

Toutes ces grandeurs permettent de décrire et de préciser les sons comme des phénomènes physiques, quels que soient la source ou le récepteur ... à une exception majeure près ... le récepteur que constitue l'oreille humaine, qui fonctionne de façon remarquable mais qui ne permet cependant pas de faire de mesure ... au sens physique du terme ! Cela m'amène plus loin à aborder la psychoacoustique.

2.2 - La difficulté spécifique du domaine

L'extension considérable des domaines couverts par les grandeurs physiques relatives aux sons du quotidien pose des problèmes de mesure et/ou de précision.

Dans le domaine des fréquences, l'appareil doit couvrir 3 ordres de grandeur.

Dans le domaine des pressions acoustiques, l'appareil doit couvrir 7 ordres de grandeur.

Dans le domaine des intensités acoustiques, l'appareil doit couvrir 14 ordres de grandeur.

Pour pallier de telles difficultés, on a fait appel à des échelles logarithmiques, en transposant la mesure linéaire absolue avec des unités SI en une mesure relative par rapport à une valeur de référence judicieusement choisie.

En fréquence, le choix d'une échelle logarithmique à base 2 conduit au découpage de la bande de fréquence, à partir de la fréquence 1000 Hz, en octaves pour le chant et la musique en général et en tiers d'octaves pour les jeux de filtres des sonomètres professionnels.

En intensité ou en pression, on fait le choix d'une échelle logarithmique à base 10 et d'une référence placée par convention au seuil de détection de l'oreille humaine. Pour adapter l'échelle et la précision de la mesure à la sensibilité de l'oreille humaine, on préfère le décibel (dB) au Bel qui contracterait trop fortement les échelles linéaires initiales.

On définit alors les niveaux (levels) acoustiques :

- le niveau d'intensité NI ou IL (Intensity Level) : mesuré sur une échelle logarithmique \log_{10} par rapport à la référence SI d'intensité égale à 10^{-12} W/m^2 ; il varie de 0 à 140dB.
- le niveau de pression acoustique ou SPL (Sound Pressure Level) : mesuré sur une échelle logarithmique \log_{10} il varie bien sûr aussi de 0 à 140dB.

Notons que, comme l'intensité I est proportionnelle au carré de la pression p , la référence d'intensité précédente correspond à une référence de pression voisine de 20 μPa pour les sons aériens à T ambiante.

3. **Eléments d'Acoustique physiologique**

Dans la gamme des sons audibles, l'être humain est équipé naturellement de l'émetteur (les organes de la phonation et la parole) et du récepteur (les organes de l'audition et l'ouïe).

Cette caractéristique physiologique joue un rôle très structurant pour l'étude de l'acoustique.

Beaucoup de sons sont en effet produits pour être détectés et interprétés par l'oreille humaine.

C'est bien sûr la cas de la parole et de la musique mais c'est vrai aussi pour toute une panoplie de sons depuis le cri, la cloche¹, le klaxon, la sirène, le sifflet des bouilloires ou cocottes à pression, le signal d'alarme, le bip sonore jusqu'au « psttt », au « jingle », aux bandes blanches sonores... etc...

3.1 - L'oreille et l'ouïe

L'oreille comporte 3 parties principales :

- l'oreille externe qui comprend l'ensemble [pavillon + conduit auditif externe jusqu'au tympan].

¹ Cloche d'église, clochers de tempêtes des monts Lozère, carillons des villes flamandes, cloche de brume de la côte du Maine aux USA, cloche des passages à niveau, clarines des troupeaux d'alpage, sonnerie d'entracte, de fin des cours, sonnerie de franchissement des portillons de sécurité ...

Adapté à un fonctionnement dans l'air, cet ensemble a des dimensions et une conformation qui permettent une transmission optimisée des fréquences allant de 2 à 7 kHz. Par rapport aux fréquences basses (< 500 Hz), cette transmission se fait en effet avec un gain de 10 à 20 dB.

- l'oreille moyenne, entre le tympan et les deux fenêtres ronde et ovale, qui est une cavité remplie d'air, logée dans l'os temporal.

Elle contient les trois osselets [marteau, enclume et étrier] qui assurent la transmission mécanique, vers le liquide emplissant la cochlée, des vibrations aériennes reçues par le tympan.

- l'oreille interne [cochlée + vestibule + 3 canaux semi-circulaires] qui est une cavité complexe, remplie de liquide, ayant à la fois une fonction auditive [cochlée], et une fonction d'équilibration de l'être humain [système vestibulaire].

La cochlée a une forme de limaçon ayant la structure d'un tube double dont la paroi basilaire est composée par l'épanouissement du nerf auditif sous forme de cellules ciliées.

Selon la zone, ces cellules ont des tailles différentes et sont spécialisées dans la détection de vibrations de fréquences audibles différentes.

Comme toute structure mécanique qui vibre, elles peuvent casser si l'amplitude de vibration devient excessive. Si cela se produit, contrairement aux cils ou aux cheveux et en dépit de leur nom, elles ne repoussent pas !

Comment entendons-nous ? Le fonctionnement de l'oreille est très sophistiqué, très complexe et beaucoup de ses caractéristiques sont tout à fait remarquables, depuis le passage du son du milieu aérien au milieu liquide, jusqu'aux propriétés mécaniques et électro-chimiques de l'oreille interne. La réponse précise à une telle question sort du champ de ce bref exposé.

Donnons simplement une information « technique » qui concerne la transmission d'une vibration acoustique, reçue par l'oreille externe en milieu aérien (dont l'impédance acoustique spécifique à T ambiante vaut environ 415 Rayls) vers le milieu liquide emplissant l'oreille interne (l'impédance acoustique spécifique de ce liquide, proche de l'eau, vaut environ $1,5 \cdot 10^6$ Rayls).

Sans adaptation d'impédance, on calcule que l'atténuation du niveau sonore serait de 30 dB !

Par un astucieux système utilisant la voie mécanique, l'oreille moyenne réalise à la fois la transmission de la vibration acoustique aérienne externe (la vibration du tympan est transmise mécaniquement à la fenêtre ovale par la chaîne des osselets), l'adaptation d'impédance, la sélectivité permettant de diminuer le gain pour les basses fréquences et la protection réflexe contre les sons intenses !!

3.2 - Les organes de la phonation et la parole

Ici encore, l'habitude est de décrire le système phonateur de l'être humain en le divisant en 3 parties :

- la soufflerie pulmonaire qui, en utilisant de façon contrôlée les organes de la respiration, permet d'utiliser le souffle pour générer des séquences sonores variées

Donnons ici une information « technique » : le DAB (Débit d'Air Buccal) varie entre une valeur de $153 \text{ cm}^3/\text{s}$ chez l'homme et $136 \text{ cm}^3/\text{s}$ chez la femme.

- le larynx (les 5 cartilages + les cordes vocales), système vibreur qui génère les sons vocaliques fondamentaux et en fixe la fréquence (hauteur).

En bloquant le souffle au niveau de la glotte, on crée une surpression momentanée sur les cordes vocales qui vont alors fonctionner comme un système vibrant à relaxation.

Donnons une information « technique » : la SGP (Sub Glottic Pressure) varie entre 10 hPa chez l'homme et 6 hPa chez la femme (à comparer à la valeur 1013 hPa de la pression atmosphérique standard).

- les résonateurs constitués des cavités que sont la bouche, le nez et le pharynx. Donnons une information « technico-plastique » : cet ensemble de cavités résonantes comporte des parties dures non déformables (voûte du palais, dents) et des parties molles déformables (langue, joues, lèvres).

Ces cavités, qui fonctionnent comme des résonateurs de Helmholtz, peuvent être modifiées à volonté en ouvrant plus ou moins la bouche, en modifiant la forme des lèvres ou des joues, en aplatissant ou en gonflant la langue, en ouvrant ou fermant la cavité nasale ... ceci a pour effet de renforcer ou d'atténuer certains harmoniques du son fondamental, donnant son timbre à la voix.

Comment parlons-nous ? La réponse à cette question intéresse des situations fort différentes, depuis le placement de la voix pour un orateur ou un chanteur, un travail en phonétique ou linguistique, le métier de l'orthophoniste et jusqu'au développement de solutions techniques pour le traitement artificiel de la voix humaine, pour la synthèse de la parole ou la reconnaissance vocale.

Pour expliquer la voix parlée, il est nécessaire de séparer les sons de voyelles et les sons de consonnes qui ne sont pas générés de la même façon et posent des problèmes totalement différents pour leur synthèse.

Je limiterai mon commentaire à ce seul dernier point :

- les sons vocaliques mettent en jeu les cordes vocales et les résonateurs. Ils sont peu nombreux, la durée de leur émission est assez longue, ils sont périodiques et possèdent un contenu fréquentiel riche qui peut cependant se résumer à 4 (ou même 2) bandes de fréquences spécifiques (les formants) où se concentre l'énergie acoustique.
- les sons consonantiques s'apparentent à des bruits très variés, généralement brefs voire transitoires, qui encadrent les sons de voyelles. Ce sont des éléments essentiels pour la signification sémantique du codage de la parole et c'est leur évolution dans le temps qui la leur confère.

Donnons une interprétation simplifiée admise généralement par les linguistes en première approche : le son de voyelle serait en quelque sorte l'onde porteuse du message véhiculé par la parole (en termes artistiques on parlerait de musique de la voix, d'intonation, de mélodie, de caractère esthétique ...), les sons de consonnes apporteraient l'essentiel du contenu sémantique.

Fourier nous a appris qu'il est beaucoup plus facile de synthétiser un signal long et périodique qu'un signal bref et apériodique.

On s'attend donc à éprouver, en synthèse de la parole ou en reconnaissance vocale, de sérieuses difficultés avec les consonnes, qu'elles soient situées au milieu d'un mot (les problèmes étant alors leur brièveté et l'étendue du domaine fréquentiel concerné), ou en fin de mot quand elles génèrent une liaison² qui ajoute aux deux précédentes une difficulté sémantique pour identifier deux mots consécutifs liés (et pas un seul mot plus long !).

4. Eléments d'Acoustique psychologique

Pour comprendre l'ensemble des mécanismes de l'audition, il est nécessaire de mener une étude de type expérimental ... et c'est loin d'être simple ! et d'établir des relations quantitatives entre ce qui est physiquement mesurable (un stimulus acoustique) et ce qui est ressenti par le système auditif (des perceptions ou sensations auditives).

Il s'agit donc tout simplement de la quantification d'une sensation !

Les physiciens connaissent déjà ce genre de problème en photométrie où l'on souhaite « chiffrer » les sensations visuelles de l'œil humain pour les comparer aux mesures radiométriques effectuées avec des photodétecteurs.

On introduit dans ce cas un double système d'unités qui s'appliquent aux mêmes grandeurs physiques.

Pour quantifier la puissance rayonnée par une source quasi ponctuelle dans l'espace qui l'entoure, on utilise par exemple le Watt s'il s'agit d'un flux d'énergie non visible et le lumen s'il s'agit d'un flux lumineux visible.

Pour quantifier l'intensité (donc le flux d'énergie émis par cette source dans un angle solide donné), on utilise le Watt / stéradian pour un flux énergétique non visible et le lumen / stéradian (ou candela³) s'il s'agit de lumière visible.

En Acoustique, on procède de façon analogue avec un double système d'unités mais sans éviter complètement, surtout pour des raisons historiques, le double vocabulaire pour les « grandeurs » !

4.1 - Caractères⁴ des sensations auditives et grandeurs physiques

Dans le domaine des fréquences, les microphones sont des capteurs qui ont souvent une courbe de sensibilité plate.

Dans le domaine des pressions acoustiques, ils sont donc capables de couvrir une gamme extrêmement étendue avec une sensibilité constante.

Il n'en est pas du tout de même pour l'oreille humaine qui, non seulement possède des limites en fréquence et en pression ou en intensité, mais qui présente aussi une sensibilité variable avec les paramètres acoustiques.

En fréquence, l'oreille standard en parfait état fonctionne en théorie entre 20 Hz et 20 kHz et possède sa plus grande sensibilité vers 4 kHz où elle est presque capable de détecter le bruit de la circulation sanguine⁵ dans nos propres artères, mais ces limites varient beaucoup avec les individus, avec l'âge et avec ... les conditions d'utilisation !

Pour toute oreille, la sensibilité est plus faible à haute fréquence et beaucoup plus faible encore à basse fréquence ... ce qui rend les sons graves dangereux car lorsqu'on les perçoit, ils sont déjà très intenses !

² l'exercice célèbre proposé par Lucien Guitry à ses élèves du Conservatoire : « Je veux-zé j'exige » pose de sérieux problèmes de diction car il implique une gymnastique précise et, phonétiquement, des problèmes d'analyse !

³ unité légale de mesure de l'intensité lumineuse qui est l'une des 7 grandeurs fondamentales du système international d'unités SI.

⁴ Pour éviter les confusions, je fais ici la distinction entre « grandeurs » (au sens de la physique) et « caractères » (au sens de la psychophysique).

⁵ On prend conscience de ce seuil tout proche en cas de forte fièvre quand, la circulation sanguine s'accélérate, on entend le sang « battre dans la tête » !

La perte d'audition est rapidement importante pour les personnels exposés au bruit (chaudronnier, imprimeur, mécanicien, menuisier, mineur, personnel de piste d'aéroport, pilote de F1 ...) et peu ou pas protégés. Rares sont les personnes de plus de 60 ans qui détectent des fréquences supérieures à 8 kHz ! Plus rares encore sont les habitués des discothèques branchées, les DJ ou les accros du baladeur qui ne présentent pas, même jeunes, de déficit auditif majeur !

Les caractères principaux permettant de décrire les sensations auditives, ainsi que les unités et les grandeurs physiques auxquelles ils sont liés en première approximation, sont :

- la sonie [*loudness*], mesurée en sones et liée à l'intensité acoustique. Le sone est défini conventionnellement comme la valeur de la sonie d'un son pur (1000 Hz) ayant une intensité correspondant à un niveau d'intensité de 40 dB.
- le niveau de sonie [*loudness level*], mesuré en phones et lié au niveau d'intensité. Par définition il y a, pour un son pur à 1000 Hz, identité entre les valeurs du niveau de sonie (en phones) et du niveau d'intensité (en dB).
- la tonie [*pitch*] ou encore hauteur du son, mesurée en mels et liée à la fréquence
- le timbre [*timbre*], grandeur complexe liée au contenu fréquentiel
- la durée, qui influe sur la tonie (< ou > 10 ms) mais aussi sur la sonie (durée critique de 170 ms environ)
- les différences interaurales qui permettent la localisation spatiale d'une source.

Dans les domaines en lien avec l'Acoustique, il existe donc un monde qui parle de fréquence, de niveau d'intensité, et mesure en Hertz ou en dB, et un autre monde qui parle de tonie (ou de hauteur), de niveau de sonie, et quantifie en mels ou en phones.

4.2 - Sons purs, sons complexes

Définis pour des sons purs (sinusoïdaux), les caractères précédents permettent, en première approche, de quantifier les sensations auditives et de les relier par conséquent à des grandeurs physiques mesurables. Il faut cependant noter que, même pour un son pur, presque jamais la relation entre un paramètre physique sonore et la sensation générée n'est simplement bi-univoque.

Donnons l'exemple de la sonie : si la relation [sonie / intensité] était bi-univoque, la sonie ne devrait pas dépendre de la fréquence !

Or, à cause de la forme de la courbe de sensibilité de l'oreille (qui diminue à hautes fréquences et diminue beaucoup à basses fréquences), à pression acoustique ou à intensité égales, un son aura une sonie beaucoup plus forte dans les fréquences moyennes.

Il faut donc se méfier des sons graves (caisson de basses des sonorisations), qui sont dangereux pour l'oreille. En effet, lorsque nous les détectons, leur niveau d'intensité est déjà très élevé (on peut même ressentir les compressions mécaniques de la cage thoracique !) et souvent déjà destructeur pour les fragiles cellules ciliées de la cochlée, spécialisées dans la détection des graves et qui n'ont aucune raison de ne pas vibrer ... avec de trop grandes amplitudes ... donc de casser !

Pour les sons complexes, comportant donc au minimum plusieurs fonctions sinusoïdales, les relations sont plus délicates encore à établir.

Quand ils sont stationnaires, on fait une analyse spectrale et on peut travailler sur chaque composante.

Pour traiter les cas plus généraux, qui sont proches de la réalité, on équipe les sonomètres de systèmes électroniques de pondération de l'énergie sonore totale dans le spectre.

On utilise trois courbes de pondération, A, B et C, inversement proportionnelles aux courbes d'isophonie à 40, 70 et 100 phones (donc adaptées aux sons faibles, médiums et forts).

Cette méthode est une première approche pour faire avec un sonomètre, non pas la mesure du niveau d'intensité effectif d'un son complexe, mais la mesure de la sonie perçue ... donc pour se mettre en anticipation à la place de l'oreille ... et faire en sorte de lui éviter l'insupportable !

4.3 - Bruit masquant – Effet cocktail

Lorsque l'oreille reçoit simultanément deux sons purs, de fréquences différentes, dans certaines conditions l'un des deux peut ne pas être perçu : c'est l'effet de masque.

Cet effet dépend des fréquences et des niveaux d'intensité NI_1 du son masqué et NI_2 du son masquant.

Les mesures effectuées sur des sons purs mettent principalement en évidence les caractéristiques suivantes :

- l'effet de masque est négligeable quand NI_2 est faible
- l'effet de masque croît ensuite beaucoup plus vite que NI_2

- l'effet de masque est maximum pour les fréquences proches de celle du son masquant
- les basses fréquences sont les plus masquantes
- les hautes fréquences sont les plus masquées

Cet effet masquant correspond à une déformation dissymétrique de la courbe du seuil d'audition en présence du bruit masquant.

Si on étend aux sons complexes (la parole en est un exemple) les caractéristiques de l'effet de masque, on comprend que la meilleure façon de masquer une voix est de parler en même temps que l'orateur ... tous les profs savent cela d'expérience, nos élèves majoritairement l'ignorent !

Il est cependant possible pour un être humain de parvenir à « entendre » une voix, donc de suivre une conversation, dans un environnement bruyant de nombreuses voix : c'est l'effet cocktail !

Le traitement binaural permet en effet au cerveau d'utiliser les informations légèrement différentes reçues par les deux oreilles pour augmenter le rapport S/B et pour supprimer ou réduire les échos éventuels.

En faisant un effort de concentration, on parvient ainsi à localiser une source particulière dans un ensemble de sources semblables !

Une telle performance est inaccessible à un microphone classique, même d'excellente qualité.

Pour y parvenir, il faut utiliser un « micro canon », particulièrement directif, et le pointer avec précision sur la source choisie.

5. Exemples d'applications

Les bases essentielles de théorie étant rappelées, nous pouvons maintenant décrire un panel d'applications.

Il serait difficile et très fastidieux de chercher à être exhaustif tant les domaines d'application de l'Acoustique sont nombreux et variés.

Je vais donc me contenter de « feuilleter » un choix de situations qui, par leur diversité, illustreront je l'espère l'importance scientifique, technologique, économique ou humaine qu'il y a à étudier l'Acoustique, donc à l'enseigner !

5.1 - Maîtrise du bruit (transports, habitat, industrie)

Il est important d'être convaincu que la meilleure façon de se protéger du bruit est de le limiter à l'émission ... même s'il n'est pas toujours évident d'y parvenir aisément et à coût faible !

Une fois le bruit émis, il est en général bien difficile de s'en protéger !

- Bruits de moteurs à explosion, moteurs électriques, réacteurs : pour réduire l'émission sonore des moteurs thermiques dans l'environnement, on peut utiliser des solutions associant atténuateur, suspension filtrante (silent blocks) et capitonnage du compartiment moteur.

Pour les moteurs thermiques comme pour les réacteurs, c'est par un travail soigné de choix techniques et de design des pièces (dessin du collecteur d'échappement, forme et implantation des ailettes, taille et configuration du Venturi ...) que l'on diminue le niveau sonore du moteur à l'émission.

Les moteurs électriques, notoirement moins bruyants, peuvent cependant émettre des sons intenses, en particulier lorsqu'ils sont en phase d'accélération ou de décélération sous charge importante (citons à ce propos la résonance acoustique très intense, à l'accélération ou au freinage, de certaines rames du VAL, le métro automatique de l'agglomération lilloise).

On sait aussi que l'ordinateur, cet équipement devenu omniprésent dans les bureaux où nous travaillons, émet un ronronnement permanent qui provient ... du moteur électrique faisant tourner le ventilateur de refroidissement des composants électroniques qui, eux, fonctionnent silencieusement !

- Bruit dans l'habitacle : quelles en sont les sources ? Ils ont, selon le type de véhicule et sa vitesse, pour origine les explosions dans les cylindres mal canalisées par le collecteur d'échappement, le sifflement du turbo-compresseur, celui de l'alternateur ou un comportement aérodynamique imparfait.

A cause de la compacité du turbo ou de l'alternateur et de la nécessité de les refroidir efficacement, les bruits importants émis à vitesse élevée par ces deux équipements sont les plus importants et les plus difficiles à réduire.

On s'en protège par les suspensions filtrantes et le capitonnage.

- Bruits dans l'habitat : les plus fréquents sont produits dans le logement même ou à l'intérieur de l'immeuble (canalisation, ascenseur, bruits d'impact sur le sol, de collectivité ...) ou dans le voisinage immédiat (roulement de train, métro, automobile) et transmis par voie solidienne.

C'est dans la phase de construction même que l'on peut sinon les éliminer, du moins les réduire et tenter d'éviter qu'ils ne soient transmis dans les dalles ou cloisons (fractionnement des dalles de sol et de toiture,

insertion dans les parois solides de joints en matériaux déformables, moquettage des sols, tronçon de canalisation flexible, manchons en caoutchouc, plots antivibratiles, ...).

Dans un immeuble mal conçu, il est pratiquement impossible de s'en protéger.

D'autres bruits proviennent de l'environnement (automobile, avion, métro, train, usine...) et sont transmis surtout par voie aérienne. Ils pénètrent dans le logement par les façades, le toit et surtout par les ouvertures (fenêtres et portes).

Des murs épais, des ouvertures petites permettent de les réduire fortement.

On les réduit aussi en limitant ou en perturbant leur propagation par la construction de murs anti-bruit, par le modelage du sol ou par l'implantation paysagée de bouquets d'arbres et de végétaux à feuillage caduc ou persistant.

- **Bruits industriels de machines** : on peut utiliser des solutions de type diffuseur/translateur de fréquence, plots antivibratiles, capotage, écran, filtrage.
Dans le cas particulier où le son émis est un son pur, on peut le canaliser en le guidant et le supprimer par interférences destructives.
Dans beaucoup de cas, il continue cependant à y avoir, au poste de travail, un niveau de bruit élevé. Il est donc prudent, voire nécessaire au regard de la législation, de munir les personnels exposés de protections individuelles.
Selon les usages, il y a lieu de prévoir une adaptation acoustique spécifique des locaux (classe, living-room, bibliothèque, restaurant de collectivité, cathédrale, salle de concert, studio d'enregistrement ...)
- **Sons intenses et vibrations mécaniques** : un satellite embarqué dans la coiffe d'un lanceur est un appareil scientifique coûteux, complexe et construit pour résister au vide et aux fortes variations de T mais dont la masse doit être limitée au minimum.
Beaucoup de composants sont fragiles et ne supportent pas les vibrations intenses provoquées par des niveaux sonores élevés, supérieurs à 140 dB environ.
Pour le lanceur Ariane V par exemple, au moment de l'allumage des moteurs auxiliaires à poudre et du moteur principal Vulcain, le niveau de bruit sur le pas de tir atteint 192 dB.
Avec l'atténuation de 6 dB par doublement de la distance, on ne peut guère espérer un niveau « naturel » beaucoup inférieur à 158 dB à 50 mètres de hauteur, au niveau de la coiffe.
Pour gagner l'essentiel des 18 dB manquants (c'est énorme !), on utilise un déluge de pluie au voisinage du sol (qui a aussi comme rôle de réduire l'effet destructeur sur les équipements au sol de la température des flammes qui atteint 3500 K).
100 m³ d'eau sont alors pulvérisés en quelques minutes ! Cet énorme nuage de gouttes d'eau fractionne l'onde sonore en lui imposant des parcours en zig-zag par réflexions aléatoires successives qui accroît considérablement la distance effective entre la source et la coiffe, dévie une grande partie de l'onde vers des directions non gênantes pour l'équipement dans la coiffe, réduit fortement la réflexion des ondes par le béton du pas de tir, diminue donc beaucoup l'énergie sonore transportée par l'onde jusqu'au organes sensibles du satellite.
On complète l'atténuation en tapissant l'intérieur de la coiffe avec des panneaux de résonateurs de Helmholtz dont le volume est ajusté pour absorber l'énergie acoustique dans la région la plus gênante et surtout vers les fréquences basses (donc avec des résonateurs de volume assez important).

5.2 - Environnement sonore – Acoustique des locaux

- **Croissance / Décroissance du son** : dans un local fermé, quand on met en marche une source sonore, on peut montrer que le niveau d'intensité évolue selon une loi de type « charge de condensateur » et selon une loi de décharge quand on coupe cette source.
Le temps $[\tau = 4V / ac]$ caractéristique du comportement exponentiel dépend du volume V du local, de la célérité c du son dans l'air (qui est le fluide de propagation le plus habituel dans une pièce !) et de a, le pouvoir global d'absorption de l'énergie acoustique par les parois du local.
Ce facteur a dépend lui-même du coefficient d'absorption α_i de chaque matériau i constitutif des parois et de la surface S_i qu'il occupe.
Quelles conséquences entraîne l'existence d'une telle loi ?
Plus le local est vaste et moins l'exponentielle croît ou décroît vite.
Plus les murs sont faits de matériaux durs, moins leur absorption est forte et plus longtemps il faut donc pour atteindre la valeur asymptotique en énergie, ou pour retrouver le silence.
Ce sont deux situations typiques où une salle a un comportement fortement résonant.
- **Adaptation acoustique des locaux** : selon la destination d'un local (musique, discours, activité intellectuelle, sommeil, atelier de fabrication, ...) son comportement acoustique doit être adapté pour satisfaire les paramètres de fonctionnement de l'oreille humaine dont les principaux ont été rappelés ci-dessus et souvent aussi pour respecter la législation en vigueur.

Un autre facteur important est évidemment la taille du public que la salle doit accueillir car cela conditionne évidemment son volume V et on n'a pas a priori la même valeur de τ dans des locaux de volumes très différents (cathédrale, chambre, cinéma, classe, hall d'usine, réfectoire, salle de concert, studio, théâtre, ...)

Dans une salle où le temps caractéristique τ est grand (cathédrale, église, hall d'usine ...), l'énergie acoustique provenant d'une source (par exemple l'orifice d'un instrument de musique, la bouche d'un orateur qui parle, une machine en fonctionnement ...) augmentera ou diminuera lentement en un point donné de la salle (par exemple au niveau d'une oreille qui écoute).

Des sons émis successivement (par exemple des notes ou des syllabes constituant des mots) vont donc se superposer les uns aux autres s'ils sont émis trop rapidement. L'intelligibilité de la mélodie ou du discours va donc en souffrir énormément.

Il n'y a que deux possibilités d'accroître l'intelligibilité d'un message sonore dans une telle salle : modifier le rythme d'émission des sons (pour faire en sorte que les sons soient suffisamment détachés les uns des autres) ou alors diminuer le temps caractéristique τ de la salle en jouant sur le seul paramètre modifiable qui est le paramètre a .

S'il s'agit de paroles, une solution pour rendre intelligible un discours dans une grande salle sonore sans faire de traitement acoustique des parois est celle qu'adoptent tous les prédicateurs en chaire : ils s'efforcent de parler très lentement !

S'il s'agit de musique, cette possibilité n'existe plus et on devine que l'on pourrait par exemple jouer de la musique de Bach dans une grande salle sonore mais certainement pas du Mozart car on ne peut pas ralentir le rythme prévu par le compositeur sans trahir sa composition.

Dans ce cas, la seule solution va reposer sur un traitement acoustique du local lui-même : c'est ce que l'on fait dans un théâtre ou une salle de concerts.

Reste à évoquer quelques cas compliqués.

Le premier est celui d'une grande salle de conférences ou d'un grand amphithéâtre. Comme on ne peut pas imposer à un conférencier (ni à un prof !) de parler lentement, la salle ne doit pas être trop résonante ce qui impose à certaines de ses parois de ne pas être trop « acoustiquement réfléchissantes ». Comme les distances sont grandes et certaines parois absorbantes, la puissance sonore de la source (la voix de l'orateur) va, en général, être insuffisante pour produire un niveau d'intensité confortable en tous les points de la salle. Il faudra donc équiper l'orateur d'un microphone et la salle d'un système de hauts-parleurs judicieusement répartis.

Le cas le plus difficile pour l'acousticien est sans conteste celui des locaux où s'ajoutent des contraintes sanitaires draconiennes (restaurant de collectivité, salles d'hôpital).

La nécessité d'éviter la prolifération de bactéries impose aux parois d'être quasi-lisses et lessivables donc constituées de matériaux plutôt « durs ». On ne peut alors que recourir à des aménagements paysagés avec des écrans flexibles en bois ou en panneaux ajourés qui, à défaut de réduire efficacement le niveau sonore ambiant, protègent un peu l'intimité des conversations entre tables voisines et ont surtout un rôle décoratif en cassant la perspective rectiligne de ces grandes salles et en contribuant à réduire l'impression de foule !

Il convient de signaler aussi que la géométrie de la salle a une importance très grande.

Il existe en effet des formes qui génèrent des anomalies fortes de la répartition de l'énergie acoustique dans la salle. Ce sont surtout les grandes surfaces concaves (dôme de cathédrale, voûte de nef, parois de salle en partie cylindriques, coupole en partie sphérique, verrière du Grand Palais, voûte des stations du métro parisien, ...) et les dièdres aigus (amphithéâtre à gradins) qui induisent physiquement, par effet de focalisation ou de guidage, l'existence de points ou de zones où se concentre l'énergie et, en contrepartie, de zones sourdes !

Tous ces paramètres sont connus et des solutions existent dès la conception même de l'ouvrage. Elles sont maîtrisées par les architectes sérieux qui n'ont souvent qu'une seule difficulté pratique : celle de l'impact budgétaire d'un traitement acoustique complexe rendu nécessaire par des options architecturales audacieuses⁶ !

- Approche de W. Sabine : ce physicien américain, travaillant vers 1895 sur les déplorables qualités acoustiques d'un nouvel amphithéâtre construit à l'Université de Harvard, a le premier posé les bases de mesures quantitatives permettant d'apprécier et de comparer les propriétés acoustiques de divers locaux. Il a en particulier suggéré, pour qualifier simplement un local, de mesurer le temps de réverbération T_R , temps nécessaire au niveau d'intensité dans cette pièce pour diminuer⁷ de 60dB.

⁶ Voir à ce sujet les solutions très originales retenues pour l'Opéra de Shangaï en construction, que seules l'abondance et le coût faible du travail manuel en Chine ont rendu possible.

⁷ Pour une première approche, cette mesure peut se faire simplement en claquant dans les mains et en « estimant » le temps de retour au silence.

Il a montré que ce temps était lié au temps caractéristique τ précédent et que, en unités SI, il s'exprimait dans l'air et à température ambiante sous la forme $T_R = 0,161 V/a$ où l'on retrouve le pouvoir d'absorption des parois $a = \sum \alpha_i S_i$ et où α_i est le coefficient d'absorption du matériau « i » et S_i l'aire occupée par ce matériau [a est mesuré en « m² Sabine »].

Connaissant les caractéristiques acoustiques des matériaux et les surfaces qu'ils occupent, il est dès lors devenu possible de prévoir quelle sera la valeur de T_R pour une salle de volume donné.

Exemple : salle de classe de 7m de longueur, 5m de largeur et 3m de hauteur soit un volume $V = 105 \text{ m}^3$
et une surface de parois $S = 142 \text{ m}^2$

avec des parois non traitées :	$\alpha = 0,1$ (murs en plâtre nu)	$a = 14,2 \text{ SI}$	$T_R = 1,19\text{s}$
avec un plafond traité :	$\alpha_i = 0,3$ (35 m ²)	donc $a = 21,2 \text{ SI}$	$T_R = 0,80\text{s}$

5.3 - Impact du bruit sur l'homme

Pour l'être humain, l'exposition au bruit entraîne, selon son intensité, sa durée et sa nature (bruit de fond ou bruit impulsif) des conséquences dont la gravité et la rémanence vont en croissant depuis la fatigue (que l'on ressent surtout quand cesse le bruit : « ça fait du bien quand ça s'arrête !! ») au stress (dû à un claquement de porte, pétard, hurlement, ...) jusqu'aux troubles psychiques et parfois jusqu'à la violence.

Si le tapage nocturne est depuis longtemps identifié comme un délit, l'accroissement du niveau de bruit global généré par la civilisation industrielle et l'urbanisation a placé beaucoup de personnes dans un environnement quotidien de tapage diurne incontestable !

- **Bruit subi et « payé »** : à défaut de pouvoir valablement faire baisser le niveau de bruit produit par l'activité industrielle ou par l'activité urbaine, le législateur a cherché au moins à protéger le personnel exposé au bruit. Au poste de travail il existe en effet des normes, qui s'imposent aux industriels et qui limitent par exemple à 85 dBA le bruit auquel un personnel peut être exposé pendant toute une journée de travail. Dans de nombreux cas cependant, ce niveau est dépassé et devrait entraîner une diminution de la durée d'exposition pour éviter une dégradation de l'audition. Si ce dépassement au poste de travail est permanent pendant une journée entière, il faut alors avoir recours à des protections individuelles ... et il incombe au responsable de veiller à ce que ces protections soient effectivement portées par les personnels qui sont facilement négligents ! Si ce dépassement est occasionnel, la situation est souvent pire car le personnel retire la protection quand le bruit cesse et se fait alors surprendre par un bruit impulsif ou néglige simplement de remettre la protection, toujours jugée gênante, avant que le bruit n'augmente à nouveau. La perte d'audition est rapidement importante pour les personnels exposés au bruit (chaudronnier, imprimeur, mécanicien, menuisier, mineur, personnel de piste d'aéroport, pilote de F1 ...) et peu ou pas protégés.
- **Bruit voulu et payant** : il en va différemment pour le bruit qui est choisi, voire souhaité par un individu car, s'il existe des conseils de prudence ou de bon sens, il n'existe pas vraiment de législation interdisant de s'exposer personnellement à un niveau de bruit déraisonnable provoquant une incontestable dégradation de l'appareil auditif ! Bien que la source de bruit entraîne alors une dépense personnelle, rien ne limite par exemple le niveau sonore à l'intérieur d'une « auto sono » capable de faire vibrer les portières de la voiture voisine, rien ne permet de limiter la durée d'utilisation d'un baladeur (le niveau d'émission est maintenant bridé à 85 dBA), rien n'interdit de s'approcher des monstrueuses installations sonores de certains concerts open, capables de provoquer à 20m ou plus la mise en vibration de la cage thoracique.
- **Civilisation sonore** : en raison d'une évolution physiologique normale, rares sont les personnes de plus de 60 ans qui détectent des fréquences supérieures à 8 kHz mais il est évident que cette évolution est fortement accélérée en cas d'exposition précoce et régulière au bruit ! Plus rares encore sont en effet les habitués des discothèques branchées, les DJ ou les accros du baladeur qui ne présentent pas, même jeunes, de déficit auditif majeur ... et qui le nient vigoureusement !

Bien d'autres questions se posent en matière d'exposition au bruit !

Seules les nuisances sonores externes des discothèques sont soumises à contrôle mais qu'advient-il aux cellules ciliées des oreilles présentes quand le niveau d'intensité à l'intérieur atteint 129 dB comme le notait Le Monde en 2003 au sujet d'un établissement de la banlieue parisienne ?

Les « DJ », qui sont tous largement sourds, pourront-ils revendiquer de bénéficier de la prise en charge de leur surdité comme risque professionnel ?

Les accros du « mobile scotché » à l'oreille ne prennent-ils pas un risque non mesuré ?

Pourquoi n'interdit-on pas aux opérateurs de TV de monter le niveau sonore au moment des pubs ?...

Dans les « pays développés », le mode de vie actuel se caractérise par une présence accrue de l'audiovisuel, par un usage permanent des équipements de télécoms, par une utilisation de plusieurs heures chaque jour de moyens de transport dans lesquels le niveau sonore descend rarement en dessous de 75 dB.

A cela s'ajoute l'absence d'une prise de conscience des dangers encourus et le refus ou l'absence de limites à l'exposition au bruit.

Comme, dans ces pays, l'âge moyen de la population est élevé et s'accroît encore, je dirai pour me résumer, que ce mode de vie contribue à fabriquer des générations de personnes en (grande) partie sourdes et que l'avenir professionnel des chirurgiens du système auditif et des audio-prothésistes me paraît assuré pour plusieurs décennies !

- Comparaison entre déficit auditif et déficit visuel : je relate ici un fait social que beaucoup d'instituteurs connaissaient d'expérience.

Quand ils informaient des parents de difficultés visuelles constatées par eux en classe pour un jeune enfant, ils étaient remerciés et l'enfant était appareillé très rapidement.

Quand ils faisaient de même à propos d'un déficit auditif, ils étaient toujours contestés, parfois même avec agressivité ... et l'enfant devait continuer à vivre avec son handicap et commençait à développer une stratégie de dénégation !

Un défaut de vision est considéré dans toutes les familles comme un accident courant de la vie, que l'on reconnaît volontiers et que l'on cherche à corriger. Les lunettes sont même depuis longtemps considérées comme un élément de coquetterie !

Un défaut d'audition est considéré comme une maladie un peu honteuse, voire comme une tare, qu'il est de bon ton (!) de nier (personne n'est sourd quel que soit l'âge, ce sont les autres qui ne parlent pas assez fort !!).

Les appareils correcteurs, même très discrets, sont refusés ou cachés soigneusement derrière les cheveux ... quand c'est possible et, avec l'âge cela devient difficile ...!

Ils attirent toujours le regard curieusement ambigu de votre interlocuteur.

5.4 - Synthèse de la parole – Reconnaissance vocale

Un domaine d'applications qui a pris une importance économique croissante dans les dix à vingt dernières années est celui du traitement automatique de la parole au moyen d'outils logiciels et électroniques.

- Quelles informations ? Quels objectifs ? : la nature des informations concernées est très variable puisqu'il peut tout aussi bien s'agir d'informations à caractère scientifique, technologique, économique, que sécuritaire ou même socio-linguistique.

Les objectifs visés sont également très divers et peuvent aller de travaux de recherche en laboratoire aux serveurs vocaux ou même à la traduction automatique de textes ou de discours en passant par l'apprentissage personnalisé des langues, le « pilotage » d'appareils (machines, ordinateurs, équipements techniques, aéronefs, ...) à la voix, la transposition en fréquence de la voix des plongeurs profonds professionnels déformée par le gaz trimixte ou le contrôle d'accès par identification de la voix.

- Difficultés – Limites : les connaissances requises pour étudier et résoudre les problèmes posés sont nécessairement très vastes et impliquent des équipes pluridisciplinaires.

Des connaissances en phonétique, en linguistique, en sémantique sont en effet indispensables à côté d'autres en mathématiques appliquées (statistiques, CMC ou chaînes de Markov cachées ...), en électronique, en informatique, en réseaux de télécoms et ... en acoustique !

Si beaucoup de principes sont connus au niveau théorique et parfois validés au stade du prototype de laboratoire depuis longtemps, les applications pratiques commerciales n'ont pu voir le jour que depuis la formidable augmentation de puissance et de rapidité des ordinateurs dans les quelques dernières années ... avec l'usage maintenant habituel du multiple « giga » (GHz et Go !).

Deux aspects se superposent en permanence dans l'usage que nous faisons de la parole qui est notre moyen de communication le plus performant et le plus courant : l'aspect perceptif et l'aspect cognitif.

Pour pouvoir exploiter la parole, il faut en effet en premier lieu l'entendre et ensuite la comprendre. Si les aspects perceptifs ne posent plus de problèmes trop complexes aux microphones, ordinateurs et logiciels de dernière génération, il n'en est pas du tout de même avec les aspects cognitifs !

Les difficultés augmentent bien sûr avec la taille du vocabulaire (depuis le minimum de 500 mots indispensables pour exprimer les requêtes de base de la vie courante, aux 5000 mots présents dans l'oeuvre de Victor Hugo et jusqu'aux plus de 50000 références du Littré !) et avec le nombre des locuteurs qui ont inévitablement des accents différents et des tonalités de voix variant selon l'individu et le sexe.

C'est surtout quand on passe de la reconnaissance de mots isolés (bien résolue) à celle de la parole continue que les problèmes ardues apparaissent.

La prosodie qui nous permet par exemple de différencier la forme affirmative de la forme interrogative de la même phrase, les « liaisons-en fin de mot » et la synthèse en fréquence des consonnes génèrent encore des difficultés considérables pour le traitement automatique du discours.

Comment par exemple développer un logiciel permettant à une machine d'enregistrer un message audio et de comprendre, parmi les cinq acceptions phonétiquement proches ci dessous⁸, quelle est celle qui, grammaticalement et contextuellement, a le coefficient de pertinence le plus grand et d'en donner automatiquement une version écrite correcte ?

Elle ta dort
Aile ta dort
Aile t'adore
Elle t'adore
Et le tas d'or

5.5 - Enregistrement, Reproduction des sons

C'est sans doute celui des domaines d'applications qui est le mieux connu d'un large public. Je me contenterai donc d'en rappeler brièvement quelques caractéristiques essentielles.

- **Sensibilité, directivité des microphones** : si la sensibilité des microphones n'est pas supérieure à celle de l'oreille humaine dans le milieu du domaine audible, en revanche la courbe de sensibilité peut, pour certains modèles, rester quasiment plate depuis 0,1Hz jusqu'à parfois 100 kHz, performance très supérieure à celle de l'oreille la plus exercée !

Selon sa technologie, un microphone va présenter une réponse très variable selon son orientation par rapport à la source.

Dans le plan contenant source et détecteur, cette courbe de directivité est quasi circulaire pour un appareil omnidirectionnel, en forme de cardioïde pour un autre et en forme de lobe unique, allongé et très resserré pour un appareil unidirectionnel comme un micro-canon.

- **Performances, fidélité des hauts-parleurs** : chargé de la reproduction du message audio, le haut-parleur est un appareil à qui l'on demande souvent l'impossible !

On souhaite en effet disposer d'un appareil unique qui aura une clarté parfaite, une fidélité exemplaire lui permettant de reproduire sans déformation ou distorsion tous les passages musicaux depuis le pianissimo jusqu'au forte ou au delà, une directivité parfaitement sphérique dans le demi-espace avant et nulle vers l'arrière, une réponse en fréquences lui permettant de couvrir largement le spectre audible ... pour un prix aussi bas que possible et avec une esthétique et un volume qui satisfont les usages les plus exigeants !

Un équipement unique est incapable de satisfaire ces exigences et il faut en général associer, dans une enceinte acoustique adaptée, deux ou trois hauts-parleurs spécialisés pour s'en approcher le moins mal possible.

- **Performances des chaînes audio** : ces équipements, envahissants en volume et en nombre d'appareils de technologie analogique il y a encore vingt ans, se sont miniaturisés de façon spectaculaire grâce à l'intégration électronique poussée tout en baissant de prix et en gagnant en performances et en qualité grâce aux technologies numériques et optiques.

Concentrés de technologie opto-mécano-électro-acoustique, ces appareils se sont logiquement démocratisés et ont contribué, par leur diffusion, à faire émerger des solutions de qualité et de coût surprenants pour des problèmes acoustiques a priori complexes.

- **Evolutions technologiques** : si les qualités et défauts donc les performances des instruments de musique traditionnels n'ont pas beaucoup évolué depuis des siècles parfois, des avancées majeures ont été faites en vingt ans dans le domaine de l'enregistrement et du stockage de l'information sonore, donc de la conservation et de la reproduction des contenus sonores.

Le rôle croissant de l'outil ordinateur ainsi que les progrès considérables et rapides des solutions logicielles de codage et de compression/décompression des fichiers audio (MPEG, MP3, codes correcteurs ...) couplées au développement des technologies magnétiques ou optiques de stockage (CD Audio, CD ROM, DVD, clé USB ...) induisent une numérisation croissante du traitement de l'information sonore dès son émission.

Des solutions propriétaires concurrentes s'affrontent encore et l'interopérabilité des équipements n'est pas parfaite mais il est probable que ces difficultés devraient rapidement se résorber.

5.6 - L'Acoustique dépasse les murs du son audible

Un simple décalage vers les basses fréquences et nous entrerions dans le domaine des ...

⁸ Exemple cité dans L'Usine Nouvelle n°2702 – Sept. 99 d'après Dragon Systems

- Infrasons ... domaine auquel s'intéressent surtout les constructeurs automobiles car ils souhaitent filtrer au mieux, dans la suspension des véhicules, les fréquences voisines de 7 Hz qui perturbent le fonctionnement des canaux semi-circulaires de l'oreille interne donc le sens de l'équilibre, provoquant malaises ou nausées. Dans la mesure où de tels malaises peuvent être provoqués et même, à un niveau de puissance émise suffisant, avoir un effet létal, on ne s'étonnera pas que les propriétés des infrasons ait pu retenir aussi l'attention des militaires.

L'organisme humain n'est pas capable de détecter les infrasons mais il est fort probable que certains animaux le peuvent. A l'occasion des événements dramatiques d'Asie du Sud, on a constaté, par exemple en Thaïlande, que beaucoup d'animaux s'étaient éloignés des côtes et, en particulier, que des éléphants domestiqués avaient brisé leurs chaînes avant l'arrivée du tsunami.

Ceci expliquerait le nombre étonnamment faible de grands animaux tués lors de cette catastrophe majeure.

ou, avec un décalage vers les hautes fréquences, dans celui des ...

- Ultrasons ... domaine foisonnant en applications multiples dans des domaines aussi différents que la circulation sanguine, l'imagerie fœtale, le mesurage des distances, la sonochimie, les actionneurs des pales d'hélicoptères, le détecteur d'intrusion ou le réglage du VLT⁹ !

On pourrait bien sûr évoquer aussi le système d'écholocation des chauves-souris ou des dauphins mais pour aborder tous ces sujets il faudrait encore de nombreuses pages de commentaires et ce ne serait pas raisonnable !

6. Conclusion

L'objectif des organisateurs ... si toutefois je l'ai bien perçu ... était de vous présenter des sujets à la fois « sérieusement scientifiques » et « raisonnablement artistiques ».

Sur un sujet aussi vaste que celui que j'avais proposé de traiter, je suis conscient d'avoir sans doute été très évasif sur beaucoup de points et je vous prie de m'en excuser.

J'espère néanmoins avoir retenu votre attention sur un domaine de la physique qui est beaucoup moins fréquemment enseigné que d'autres ... qui figurent systématiquement dans tout programme de formation, de préférence officiel et qui se veut « sérieux » !

J'ai, de ce fait, une interprétation toute simple qui s'appuie sur 45 ans de retour d'expérience personnel et professionnel : c'est une variante du syndrome de l'œuf et de la poule !

Comme nous n'enseignons pas l'Acoustique, nos étudiants ne la connaissent pas.

Ceux d'entre eux qui, à leur tour, deviennent enseignants n'ont alors aucun « cours d'un ancien prof » pour les aider à « dégrossir le sujet » et bâtir leur propre enseignement.

De manière quasiment unanime, ils préfèrent alors se tourner vers des matières qui leur sont connues plutôt que de se risquer à « défricher des terres inconnues » ... même si le lien de l'Acoustique avec la vie quotidienne, personnelle ou professionnelle, de beaucoup de nos élèves ou étudiants n'est certainement pas moins important ou moins direct que celui de l'Optique des milieux anisotropes (images superbes !), de la Mécanique Quantique (indissociable pour moi des Aventures du Mr Tomkins de G. Gamov) ou du double rotationnel des équations de Maxwell !

Il ne suffit donc pas que le son soit un domaine familier pour beaucoup de gens pour éviter que ce soit un phénomène largement inconnu en formation et pour que le son cesse donc, par enchantement, d'être ... un inconnu célèbre !

⁹ Very Large Telescope implanté dans la chaîne des Andes.