

PRISE EN COMPTE DES COMPOSANTES SONORES DANS L'ANALYSE DES TEMOIGNAGES DE PAN

Gaelle FEDOCE

Docteur en Mécanique, Responsable Produits Existants dans l'industrie, Antibes.

Impossible de parler de l'aspect sonore d'un phénomène, et encore moins de la façon dont cet aspect peut être pris en compte par l'humain, sans aborder également ce qui fait le son et sa perception, à savoir un minimum d'acoustique et de psychoacoustique. Cela est d'autant plus vrai que, dans la majorité des cas, l'analyse qualitative de ces différents aspects est suffisante à l'analyse de cas paraissant initialement étranges.

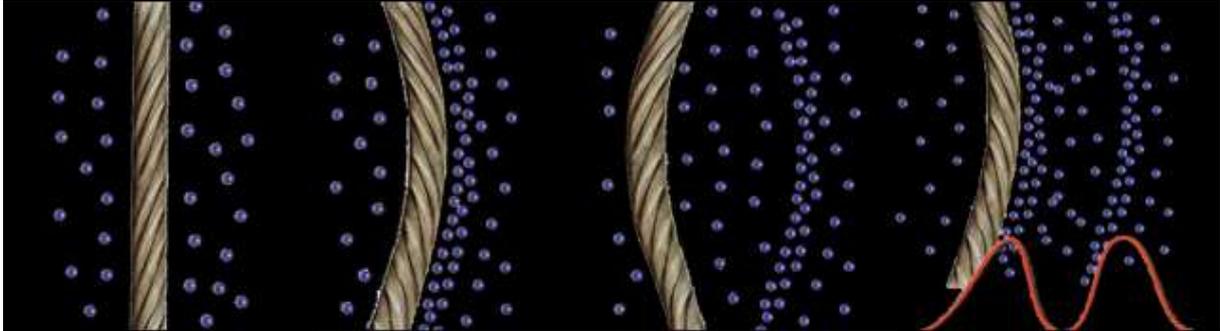
1.	Un peu d'acoustique.....	2
1.1.	Vibration et onde.....	2
1.2.	Quelques définitions.....	3
1.3.	Transmission et réflexion d'une onde sonore.....	6
1.4.	Diffraction.....	6
1.5.	Ondes stationnaires.....	6
1.6.	L'effet Doppler.....	7
1.7.	Interférences.....	7
1.8.	Les zones d'ombre.....	7
1.9.	Les guides d'onde.....	8
2.	Un peu de psychoacoustique.....	9
2.1.	L'oreille humaine.....	9
2.2.	Acuité auditive.....	9
2.3.	Niveau sonores particuliers :.....	11
2.4.	Cas particuliers, effet de l'âge... ..	11
2.5.	Effet de masque.....	12
2.6.	Les illusions sonores.....	13
2.7.	Localisation de l'origine du son.....	13
3.	L'apport possible des mathématiques et de l'informatique.....	15
3.1.	Imagerie acoustique, géolocalisation.....	15
3.2.	Reconstitutions en réalité virtuelle.....	16
4.	Cas « étranges » classiques, analyse des témoignages de PAN.....	17
4.1.	Bruit ambiant occulté.....	17
4.2.	Avions et autres objets se déplaçant rapidement à distance.....	18
4.3.	Le cas du mur du son.....	19
4.4.	L'effet du vent.....	20
4.5.	Quelques environnements particuliers.....	20
4.6.	Les éléments importants des témoignages... ..	21
5.	Références.....	22
5.1.	Crédits.....	22
5.2.	Cours ou articles disponibles sur le net.....	22
5.3.	Laboratoires de recherche et autres centres de ressources français.....	22
5.4.	Pour le plaisir.....	22

1. Un peu d'acoustique

1.1. Vibration et onde

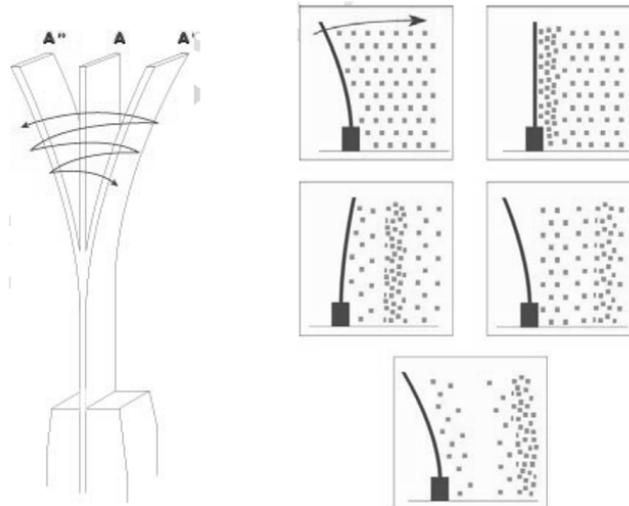
Son = onde de pression = propagation d'une vibration, c'est-à-dire d'un mouvement ou d'une pression

Vibration d'une corde :



Source : <http://acoustique.archi.free.fr/dossier.html>

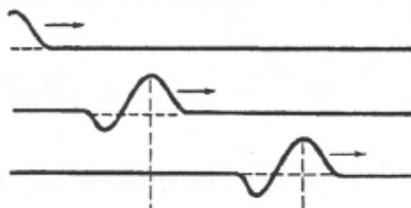
Vibration d'une lame :



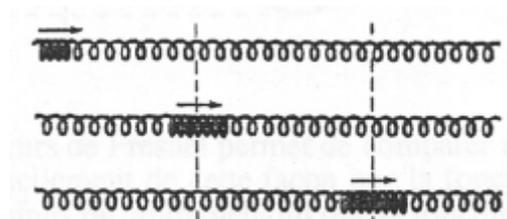
⇒ Le son ne se propage qu'en présence de matière !

L'onde acoustique est :

- Transversale dans les solides (mouvement des particules perpendiculaire au sens de propagation)
- Longitudinale dans les gaz et les liquides (mouvement des particules parallèle au sens de propagation)

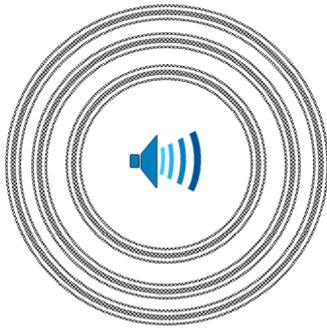


Onde transversale



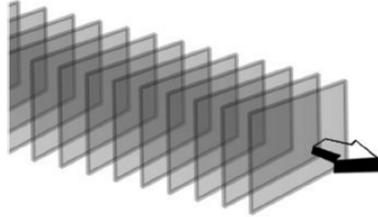
Onde longitudinale

On parle de propagation en champ libre lorsqu'aucun obstacle ne gêne la propagation. Dans ces conditions, le front d'onde (ensemble des points atteints par l'onde en même temps) est sphérique. Ce n'est vrai qu'à proximité des sources sonores et en altitude.



Inversement, on parle de champs diffus lorsqu'il y a superposition d'une onde directe et d'ondes renvoyées (réfléchies) par des parois.

Dans les calculs, les ondes sont généralement considérées planes (plans infinis parallèles entre eux et perpendiculaires à la direction de propagation) ou sphériques et constituées de la somme d'ondes pures.



1.2. Quelques définitions

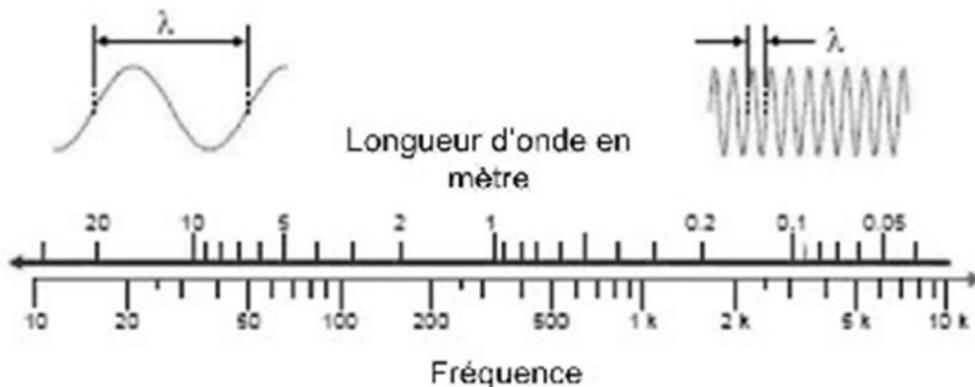
La **célérité** est la vitesse du son, c'est-à-dire la vitesse de déplacement du front d'onde. Elle dépend de la densité et de l'élasticité (module de Young des solides) ou de la compressibilité adiabatique (liquides et gaz).

Le son se déplace plus vite dans les solides que dans les liquides, et encore moins vite dans les gaz.

Dans l'air, la vitesse du son (voisine de 340 m/s) dépend du taux d'humidité, de la pression atmosphérique, de la température, ... Penser au cas particulier du brouillard en présence duquel tous les sons sont amortis !

La fréquence f est le nombre d'oscillations par seconde, en Hz (Hertz). La période T est l'inverse de la fréquence. La longueur d'onde λ est la distance parcourue par l'onde pendant une période.

Matériaux	Célérité du son (en m/s)
Air	343
Eau	1 480
Glace	3 200
Verre	5 300
Acier	5 200
Plomb	1 200
Titane	4 950
PVC (Mou)	80
PVC (Dur)	1 700
Béton	3 100
Hêtre	3 300
Granit	6 200
Péridotite	7 700
Sable sec	10 à 300



Remarques :

- En toute rigueur, il faut noter que la célérité augmente généralement avec la fréquence, mais l'évolution est lente et généralement négligée.
- La majorité des matériaux « réels » sont amortissants (ou absorbants). L'**amortissement** (ou atténuation) ne modifie pas la fréquence, mais diminue l'amplitude (la puissance). Il est approximativement proportionnel à la fréquence et provoque une décroissance exponentielle de la puissance avec la distance. Les fréquences élevées (sons aigus) sont donc très amortis et, plus la distance parcourue est élevée, plus le son résultant paraît grave. Dans l'air, l'amortissement diminue si l'humidité augmente. Pour exemple, à 4000Hz dans un air à 20°C et par une humidité HR 30%, l'atténuation est de 50dB par km. Dans les solides et les gaz, plus le matériau est « visqueux » ou « caoutchouteux », plus l'effet est important.

Un son pur est composé d'une fréquence unique, sinusoïdale.

Un son composé est périodique mais non sinusoïdal, et peut se décomposer (spectre) en une superposition de sons purs.

Un son harmonique est un son composé dont les composantes (harmoniques) ont des fréquences proportionnelles à une fréquence fondamentale.

Le bruit est un son composé de fréquences sans rapport entre elles et distribuées de façon continue dans une bande de fréquences.

- Le bruit de fond est un bruit de spectre constant où toutes les fréquences d'une certaine « bande » sont présentes.
- Un « bruit blanc » est un bruit de fond où toutes les fréquences ont même amplitude. Il est utilisé pour « caractériser » certains environnements sonores (acoustique des salles).
- Un « bruit rose » est un bruit où l'amplitude est identique sur chaque octave. Il est utilisé en particulier pour régler du matériel de sonorisation. Il est plus riche en fréquences basses qu'en sons aigus. Assez « proche » du bruit d'une foule applaudissant en criant, par exemple dans un stade.
- Etc... Il est « courant » d'attribuer une « couleur » aux bruits ayant des décompositions spectrales particulières. Bruit brun, rouge, bleu, ...

L'amplitude d'un son se mesure généralement en dB (décibels), unité de mesure logarithmique.

Il s'ensuit, par exemple :

- une différence de 60 dB, signifie que le rapport d'intensité (ou de puissance) entre deux volumes sonores est de 1000
- une différence de 40 dB est dans le rapport de 100
- une différence de 20 dB est dans le rapport de 10
- une différence de 6dB est dans le rapport de 4
- une différence de 3dB est dans le rapport 2

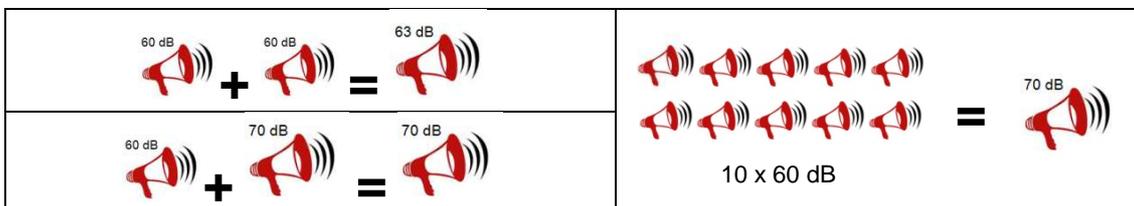
Dans le cas d'une onde sphérique, en doublant la distance entre la source sonore et le point d'écoute, on augmente par 4 la surface de la sphère de front d'onde représentative de l'énergie totale → la perte est de 6dB.

Dans le cas d'une onde plane en conditions de propagation idéales (pas d'amortissement), l'énergie est conservée → perte théorique nulle.

En pratique, la perte est fortement liée à l'environnement et aux conditions de propagation : de 1 à 10 dB (voire plus) à chaque fois que la distance est doublée.

Il existe une échelle de mesure pondérée par la sensibilité de l'oreille humaine à chaque fréquence. Ce sont les dBA.

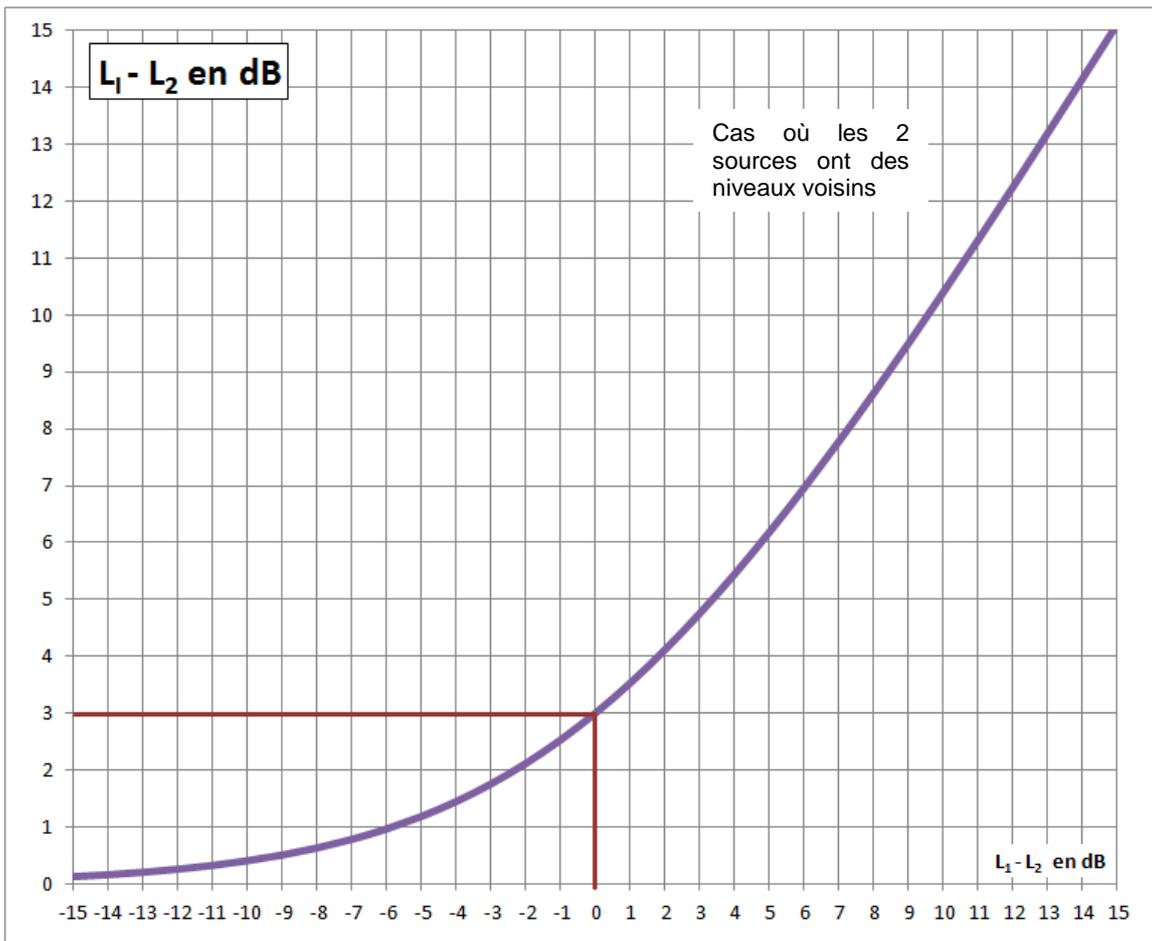
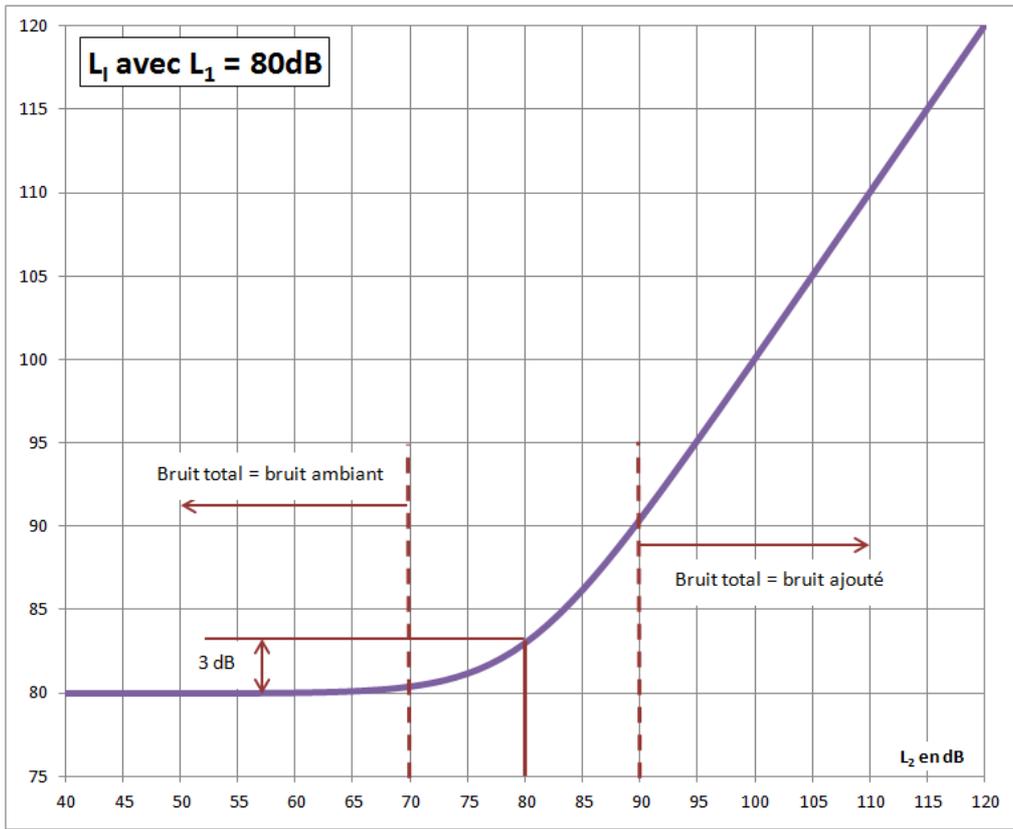
Attention : des niveaux sonores ne s'additionnent pas en dB !



Si L_1 et L_2 sont les niveaux sonores respectifs, en dB, de deux sources indépendantes, le niveau sonore résultant L_I est : $L_I = 10 \cdot \log(10^{L_1/10} + 10^{L_2/10})$

Les courbes suivantes indiquent le niveau sonore résultant suivant les niveaux des sources. On constate que :

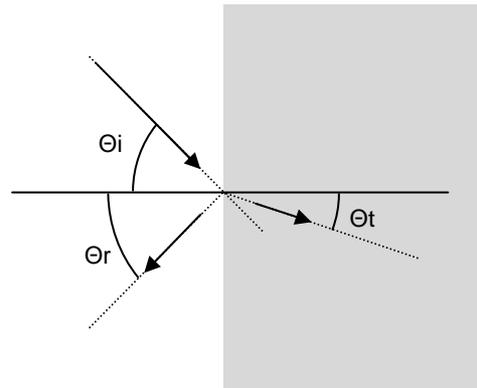
- Dans la plupart des cas, si le niveau de l'une des sources est supérieur de 10 dB à l'autre niveau sonore, le niveau le plus faible est négligeable !
- Lorsque les deux sources produisent le même niveau d'intensité en un point donné, le niveau résultant est augmenté de 3dB par rapport au niveau d'une seule source.



1.3. Transmission et réflexion d'une onde sonore

Tout comme la lumière, le son est réfléchi ou transmis (réfracté) par les parois, avec des caractéristiques géométriques de transmission assez voisines de celles connues en optique. On note que :

- L'énergie incidente est égale à la somme des énergies transmises et réfléchies,
- Les valeurs des angles à la normale au plan de l'onde incidente et de l'onde réfléchie sont identiques.
- La proportion entre l'énergie transmise et l'énergie réfléchie dépend de la fréquence et des caractéristiques relatives des milieux / matériaux. Plus la différence est brutale, moins il y a d'énergie transmise.



Si la réflexion est quasi-totale et que l'onde « revient » à son point de départ, c'est le phénomène de l'écho qui provoque par exemple une augmentation sonore de 3dB à 2m d'un mur plein.

Cas particulier : si l'angle incident est très élevé, il n'y a pas d'onde réfléchie, toute l'énergie est transmise en une onde de surface (se propageant parallèlement à l'interface et n'allant pas en « profondeur »).

Cas des parois minces

Quelles que soient leurs caractéristiques, les parois minces ont peu d'influence sur la propagation des ondes sonores tant que leur épaisseur reste trop faible devant la longueur d'onde. Or, pour mémoire, la longueur d'onde d'un son de 20Hz est de 17m, alors que celle d'un son de 4000Hz est de 8,5cm et celles d'un son de 16kHz de 2cm. Par suite, il est extrêmement difficile d'éviter la propagation des sons graves alors que les sons aigus sont d'autant plus faciles à stopper que la plupart des matériaux les amortissent (les absorbent).

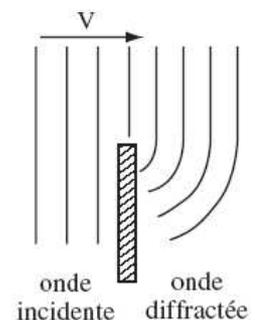
Cas des vitres

Un vitrage simple représente une atténuation sonore de l'ordre de 15 à 25 dB selon, par exemple, la qualité de la vitre et de la menuiserie, alors qu'un vitrage à isolation phonique renforcée (double voire triple vitrage avec gaz spécial) peut représenter une atténuation jusqu'à 37dB.

Dans une voiture, fermer les vitres aura un impact dépendant également de la qualité des joints. C'est en effet moins la vitre elle-même qui crée l'atténuation que l'effet « caisson » de l'habitacle. Vitres fermées, il constitue en effet une sorte de « poche » d'air dans laquelle l'onde a du mal à pénétrer. Cela se remarque particulièrement par la différence entre vitre légèrement entrouverte et vitre totalement fermée. Suivant les véhicules, l'atténuation peut également aller de 15 à plus de 30dB.

1.4. Diffraction

Lorsqu'une onde sonore rencontre un objet présentant des arêtes, ces arêtes deviennent le centre d'ondes sphériques se propageant dans de nouvelles directions.



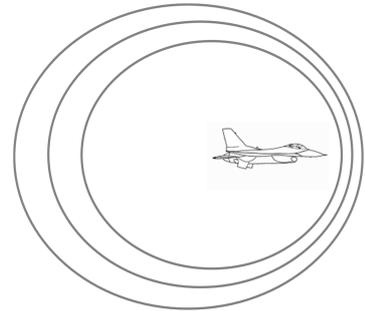
1.5. Ondes stationnaires

En présence d'une ou plusieurs sources sonores permanentes de même fréquence, des conditions particulières de fréquence et de propagation des ondes peuvent produire un phénomène dans lequel certains éléments sont fixes dans le temps. Il n'y a plus, en apparence, de propagation d'une onde, mais vibration stationnaire.

1.6. L'effet Doppler

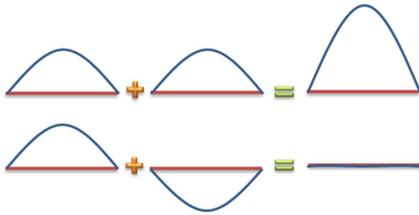
Explication classique : Imaginons une personne immobile sur une plage, les pieds dans l'eau. Une vague lui touche les chevilles par exemple toutes les 3 secondes. Si la personne se déplace en courant vers le large, elle va à la rencontre des vagues et se fait alors mouiller les chevilles plus souvent. Inversement, si elle revient vers le sable, les vagues l'atteindront moins souvent.

Le phénomène est le même : les fronts d'ondes émis précédemment s'éloignent à vitesse identique dans toutes les directions. Mais dans le même temps, la source sonore se déplace et les nouvelles ondes émises sont plus proches des précédentes vers l'avant que vers l'arrière. La longueur d'onde est donc plus courte (fréquence élevée, son aigu) vers l'avant que vers l'arrière (fréquence basse, son grave). Autrement dit, si la source sonore se rapproche, la longueur d'onde résultante diminue et le son devient plus aigu. Si la source sonore s'éloigne, elle augmente et le son devient plus grave.



1.7. Interférences

Particulièrement connues dans le cas des vagues.



Les mouvements imposés aux particules par l'onde qui les atteint s'additionnent. Cela entraîne une augmentation du mouvement global de la particule ou, inversement, une diminution de ce mouvement.

Utilisé volontairement dans le domaine de l'antibruit :

- Antibruit actif : Mesure du bruit ambiant dans une zone et émission d'un « contre-bruit ». Exemple de casques, de cabines d'avions, ... Voir par exemple les travaux de l'entreprise Technofirst.
- Antibruit passif : Géométrie permettant la création d'un « écho » créant des interférences. Exemple de casques, de canalisations, de fossés antibruit, ...

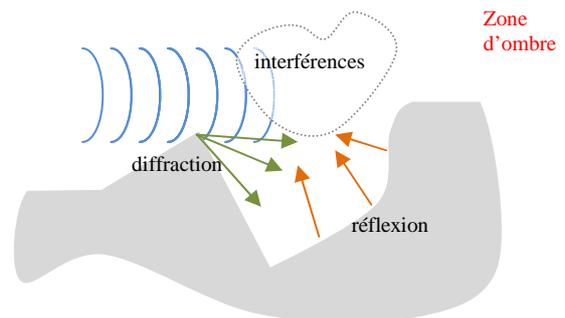
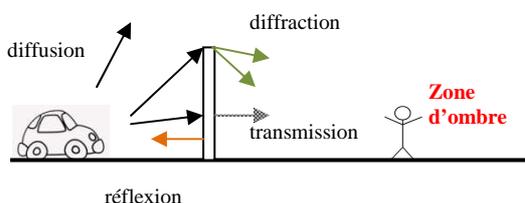


<http://www.technofirst.com/>

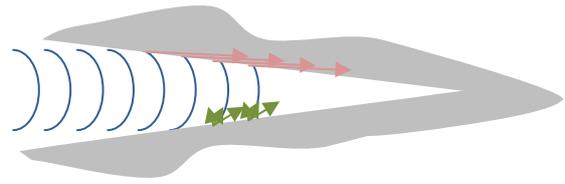
Remarque : il y a « battement » (sensation d'un bruit unique mais de niveau sonore variant régulièrement) en cas d'interférence entre 2 sons se déplaçant dans la même direction et d'amplitudes voisines mais de fréquences légèrement différentes. C'est le cas, par exemple, lors de l'approche d'un hélicoptère.

1.8. Les zones d'ombre

Ce sont des zones où le son ne parvient que difficilement. Elles peuvent être dues à des écrans, talus, parois, ... Dans certains cas, ce sont des « fossés » qui vont constituer des écrans (difficile à concevoir mais constaté parfois dans la nature).

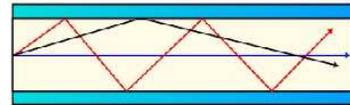


On constate également des effets de « trou noir » acoustique : au fur et à mesure de son « avancée » dans le « trou », le son est diffracté et « dispersé » (ce qui peut de plus créer des interférences à effet antibruit) ou transmis dans les parois sous forme d'ondes de surface. L'énergie parvenant à l'extrémité est quasiment nulle. Cela peut se produire par exemple entre des immeubles ou dans des vallées de montagne.



1.9. Les guides d'onde

Phénomène « inverse » de la zone d'ombre, le principe du guide d'ondes est le même que celui des fibres optiques pour la lumière. Le son est « ramené » au centre du guide. Ils sont classiques dans notre environnement : onde sonore « longeant » un ruisseau, un groupe d'immeubles, des « couches » atmosphériques, ... Une simple conversation peu parfois être entendue à plusieurs kms.



2. Un peu de psychoacoustique

L'audition est le seul sens capable de nous informer sur des événements survenant hors de notre champ de vision, et l'un des plus « précoces » : le fœtus entend dès le 6^{ème} mois alors qu'il ne voit qu'à partir du 7^{ème}. C'est également l'un des sens les plus variables d'une personne à l'autre, et il évolue peut être encore plus que la vision au cours d'une vie.

Pour qu'il contienne une information, il faut que le son varie lui-même au cours du temps et qu'il ne varie pas de façon aléatoire, mais selon des motifs que les auditeurs peuvent mémoriser et reconnaître. En outre, l'audition s'adapte en quelques instants aux sons qui parviennent à l'oreille, en une fraction de seconde par un réflexe et à partir de quelques secondes par des processus mentaux.

La psychoacoustique est une branche de psychologie expérimentale qui relie les sensations auditives de l'être humain aux sons qui parviennent à ses oreilles.

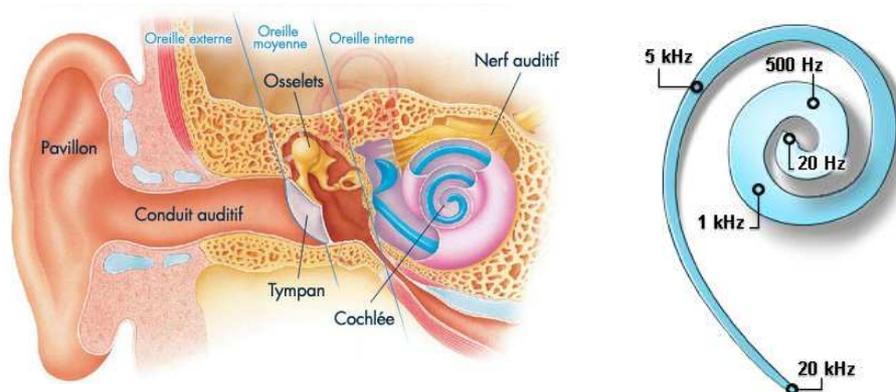


Du point de vue « physique », les unités de mesure sont donc le dB, les Hz, ...

Du point de vue des sensations, on parle de sonie (niveau sonore) en sones ou phones, de hauteur (différence graves-aigus) ou de tonie en mel, de chroma (position dans l'octave), ... Ces valeurs sont toutefois peu utilisées hormis par des spécialistes.

Le timbre est la caractérisation d'un son en termes d'harmoniques : durée, amplitude, ... Il permet de distinguer divers sons présentant la même intensité, la même hauteur, voire la même durée et pourtant perçus comme différents.

2.1. L'oreille humaine



<http://aviondufutur.e-monsite.com/>

<http://tpe-son-jvc.e-monsite.com/>

L'oreille externe collecte les sons et les canalise jusqu'au tympan qui fonctionne comme la peau d'un tambour et vibre en réaction aux ondes sonores. Ce n'est autre que notre antenne...

L'oreille moyenne est composée d'une chaîne de trois osselets, le marteau, l'enclume et l'étrier en relation avec la cochlée. Leur rôle est de « transporter » (d'amplifier) les vibrations du tympan vers l'oreille interne.

L'oreille interne est la partie la plus complexe (et la plus fragile) du système auditif. Les vibrations de l'étrier créent une onde qui se transmet par l'intermédiaire d'un fluide vers les cellules ciliées qui émettent alors un signal électrochimique au nerf auditif, signal qui sera perçu par le cerveau comme un son. C'est le système de décodage... Elle réagit à chaque fréquence en des lieux différents.

2.2. Acuité auditive

L'acuité auditive humaine est la bande passante des fréquences perceptibles par l'oreille humaine ainsi que le seuil de leur perceptibilité.

Bande passante :

En théorie l'oreille humaine est censée percevoir des fréquences comprises entre 20 Hz et 16 à 20 kHz. Mais au-delà de 5 kHz, l'oreille n'est plus capable de faire la différence entre deux sons, quelle que soit leur fréquence. Par anthropomorphisme, on considère donc généralement que les ondes sonores s'étendent de 20Hz à 16kHz. Dans la plage audible, on peut de plus « partager » les plages de fréquences en sons graves ou aigus :

Plage de fréquence	Type d'onde
< 4Hz	Ondes sismiques
4 à 16 Hz	Infrasons
16 à 150 Hz	Extrême grave
150 à 250 Hz	Grave ou basse
250 à 1500 Hz	Médium
1500 à 3500 Hz	Aigu
3500 à 16 kHz	Extrême aigu
> 16 kHz	Ultrason

Remarque : Les infrasons sont inaudibles mais perçus par le corps humain, en particulier au niveau du squelette et de la cage thoracique. Omniprésents en particuliers dans les villes, ils sont typiquement produits par les moteurs (poids-lourds et autres compresseurs) et constituent la principale pollution sonore. A très faible intensité, ils procurent un sentiment de « solennité » et sont utilisés dans certaines musiques religieuses (orgues d'église, percussions sacrées africaines). A plus forte intensité, ils ont des effets secondaires tels que nausées, dépressions, ... A forte intensité, ils sont rapidement mortels (canons à infrasons).

Seuil de perceptibilité :

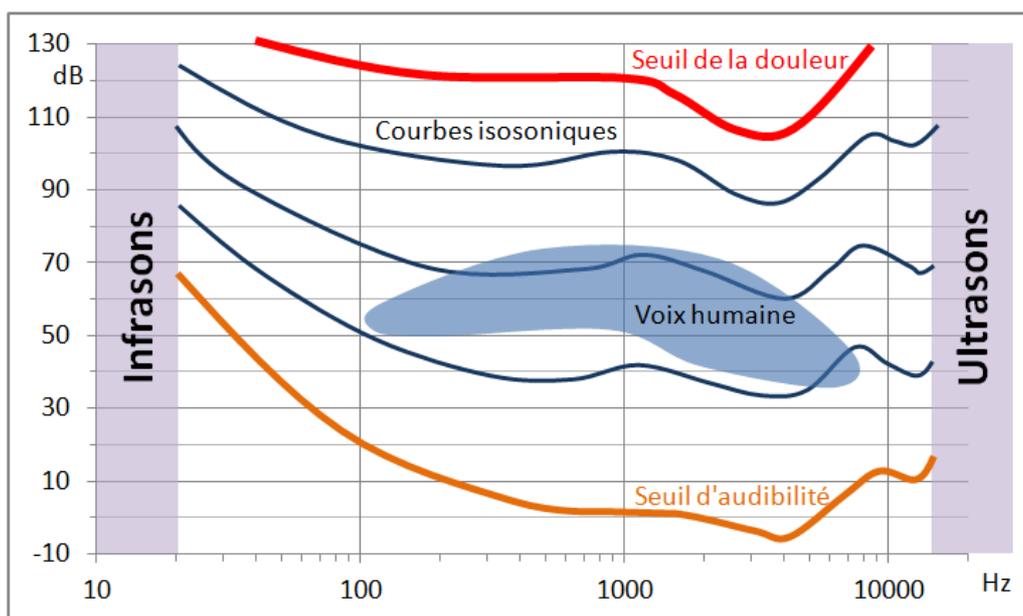
La sensibilité de notre organe auditif n'est pas linéaire, elle varie en fonction de la fréquence et du niveau sonore. L'oreille possède un maximum de sensibilité pour des fréquences comprises entre 2 et 5 kHz (pointe à 4 kHz). De ce fait, deux sons de fréquences différentes mais de même intensité peuvent provoquer une sensation de force sonore différente

Il existe un seuil « absolu » de perception (valeur en dessous de laquelle la perception est impossible) indiqué sur les courbes d'isotonie pour chaque fréquence et un seuil « relatif » (variation minimale pouvant être perçue, de l'ordre de 0,4 dB).

Le son perceptible le plus ténu est par convention défini à 0 dB à 1000Hz, ce qui implique un seuil de valeur négative de quelques dB à 4000Hz, ne dépassant que très légèrement le fond sonore créé spontanément par le mouvement des molécules composant l'air ambiant et perçu par certaines personnes souffrant d'hyperacousie.

Les sons forts, considérés comme potentiellement traumatisants au-delà de 120 dB, ont une puissance mille milliards de fois supérieure (un rapport d'intensité acoustique de 10^{12} à 1) au seuil d'audibilité.

Les courbes d'isotonie sont déterminées statistiquement en présence d'ondes planes (ou assimilées à des ondes planes) et de sons purs. Aux fréquences audibles, l'aire délimitée par le seuil d'audition (en orange) et le seuil d'inconfort (en rouge, c'est aussi le seuil des sons traumatiques pour l'oreille) définit le champ auditif, domaine de sensation auditive ou aire d'audition. Une ligne isotonique représente l'ensemble des sons purs produisant la même sensation d'intensité, la même sonie, en fonction de la fréquence.



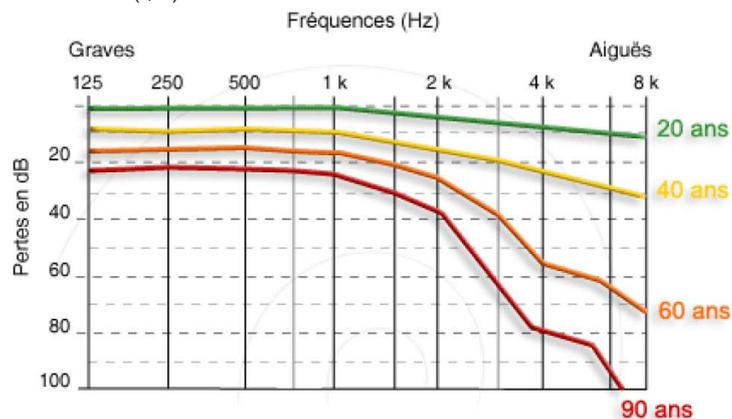
2.3. Niveau sonores particuliers :

dB	Exemple de source de bruit	Conversation	Effet auditif
180	Fusée Ariane au décollage	Impossible	Dégradation irréversible de l'oreille
160	Fusil d'assaut		
140	Réacteur d'avion supersonique à quelques mètres		
130			
125	Sirène de pompiers, Vuvuzela		
120	Décollage d'un avion à 20m	Douleur	
115	Formule 1		
110	Pointes musicales d'orchestres, Fusil	En criant	Difficilement supportable Bruits très pénibles Seuil de danger
105	MP3 à pleine puissance, Métro		
100	Marteau piqueur à 3m, Concert de rock, Klaxon		
95	Scie circulaire, Discothèque, Orchestre classique, Ateliers très bruyants		
90	TGV à 25m des voies, Aboiement proche, Moto à 1m, Restaurant scolaire		
85	Tronçonneuse	Difficile	Seuil de risque
80	Chorale, Débroussailleuse, Machines outils, Intérieur voiture à 100km/h, Nœud routier très fréquenté, Bord d'autoroute, Atelier		
75	Instrument de musique, sonnerie du téléphone		
70	Carrefour avec feux, rue à gros trafic, boulevard	En parlant fort	Pénible, nocif
65	Aspirateur		Bruyant
60	Intérieur de voiture, Voie de transit, Centre ville, Bureau de dactylo, Grand magasin		Seuil de fatigue
55	Radio, Télévision, Rue résidentielle	Voix normale	Bruits courants
50	Salle de classe, Appartement bruyant		
45	Lave-vaisselle, Secteur résidentiel		
40	Appartement calme	Voix basse	Calme
35	Silence à la campagne		
30	Voiliers, trombone tombant sur du carrelage		
25	Nuit en milieu rural		
20	Bruissement des feuilles par vent léger		
10	Désert, Forêt silencieuse, Studio d'enregistrement	Voix basse	Silencieux (très calme)
0	Salle anéchoïde (chambre sourde)		Silence paraissant anormal
-4	Fond sonore de l'air ambiant		Seuil d'audibilité à 1000Hz
			Seuil d'audibilité à 4000Hz

Noter qu'il est théoriquement possible de remarquer une variation du niveau sonore de 1dB mais que, en pratique et en particulier en présence de bruit ambiant, cette valeur est plus généralement de l'ordre de 3dB.

2.4. Cas particuliers, effet de l'âge...

Presbycusie : Perte progressive de l'audition, généralement bilatérale et symétrique liée à l'âge et variable d'une personne à l'autre (souvent plus prononcée chez les hommes par exemple) mais se remarquant dès 18 ans dans les fréquences élevées. Elle affecte la perception de la parole, en particulier pour les consonnes sifflantes (s, z, ch) et les fricatives (f, v).



<http://smartfiches.fr/oto-rhino-laryngologie/60-troubles-de-laudition>

Effet cocktail : il reflète notre capacité à sélectionner une source sonore dans un environnement bruyant tout en restant capable de traiter des signaux autres. C'est le cas typique de la réception bruyante pendant laquelle notre attention est fixée sur ce que dit notre interlocuteur en occultant le bruit ambiant tout en restant capable de détecter si notre nom est prononcé par une tierce personne dans la salle.

A noter toutefois que cet effet, qui privilégie en réalité les sons provenant d'une direction donnée et utilise les composantes aigues des sons perçus (voir la localisation sonore), est moins présent chez les personnes âgées.

Syndrome du banquet : phénomène inverse de l'effet cocktail, il révèle l'incapacité de certaines personnes à suivre un flux verbal dans une ambiance bruyante. Il serait dû à une lésion de l'oreille interne, à une hyperacousie, ou inversement à la presbyacousie.

Hyperacousie : dysfonctionnement de l'audition caractérisé par une hypersensibilité de l'ouïe à certaines fréquences. Une personne atteinte d'hyperacousie ne pourra ainsi pas tolérer certains sons perçus comme normaux par les autres personnes, ni tolérer les environnements bruyants. Les fréquences touchées et le niveau d'intensité seuil varient d'une personne à l'autre. Cette pathologie atteindrait 2 % de la population. L'origine en serait essentiellement neuronale. Certains sujets hyperacousiques présentent par ailleurs une difficulté à échantillonner les sons : un faible bruit perturbe la perception d'un bruit pourtant plus fort, au même titre que dans le « syndrome du banquet ».

Hypoacousie, surdité : Etat pathologique de l'audition caractérisé par une perception des sons significativement moindre que la normale. Des accidents, des maladies, l'exposition à des niveaux sonores excessifs répétés provoquent une perte de sensibilité de l'oreille qui peut être partielle, généralement vers 3 à 4 kHz, plage de fréquences où l'oreille est la plus sensible.

Oreille absolue (<1% de la population) : C'est une capacité à reconnaître et nommer une note sans référence préalable, associée généralement à une faculté de discrimination fine entre les fréquences. Semble nécessiter à la fois une aptitude génétique et une pratique assidue et précoce du solfège. C'est une sorte de m morisat n de la fréquence « en soi ». Elle implique aussi une liaison entre les fonctions cérébrales liées à l'audition (partie droite du cerveau) et celles liées au langage (partie gauche du cerveau), qui permettent de donner un nom à ces sons.

Oreille relative : Capacité à reconnaître une note par référence à un diapason. C'est une m morisat n du rapport de fréquence. Dans le langage courant, on parle d'oreille musicale.

Oreille harmonique : capacité à reconnaître des intervalles harmoniques, c'est-à-dire l'écart de hauteur (fréquence) séparant deux sons joués simultanément.

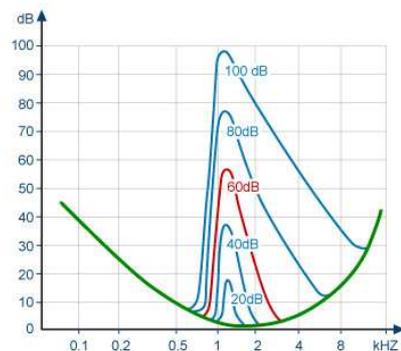
2.5. Effet de masque

On parle de masquage quand un son est rendu inaudible par un autre. Il existe plusieurs sortes d'effets de masquage.

Masque simultané : L'effet le plus connu est qu'en présence de deux sons d'intensités différentes, le plus intense provoque une diminution de la sonie du plus faible par rapport à ce qu'elle serait sans le son masquant. C'est l'effet « addition logarithmique » vue plus haut : un son est négligeable tant que, seul, il reste d'une intensité inférieure à une dizaine de dB par rapport au plus sonore.

L'effet est notable lorsque les sons sont proches du point de vue de leur hauteur tonale (fréquence) et situés dans une même « bande critique » de l'oreille, quasiment négligeable si les fréquences sont différentes (différence nécessaire de 100 Hz en sons graves et jusqu'à 5kHz en sons aigus).

Cette figure montre les seuils auditifs obtenus sans masquage en vert, puis avec un masquage par un bruit (fréquences de 1100 à 1300 Hz)   divers niveaux d'intensité (source : Antoine Lorenzi, <http://www.cochlea.eu/son/psychoacoustique>).

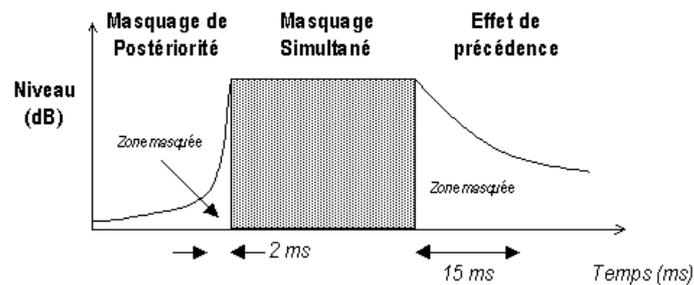


Effet de durée : La perception augmente jusqu'à une valeur maximale pour des sons d'une durée de 50 à 400ms puis décroit légèrement.

Effet de postériorité : Un son bref émis moins de 2ms avant un son masquant est négligé.

Effet de précédence (effet de Haas) : Après avoir entendu un son relativement fort, source primaire, l'oreille a besoin d'un certain temps avant d'être à nouveau capable d'entendre un son d'une source secondaire qui, dans

d'autres circonstances, lui paraîtrait parfaitement audible. A noter que cet effet est également présent dans la localisation d'un son.



Effet d'anticipation : Lorsque l'auditeur s'attend à l'émission d'un son fort, le niveau sonore perçu est plus faible que lorsqu'il ne s'y attend pas. Cela est particulièrement vrai dans le cas des sons brefs de fréquences médiums et de niveau supérieur à 80dB (réflexe stapédien de rigidification de l'oreille moyenne).

2.6. Les illusions sonores

Glissandis : Divers chercheurs ont créé des illusions sonores. En particulier les « glissandi sans fin » de Shepard et Risset sont l'équivalent auditif des escaliers sans fin de Escher : ils donnent l'illusion de sons constamment montants ou descendants. D'autres illusions peuvent être créées, en particulier portant sur la hauteur des sons perçus.

Effet McGurk : c'est un phénomène perceptif qui montre une interférence entre l'audition et la vision, en particulier lors de la perception de la parole de quelqu'un parlant devant nous. L'expérience démontre que, dans certains cas, nous « percevons » un son moyen ou intermédiaire entre ce que nous nous attendons à entendre d'après ce que nous voyons et ce que nous entendons réellement.

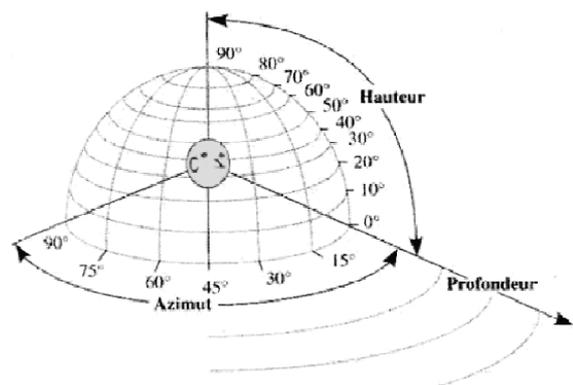
Corrélation entre localisation et intérêt : Les chercheurs travaillant sur la localisation de l'origine d'un son par l'homme ont constaté que nous avons tendance à situer devant nous un son auquel nous apportons de l'intérêt, et derrière nous un bruit ambiant. Cela se ressent en particulier si, assis dans un fauteuil en écoutant la radio placée à quelques mètres derrière nous, nous accordons soudain plus d'intérêt au programme sans tourner la tête pour autant.

2.7. Localisation de l'origine du son

Source : voir en particulier le cours de C. Gabriel cité en référence.

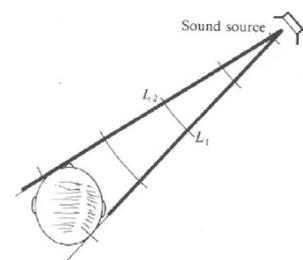
Elle repose sur trois dimensions spatiales : l'azimut (gauche-droite), l'élévation ou le plan vertical (haut-bas, devant-drière), et la distance ou profondeur. Chacune de ces dimensions fait appel à des fonctionnements différents de l'audition.

Ce fonctionnement est étudié en salle anéchoïde (chambre sourde), c'est-à-dire en l'absence de tout bruit parasite lié à l'environnement. Dans un milieu plus naturel et en particulier en présence de bruits diffus et de sources de réflexions (ou réfractions) sonores, localiser un son revient parfois à réaliser une course poursuite dans un labyrinthe de miroirs... Et pourtant ! Ne serait-ce que grâce à l'effet cocktail, nous « tendons l'oreille » au son qui nous intéresse et les mouvements du corps peuvent apporter plus de précision à la localisation en reliant ces mouvements à la perception auditive d'autant que les propriétés d'un son, y compris sa direction d'origine, ne changent généralement que lentement, et pas toutes à la fois.



Localisation en azimut :

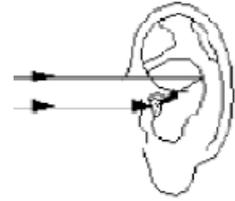
Elle utilise essentiellement le principe de précédence (ou effet de Haas) en écoute binaurale. C'est-à-dire que les deux composantes principales sont la différence entre les temps d'arrivée aux deux oreilles liée à leur écartement, et la différence d'intensité liée à l'obstacle que représente la tête (essentiellement par diffraction).



Plus précisément, la localisation se fait sur le premier son perçu, pourvu que le premier des suivants ne lui soit pas supérieur de plus de 10dB et qu'il ait un retard d'au moins 5ms pour des sons brefs, 40ms pour des sons complexes. C'est ce qui est utilisé par exemple en stéréophonie (en « jouant » sur ce retard) pour donner la sensation d'une source de son virtuelle distincte des deux sources réelles.

Mais la différence de temps d'arrivée n'est significative que pour des sources proches, et la différence d'intensité pour des sons aigus.

Pour des sons plus graves, on constate un effet lié au déphasage dû aux différences de parcours et à la réflexion sur le pavillon. On note en outre que la géométrie particulière du pavillon permet de faire la distinction entre un son provenant de l'avant et un son provenant de l'arrière mais également d'en aider à la localisation par des effets de modification du spectre du signal. C'est la localisation monaurale.



Localisation en hauteur :

La localisation en hauteur est plus complexe, et repose évidemment beaucoup moins sur l'écoute binaurale que sur une écoute monaurale. Elle se base essentiellement sur les diffractions et déphasages dus au pavillon. Elle n'est significative que pour des sons aigus (plus de 5kHz) et l'expérience montre de plus que lorsque des sources respectivement grave et aigue sont placées à la même hauteur, la source aigue est perçue subjectivement plus élevée que la source grave. Plus précisément, les sons de fréquence voisine de 8kHz semblent venir du haut, ceux de 700Hz à 2kHz ainsi que ceux de 10 à 15kHz semblent venir de l'arrière et ceux de 250 à 500Hz ou de 2 à 6kHz semblent venir de devant.



Localisation en profondeur (distance) :

Elle se base sur le niveau sonore, mais également sur la proportion de champ libre (ondes parvenant directement à l'oreille) et de champ réverbéré (sons renvoyés par l'environnement) ainsi que sur le temps d'arrivée lorsque la source est visible et, dans une moindre mesure sur la densité spectrale, les aigus étant plus absorbés par l'air que les graves lorsque la source est lointaine. Ainsi, des sons dont le contenu est inférieur à 2KHz semblent provenir d'une source plus éloignée que les sons de fréquences plus élevées.

Précision de la localisation :

L'incertitude de localisation en azimut est généralement de :

- Quelques degrés devant,
- Environ 10° sur les côtés,
- Environ 5° derrière la tête.

Celle de localisation en hauteur est généralement de :

- 10° devant,
- 15 à 20° au dessus de la tête,
- 20 à 30° derrière la tête.

En général, la distance est sous estimée par rapport à la réalité, souvent dans un coefficient de 2 à 3...

Ces incertitudes diminuent fortement si nous avons la possibilité de nous déplacer significativement de la source sonore et de tourner la tête vers la source initialement estimée.

Noter également que, comme vu précédemment, l'effet de précedence est plus efficace pour les sons aigus. Par ailleurs, bien qu'ils soient plus amortis que les sons graves sur de grandes distances, les sons aigus se propagent dans l'air de manière beaucoup plus directionnelle que les graves. Il est donc plus facile de détecter la direction précise d'une source aigue, mais cela nécessite une bonne audition des aigus, incompatible avec la presbyacousie.

3. L'apport possible des mathématiques et de l'informatique

3.1. Imagerie acoustique, géolocalisation

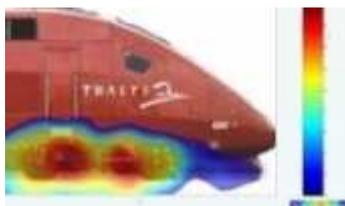
L'industrie (au sens large) et la médecine utilisent depuis très longtemps des techniques de propagation d'ondes pour le contrôle ou la caractérisation de milieux traversés. On peut citer par exemple :

- Ondes sismiques utilisées en géologie et en particulier dans le domaine pétrolier,
- Fréquences audibles pour le contrôle in-situ de l'évolution dans le temps des caractéristiques du béton ou la caractérisation de certains matériaux utilisés dans le domaine acoustique, ainsi qu'en tomographie océanique pour mesurer par exemple la température des eaux profondes,
- Ondes ultrasonores en Contrôles Non Destructifs (CND) afin de détecter des défauts (fissures) de petites dimensions, en échographie médicale afin de visualiser des variations légères de densité des tissus, ou pour les sonars sous-marins,
- Ondes électromagnétiques pour les radars,
- Etc.



L'onde « initiale » étant parfaitement connue, ces techniques utilisent les modifications constatées sur ces ondes durant leur propagation pour déterminer les caractéristiques du milieu traversé.

A noter l'exception de la tomographie acoustique océanique passive (voir par exemple les travaux de l'ENSTA de Brest), technique de caractérisation du milieu n'utilisant pas un son émis volontairement mais des sons naturellement présents dans l'environnement (cris de cétacés, bruits de navires, ...).



<http://www.mescan.com/>

L'imagerie acoustique, quant à elle, se place dans des conditions connues de propagation (généralement en champ proche pour n'utiliser que des ondes directes) pour identifier la source de bruit, tant en intensité et fréquence qu'en localisation. Il est ainsi possible de cartographier les émissions sonores d'un moteur, de vérifier les qualités d'une paroi isolante, de faire une étude environnementale en ville, etc.

Dans tous les cas, le principe est de mesurer l'onde en plusieurs points et d'appliquer à ces données des calculs de rétro-propagation permettant d'en retrouver la source dans des conditions de propagation connues. Les techniques diffèrent en terme de nombre de points de mesure (de 3 à plusieurs

centaines), moyens de mesure et grandeurs prises en compte (intensité, pression, ...), algorithme de rétro-propagation utilisés, ... et, évidemment, de coût et de résultats, en particulier au niveau de la résolution (fréquence et positionnement).

Certaines ne sont applicables qu'à des sources sonores stationnaires (permanentes) mais le beamforming et l'holographie acoustique permettent de cartographier des sources non stationnaires et font actuellement l'objet de très nombreux travaux de développement (voir par exemple les travaux du LAUM du Mans).

Radars, sonars, ..., la géolocalisation d'une source sonore est donc une technique maîtrisée depuis des années. A noter toutefois que la quasi-totalité de ces techniques n'utilisent que des champs proches ou des ondes directes, c'est-à-dire que seule l'onde émise ou réfléchi par l'objet à caractériser et parvenant directement au capteur est prise en compte, et qu'il est fait abstraction, au besoin à l'aide de filtres, des réflexions et autres « bruits » venant parasiter le signal.

Pour des raisons initialement militaires (localisation d'un sous-marin en eaux peu profondes, ...), puis environnementales (réduction des pollutions sonores liées aux transports, ...), les techniques de calcul en champ lointain (et donc de prise en compte de l'environnement sur le signal reçu) ont énormément progressées depuis quelques décennies.

La géolocalisation d'une source sonore est donc applicable dans de très nombreux cas, en utilisant les modèles numériques de terrain (MNT, cartes du relief) disponibles par exemple auprès de l'IGN, et des algorithmes de rétro-propagation prenant en compte l'effet de la topographie et des conditions météorologiques (voir par exemple les travaux de l'INSA de Strasbourg et du LMFA de Lyon en milieu terrestre, du LMA de Marseille en milieu sous-marin).

Encore faut-il que l'on dispose de suffisamment de points de mesure, et d'enregistrements de qualité suffisante... Et là est bien le frein principal de ces méthodes. Ainsi, en l'état actuel des techniques, il serait possible de :

- Calculer assez précisément la trajectoire d'un aéronef quelconque, lors d'un meeting aérien (ou autre cas assimilable) en utilisant les enregistrements sonores divers réalisés par les spectateurs sur leurs caméscopes, ou autres enregistrements de surveillance : nombre de points de mesure important, conditions de propagation simples pour ne pas dire assimilables à un champ proche, ...
- Dans des cas plus complexes, vérifier la cohérence entre des hypothèses d'explication et les enregistrements réalisés par quelques témoins.

Sans oublier, bien sûr, les nombreux cas intermédiaires dans lesquels les calculs de rétro-propagation permettraient d'approcher la trajectoire de l'objet afin d'écarter, ou de confirmer, certaines hypothèses envisagées.

3.2. Reconstitutions en réalité virtuelle



<http://www.3dcite.fr/>

Connue depuis quelques décennies, les techniques de réalité virtuelle sont de plus en plus diffusées et utilisées.

L'une de leurs applications récentes est l'urbanisme et l'aménagement du territoire, que ce soit en outil d'aide à la décision en particulier dans le domaine des transports ou de simple présentation interactive, voire en reconstitution de lieux historiques.

Suivant les cas, elles utilisent des environnements numériques entièrement reconstitués, ou se basent, en les complétant, sur les MNT déjà cités précédemment.

Du point de vue sonore, notons que les techniques proposées par les équipements audio grand public sont loin d'être représentatives des possibilités offertes par les techniques dites de son spatialisé, et en particulier par l'écoute binaurale au casque. Cette technique vise à ce que les tympans de l'auditeur reçoivent des ondes de pression similaires à celles reçues en situation réelle. Le principe repose sur la reproduction au niveau des oreilles d'un auditeur de toutes les informations nécessaires pour la reproduction d'une image sonore extra-crânienne. L'image sonore perçue, à l'image de la réalité est alors comprise par le cerveau comme étant en trois dimensions et provoque ainsi un rendu de la réalité sonore fidèle. Il ne s'agit plus d'entendre avec les oreilles, mais avec le cerveau.

A l'aide des MNT et en utilisant divers algorithmes de propagation acoustique prenant en compte la topographie, il serait donc parfaitement possible de réaliser des reconstitutions en réalité virtuelle, tant en termes de composantes visuelles que acoustiques, que ce soit pour discriminer diverses hypothèses ou d'en améliorer l'analyse en particulier dans sa perception subjective. Le seul frein à ces possibilités est alors le coût, que ce soit en termes d'expertise ou de matériel nécessaire.

4. Cas « étranges » classiques, analyse des témoignages de PAN

Le silence est étrange... voire inquiétant. Tout d'abord parce qu'il est extrêmement rare et que le bruit fait partie intégrante de notre environnement, de plus parce que nous entendons généralement ce que nous voyons alors que l'inverse n'est pas vrai, et enfin parce que le bruit est justement notre seule source d'information sur ce qui se situe hors de notre champ de vision et permet donc d'anticiper le danger ou de nous adapter à l'imprévu...

Par suite, un objet volant ou un phénomène lumineux peuvent devenir « étranges » du simple fait qu'ils ne soient pas entendus. Ou inversement, un bruit violent peut être perçu comme signe de danger et l'inquiétude peut subsister si aucune image ne vient expliquer ce bruit. Quelques cas sont récurrents.

4.1. Bruit ambiant occulté...

En particulier s'il est habituel, ne serait-ce que pour des raisons professionnelles, nous nous habituons très vite à un bruit ambiant important qui, de plus, provoque une fatigue auditive diminuant nos capacités auditives durant plusieurs heures. Ainsi, il n'est pas rare que nous soyons entourés d'un bruit permanent de 80 à 90dB sans en prendre conscience, ou en ne le réalisant que lorsqu'il stoppe. Par exemple dans notre voiture, sur l'autoroute, avec la ventilation et la radio en fond sonore. Ou à pied en centre ville avec un MP3 sur les oreilles. Ou encore en présence de climatisations ou d'ordinateurs ventilés.

Dans le même temps, nous « négligeons » subjectivement l'atténuation d'un bruit due à la distance. Un « gros objet » nous paraît devoir être très bruyant, même s'il est loin. Ainsi, nous nous attendons à être assourdis par un avion gros porteur ou par une Formule 1, même éloignés.

Or, pour reprendre cet exemple et en utilisant les règles de propagation et d'audition vus par ailleurs, même le bruit d'une Formule 1 ne sera plus perceptible depuis l'intérieur d'une voiture au-delà d'une distance voisine de 50m !

Dans de nombreux cas, le « silence apparent » d'un phénomène, paraissant initialement étrange, est donc en réalité parfaitement naturel.

Exemple inspiré d'une enquête du GEIPAN :

Un matin d'hiver, par temps froid et venteux, le témoin se rend à son travail en empruntant la même route que tous les jours. Il aperçoit de loin une lumière importante lui paraissant immobile et vers laquelle il se dirige jusqu'à avoir la sensation de « passer juste dessous ».

Bien qu'un aéroport militaire se situe à quelques kilomètres dans l'axe de la route, il écarte l'hypothèse d'un avion car il n'a rien entendu alors qu'il sait, par habitude, que les avions sont généralement très bruyants.

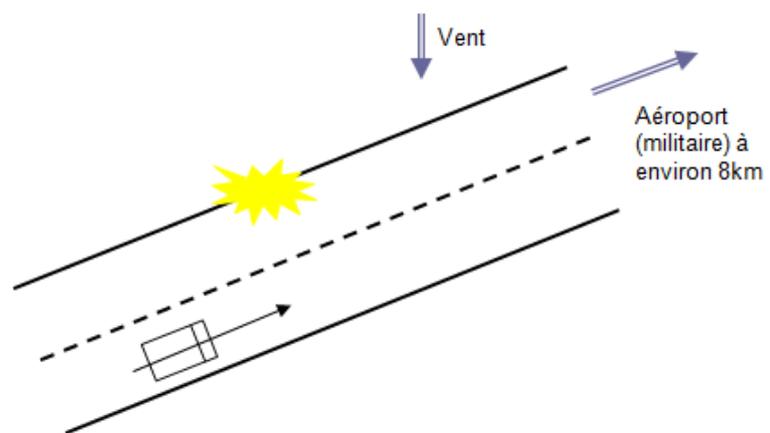
Après enquête, il apparaît pourtant qu'un avion gros porteur a décollé à ce moment là et pourrait être en cause. Reste à déterminer s'il est possible que le témoin n'ait rien entendu... Et pour cela, il faut commencer par analyser l'environnement et le bruit ambiant.

En premier lieu, on constate que le terrain avoisinant est parfaitement plat, constitué de terrains argileux plantés d'herbes, et n'a a priori pas eu d'effet sur le bruit, hormis un léger effet amortissant limitant la réverbération sur le sol.

En second lieu, on note que du fait du temps, le témoin roule vitres fermées et avec le chauffage ainsi que la ventilation poussée quasiment au maximum. Il a par ailleurs allumé son poste de radio et écoute de la musique à un niveau qui lui paraît raisonnable mais qui est toutefois suffisamment important pour couvrir les bruits du moteur et de la ventilation.

En conditions de circulation, le bruit ambiant à l'intérieur d'une voiture est de l'ordre de 60dB. La ventilation représente un bruit paraissant important, et l'ensemble peut donc être estimé à 70dB. Par ailleurs, la radio ne sera distinctement audible que si elle représente une « augmentation » sonore de quelques dB. Au final, le bruit ambiant dans l'habitacle représente donc approximativement 75dB.

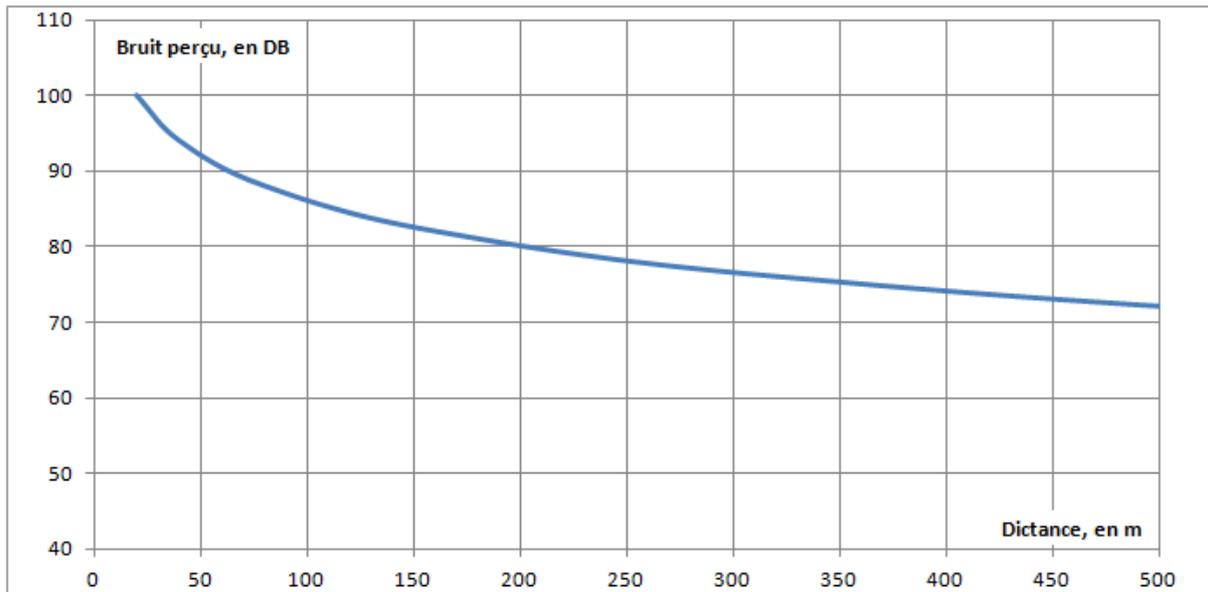
Un bruit extérieur ne pourra donc être perçu à l'intérieur de la voiture que s'il est suffisant pour représenter une augmentation de quelques dB, c'est-à-dire un niveau sonore total de l'ordre de 78dB. Autrement dit, être lui-même voisin de 75dB minimum. Encore, à ce niveau et bien que le témoin soit relativement jeune, risque-t-il



d'être « ressenti » comme partie intégrante du bruit moteur de la voiture, en particulier par un effet de masque si le niveau sonore a monté progressivement (voiture approchant progressivement de la source sonore), et donc ignoré.

De plus, les vitres sont fermées ce qui atténue les bruits extérieurs d'une valeur minimale de 15dB. Ce bruit additionnel devrait donc être de l'ordre de 90dB (75+15) minimum, voire 93dB, à proximité de la voiture pour être entendu.

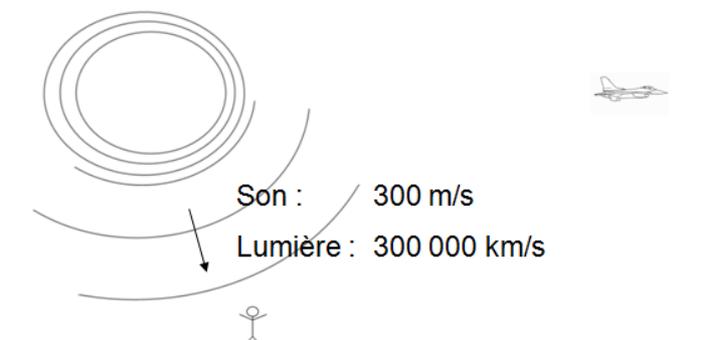
En troisième lieu, le bruit d'un avion à 20m est de l'ordre de 100dB, atténué de l'ordre de 6dB à chaque fois que la distance est doublée, ce qui est représenté ci-dessous.



On constate donc que, dans les premières dizaines de mètres, le bruit est très rapidement atténué et devient très vite inférieur à 90dB. Or un avion gros porteur qui aurait décollé d'une piste distante de 8km, ce qui est le cas ici, serait déjà à une altitude de l'ordre de 250m, distance à laquelle il ne « représente » plus qu'un bruit de l'ordre de 78dB dans ces conditions de propagation.

Indépendamment des autres données de l'enquête, et sans rentrer dans des calculs de plus haute précision, il est donc parfaitement plausible que le témoin soit passé ce jour là sous un avion gros porteur au décollage sans l'entendre.

4.2. Avions et autres objets se déplaçant rapidement à distance



Même s'il reste en vol subsonique, un avion peut paraître silencieux du simple fait de la distance. Cela est lié au fait que son image nous parvient quasi instantanément alors que son bruit met plusieurs secondes à nous parvenir. Ainsi, le son d'un avion moyen courrier volant à 5000m met de 15 à 22 secondes à nous parvenir (suivant l'angle et les conditions atmosphériques) alors que, dans le même temps, cet avion volant à 900 km/h aura parcouru plus de 6km.

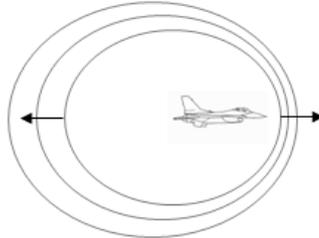
Par suite, 2 cas peuvent paraître étranges :

- Avion (ou phénomène lumineux non identifié en tant qu'avion en particulier la nuit) vu sans être entendu du fait du temps nécessaire à la propagation du son, en particulier si l'environnement est bruyant,
- Bruit d'aéronef perçu alors que celui-ci n'est déjà plus visible ou provenant d'une direction tellement différente qu'il n'est plus associé spontanément à l'objet vu.

Noter que, outre ces aspects, le son d'un avion peut être fortement atténué ou au contraire accentué par diverses composantes telles que des couches atmosphériques faisant « guide d'onde » et limitant la propagation du son vers le sol, ou par des réflexions parasites sur des éléments environnants tels que murs d'immeubles ou flans de vallées. Suivant les cas, ces réflexions pourront rediriger le son ou créer des interférences et en augmenter ou en diminuer le niveau sonore.

Il est par ailleurs nécessaire de prendre en compte l'effet Doppler :

- Son grave
- Amortissement faible
- Localisation difficile
- Bonne audition à tout âge



- Son aigu
- Amortissement élevé
- Localisation aisée
- Audition atténuée par l'âge

Le son émis vers l'avant de l'avion est beaucoup plus aigu que le son émis vers l'arrière, la différence étant d'autant plus importante que l'avion vole vite.

Or des sons aigus sont beaucoup plus amortis que des sons graves (amortissement quasiment proportionnel à la fréquence et dépendant des conditions atmosphériques). Ainsi, à 4000Hz, l'atténuation peut représenter 50dB par km.

De plus, la presbycusie (diminution des capacités auditives avec l'âge) rend ses sons aigus d'autant plus difficiles à entendre que la personne est âgée.

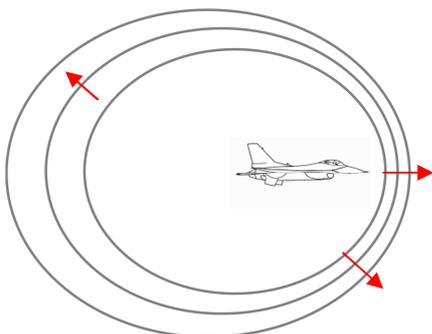
Par suite, il est beaucoup plus difficile d'entendre (et de localiser) un avion venant vers nous qu'un avion s'éloignant.



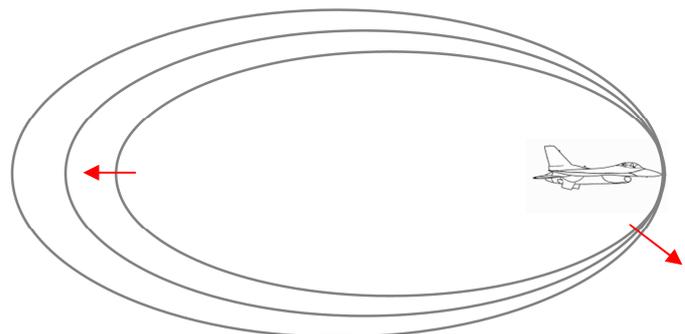
Ci contre l'exemple de la patrouille de France en vol de nuit le 2 juillet 2008, ayant donné lieu à plusieurs témoignages et à une enquête du GEIPAN.

4.3. Le cas du mur du son

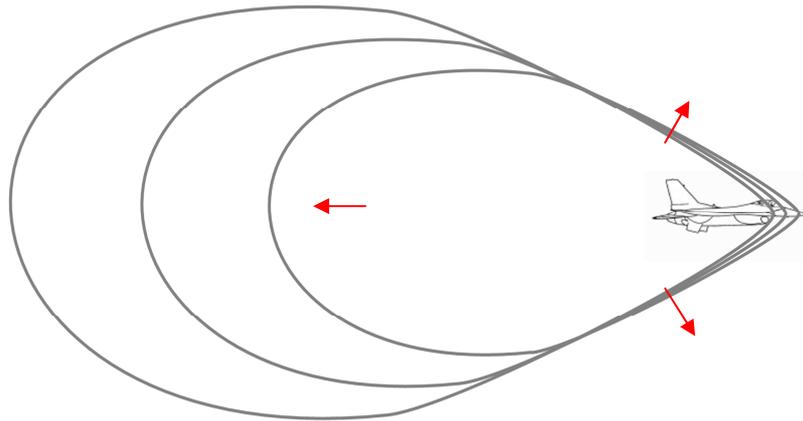
Outre les temps de parcours différents pour la lumière et le son, le cas du mur du son est particulier et il est rare, maintenant, qu'un avion en vol supersonique soit entendu.



Tant qu'il reste à une vitesse inférieure à celle du son, l'avion est plus ou moins « au centre » de la sphère de front d'onde, ces fronts d'onde s'éloignant de lui dans toutes les directions.



Lorsqu'il atteint la vitesse du son, voisine de 1000 km/h, il avance à la même vitesse que le front d'onde présent devant lui, et la totalité de l'énergie sonore est rassemblée en une seule surface constituant un « mur ». S'il se maintient à cette vitesse, en vol transsonique, l'avion subit de très fortes vibrations.

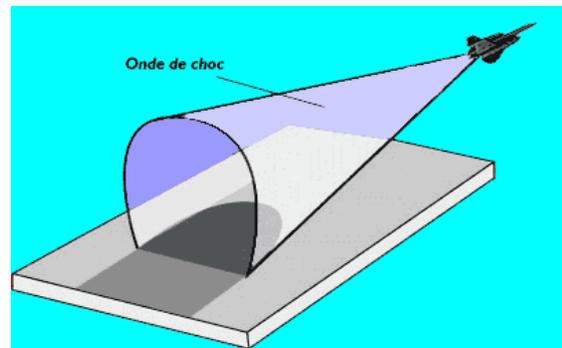


S'il franchi le mur, il passe en vol supersonique et est « suivi » par les ondes sonores qui forment alors un cône d'autant plus fermé que l'avion va vite. Ce cône est en fait constitué d'une onde de choc (ou onde de surpression) qui provoque un « bang » lorsqu'elle rencontre un élément solide, qu'il s'agisse des ailes et de l'empennage de l'avion ou du sol.

Sur les schémas précédents, les flèches rouges indiquent le sens de propagation des ondes sonores. A l'avant de l'avion en vol supersonique, c'est le silence. Il faut se trouver à l'intérieur du cône de Mach pour que l'avion soit audible.

Plus l'avion vole vite, plus le cône est refermé, et plus rares seront donc les zones au sol pouvant se trouver dans ce cône.

On note d'ailleurs que, s'il était autrefois habituel d'entendre le « bang » d'un avion franchissant le mur du son, les normes environnementales ont maintenant imposé des routes de vol telles que cela devient de plus en plus rare au point de faire l'objet de la surprise générale et d'articles dans les journaux.

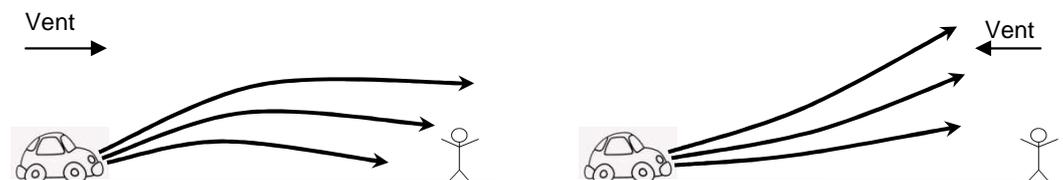


<http://philippe.boeuf.pagesperso-orange.fr/robert/>

4.4. L'effet du vent

Le vent (et les variations de température) ont plusieurs effets sur la propagation du son...

Le principal est qu'un son se propage mieux dans le sens du vent que contre le vent. Cela est lié à des effets de densité de l'air provoquant des déviations, voire des diffractions du son vers le sol ou vers le ciel, liées essentiellement au fait que le vent est moins fort au sol qu'en altitude.



Un paramètre, moins connu mais tout aussi réel en particulier sur les grandes distances, est une conséquence de l'effet Doppler et augmente l'amortissement des fréquences élevées (aigues) en présence de vent, en particulier dans le sens du vent. En présence de vent, un son paraîtra donc plus grave qu'en temps normal.

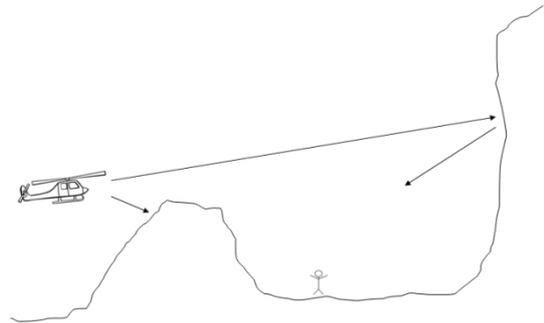
4.5. Quelques environnements particuliers

Tout comme la forêt, un brouillard dense est très amortissant et diffuse les sons qui paraissent anormalement graves, lointains, difficile à localiser. Dans une moindre mesure le même phénomène d'étrangeté des sons perçus peut se produire en cas de forte pression atmosphérique, de temps humide (amortissement faible et sons paraissant donc au contraire plus aigus), de temps orageux, ...

Dans le même ordre d'idée, en présence de neige il n'y a quasiment plus de réverbérations des sons sur le sol. L'environnement sonore paraît particulièrement silencieux, et même la voix est perçue comme étrange. Inversement, la glace accentue la réverbération et l'environnement paraîtra particulièrement sonore.

Des fossés, des talus, peuvent provoquer des zones d'ombre acoustique handicapant la perception du son d'un aéronef ou autre véhicule. Inversement, la forme de certaines vallées amplifie tout son venant du ciel, par des phénomènes géométriques voisins de ceux des antennes paraboliques. Un avion ou un orage peuvent alors paraître anormalement bruyants.

Des immeubles, des falaises, des murs de béton ou de verre peuvent constituer de bons réflecteurs et transmettre un bruit dans une direction surprenante, voire le transmettre dans des zones d'où leur source est invisible.



Une rivière peut constituer un excellent guide d'onde et permettre d'entendre un bruit supposé faible (conversation, petit moteur, ...) à plusieurs km.

4.6. Les éléments importants des témoignages...

Enfin l'important...

Une première règle est que les composantes sonores sont importantes dans tous les cas, au même titre que le reste du témoignage, qu'elles aient été citées comme « étranges » ou non par les témoins.

Les exemples et cas particuliers précédents sont révélateurs des éléments importants, à prendre en compte lors du recueil des témoignages et relativement peu nombreux :

- Témoin : âge, particularités auditives connues s'il y a lieu, pratique d'une activité musicale (capacité de « reconnaissance » des sons), environnement sonore habituel, ...
- Environnement proche : présence de parois et autres talus pouvant provoquer des réflexions ou des zones d'ombre, bruit ambiant ou sources sonores autres identifiées,
- Son perçu s'il y a lieu : direction apparente, niveau sonore, tonie (grave, aigue) ou timbre (son rappelant un autre son connu), durée et évolution dans le temps, ...
- Conditions météo : température et hygrométrie influençant la propagation, ...
- Enregistrement sonore s'il y a lieu (magnétophone, caméra, ...)

Ces données permettront ensuite d'expliquer certaines composantes paraissant initialement étranges (en particulier dans le cas du silence apparent) ou de discriminer diverses hypothèses :

- Les qualités d'audition du témoin permettront de mieux analyser son témoignage, que ce soit dans les niveaux, les fréquences ou les directions perçues,
- L'analyse du bruit ambiant et de l'environnement proche ainsi que des conditions météorologiques permettront de prendre en compte des particularités locales de propagation, qu'il s'agisse d'accentuation ou de diminution du niveau sonore ou de modification de la direction apparente de la source,
- Les enregistrements permettront d'améliorer ces analyses voire, s'ils sont nombreux et que le cas le justifie, de réaliser des calculs de rétro-propagation permettant d'approximer la position ou la trajectoire de la source.

5. Références

5.1. Crédits

Images : cf. légendes des images. A défaut, ressources personnelles de l'auteur.

Données : cf. références ci-dessous et ressources personnelles de l'auteur.

5.2. Cours ou articles disponibles sur le net

<http://www.claudegabriel.be/> - Acoustique et psychoacoustique, Haute Ecole Libre de Bruxelles Ilya Prigogine
http://www.pourlascience.fr/ewb_pages/a/article-la-spatialisation-du-son-18507.php « la spatialisation du son », revue « Pour la Science » de Novembre 2008

http://perso.univ-lemans.fr/~jcpascal/Cours/ENSIM3A_Master2_Antenne.pdf Holographie acoustique en champ proche, ENSIM.

<http://www.mesures.com/pdf/old/755solholographie.pdf> Imagerie acoustique, Revue « Mesures » de mai 2003.

5.3. Laboratoires de recherche et autres centres de ressources français

<http://www.ircam.fr/> Institut de Recherche et Coordination Acoustique Musique – Paris (Psychoacoustique, son spatialisé, ...)

<http://lmfa.ec-lyon.fr/> Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique – Ecole Centrale – Lyon (Acoustique, psychoacoustique, ...)

<http://www.lma.cnrs-mrs.fr/> Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique – CNRS – Marseille (Acoustique sous-marine, acoustique des salles, psychoacoustique, ...)

<http://www.inria.fr/centre/sophia/> Institut National de Recherche en Informatique et Automatisation – Sophia Antipolis (Réalité virtuelle, son spatialisé)

<http://www.bruit.fr/> Centre d'Information sur le Bruit – Paris

<http://laum.univ-lemans.fr/> Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine – Le Mans (Holographie acoustique)

<http://www.ensta-bretagne.fr/> Ecole Nationale Supérieure des Techniques Avancées – Brest (Tomographie acoustique passive)

<http://www.insa-strasbourg.fr/> Institut National des Sciences Appliquées – Strasbourg (Acoustique environnementale)

<http://www.cstb.fr/> Centre Scientifique et Technique du Bâtiment – Marne La Vallée (Utilisation de la Réalité Virtuelle en Aménagement du Territoire)

<http://www.cerv.fr/> Centre Européen de Réalité Virtuelle – Brest

<http://www.realite-virtuelle.univmed.fr/> Centre de Réalité Virtuelle de la Méditerranée – Marseille

<http://www.technofirst.com/> Leader mondial de l'antibruit actif – Aubagne

<http://professionnels.ign.fr/mnt> Institut National de l'Information Géographique et forestière – St Mandé (Modèles Numériques de Terrain)

5.4. Pour le plaisir...

<http://nouvoson.radiofrance.fr/> Site de Radio-France proposant quelques enregistrements en son spatialisé binaural

<http://carte.cannes.fr/> Visite de la Ville de Cannes en 3D