

Christian Hugonnet et Pierre Walder

Prise de son
Stéréophonie
et son multicanal

© Groupe Eyrolles, 2012, ISBN : 978-2-212-13282-3

EYROLLES



Avant-propos

Preneur de son, ingénieur du son, cette profession fait appel à une somme et à une diversité de connaissances que nous avons abordées pas à pas dans ce livre avec un maximum de méthode. Nous avons évité d'être didactiques et d'imposer un quelconque système au lecteur ; au contraire, nous avons cherché à lui donner suffisamment d'éléments de réflexion, d'informations scientifiques et techniques qui relèvent de l'objectivité, afin qu'il puisse faire face avec sérénité aux problèmes subjectifs liés à la prise de son. Si la musique est largement représentée dans cet ouvrage, les autres secteurs d'activité également évoqués – théâtre, fiction, bruits de la nature, sport, reportage – s'inspirent également des mêmes techniques de prise de son.

Les démonstrations mathématiques ont été évitées toutes les fois que les sujets étaient traités dans des ouvrages de physique ou de mathématiques courants. En revanche, nous nous sommes étendus sur certaines notions théoriques directement applicables à la prise de son et non encore exposées dans les ouvrages spécialisés.

Chaque chapitre traitant d'un sujet spécifique, nous avons été quelquefois contraints d'anticiper certaines questions, mais la relecture de certains passages n'est jamais inutile.

Nous avons opté pour une description systématique des principaux systèmes de prise de son, sans esprit de chapelle. Nous nous sommes abstenus de donner des recettes et avons privilégié des lignes directrices basées sur des critères d'évaluation où chacun, muni d'un bagage solide, peut progresser avec méthode et s'adapter à toute situation nouvelle de studio ou d'extérieur. Nous avons essayé d'être concis, avec un langage simple et clair emprunté aux secteurs artistiques, acoustiques et techniques, en donnant des exemples concrets tirés de l'exploitation de tous les jours.

Nous souhaitons que le lecteur acquière une certaine logique dans la préparation de son travail en évitant (certains) tâtonnements et pertes de temps au profit de l'expérimentation constructive. Un ingénieur du son, quel que soit son degré de qualification ou son mode d'approche, devrait y trouver matière à réflexion. Chacun pourra

élaborer sa propre philosophie – se situer ou même s’écarter de certaines habitudes – pour trouver la solution la mieux adaptée à une situation particulière. Tout est possible : on apprend beaucoup en faisant des erreurs, à condition de savoir analyser ce que l’on a fait et en tirer les conséquences.

Avertissement

Cet ouvrage est une mise à jour augmentée du livre *Théorie et pratique de la prise de son stéréophonique*. Pour y introduire le son multicanal, nous avons le choix entre deux options :

- compléter chacun des chapitres de l’ancienne édition,
- consacrer une nouvelle partie à ce vaste sujet.

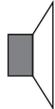
Nous avons finalement opté pour l’ajout de trois nouveaux chapitres :

- le chapitre 11, « La perception, du xv^e siècle au multicanal »,
- le chapitre 12, « Les systèmes d’écoute, de la monophonie au son multicanal »,
- le chapitre 13, « Les systèmes de prise de son multicanal »,

et réactualisé l’ouvrage, complété d’un index et d’un lexique français-anglais et anglais-français.

Signification des pictogrammes

Les déplacements des sources sonores face à un microphone sont notifiés du centre vers la droite. Par symétrie, les explications sont identiques pour un déplacement du centre vers la gauche.

S		Source sonore ponctuelle
		Microphone
		Système microphonique
		Potentiomètre panoramique
		Haut-parleur
		Auditeur-observateur

Abréviations utilisées dans l'ouvrage

Δt	différence de temps
ΔI	différence d'intensité
dB	décibel
s	seconde
m	mètre
Ω	ohm
A	ampère
Hz	hertz
N	newton
Pa	pascal

Sommaire

Préface	V
Remerciements	VII
Avant-propos	IX
Avertissement	X
Signification des pictogrammes	X
Abréviations utilisées dans l'ouvrage	XI
Chapitre 1 – De l'ère mécanique à l'ère numérique.....	1
1. L'ère mécanique	1
2. L'ère électrique	4
3. L'ère de la « haute fidélité »	7
4. L'ère de la stéréophonie	8
5. L'ère numérique	11
Chapitre 2 – La prise de son.....	13
1. Schématisation de la prise de son	13
2. Prolongement de l'événement sonore	15
3. Critères d'appréciation	16
Critères techniques objectifs	17
Critères esthétiques objectifs	17
Critères esthétiques subjectifs	17
Identification sémantique	18

Chapitre 3 – Le phénomène sonore	19
1. Propagation du son	19
2. Définitions et unités de base	20
La longueur d’onde, la période, la fréquence	20
La pression et l’intensité acoustique	21
La vitesse particulière	22
L’impédance acoustique	23
3. Caractéristiques d’une source sonore et perception	23
Hauteur	23
Définition	23
Sons purs et sons complexes	24
Niveau sonore	25
Définition	25
La sensation sonore en fonction de la fréquence	28
L’effet de masque	30
Le timbre	31
Définition	31
Composantes spectrales	31
Enveloppe du signal	32
Le quantum acoustique	33
4. Directivité des sources sonores	34
5. Comportement du son dans une salle	37
La diffusion et l’absorption	37
Le milieu de propagation	37
Nature des matériaux rencontrés et diffusion	38
Nature des matériaux rencontrés et absorption	40
Champ direct, champ réverbéré	43
Définition	43
Aspect perceptif	45
Les ondes stationnaires	48
La réverbération	49
Définition	49
Le temps de réverbération optimal	50
Taux d’intelligibilité	50
Allure de la réverbération	51
La distance critique	52
Caractéristiques de quelques salles	53
Les critères objectifs et subjectifs d’évaluation d’une salle	53

Le groupe des temps de réverbération	54
Le groupe de la clarté	54
Le groupe de la spatialisation	55
Chapitre 4 – Perception de l'espace sonore	57
1. La perception naturelle binaurale	57
Différence de temps d'arrivée des signaux	58
Différence d'intensité des signaux	59
La localisation dans le plan vertical médian	62
La localisation en profondeur	63
Les variations d'intensité	63
Le rapport du son direct au champ réverbéré	63
Les variations spectrales	64
2. La perception binaurale au casque	65
Différence interaurale de temps	65
Différence interaurale d'intensité	66
Interaction entre différences interaurales de temps et d'intensité	68
3. La perception stéréophonique	69
Définition	69
Localisation par différence de temps	70
La localisation par différence d'intensité	72
Localisation latérale par différences conjuguées de temps et d'intensité	74
Remarques générales	75
La compatibilité stéréo-mono	76
Chapitre 5 – Préparation d'une séance de prise de son...	77
1. L'œuvre, sa réalisation, son exécution	77
Préparation de l'enregistrement	77
Approche de l'ouvrage	79
2. Le lieu de prise de son	80
Généralités	80
Classification des lieux	81
Locaux conçus spécialement pour la prise de son et l'enregistrement	81
Salles réputées pour leur acoustique	82
Lieux à l'acoustique réputée mais non adaptée au type d'œuvre exécutée	82
Salle polyvalente plus ou moins traitée acoustiquement	83
Espaces non traités acoustiquement	83
Plein air	84

3. Le local de prise de son, de contrôle et d'enregistrement	84
Cabines de prise de son équipées de matériel fixe	85
Le car de reportage	85
Local aménagé pour la circonstance	85
Prise de son sur le lieu même de l'événement	86
Prise de son avec sonorisation simultanée d'un lieu de spectacle	86
4. La reconnaissance des lieux	86
5. Les lieux particuliers de prise de son	88
Prise de son type reportage	88
Captation de sons et de bruits de la nature	89
Chants d'oiseaux ou cris d'animaux	89
Mer, vagues, vent, tonnerre	90
Bruits mécaniques	90
Prise de son « dissimulée »	91
Prise de son « en action »	91
Chapitre 6 – Les microphones.....	93
1. Classification acoustique	93
Microphone à pression	93
Cas du microphone à zone de pression	95
Microphone à gradient de pression	96
Microphone mixte	98
2. Classification électrique	99
Microphones électrodynamiques	100
Microphone électrodynamique à bobine mobile	100
Microphone électrodynamique à ruban	101
Microphone électrostatique	101
Microphone électrostatique à une seule membrane	101
Microphone électrostatique à double membrane	103
Microphone à électret	105
3. Microphones particuliers	105
Microphone canon interférentiel	105
Microphone parabolique	106
Les capteurs	106
Le microphone H.F.	107
Le microphone numérique	107

4. Caractéristiques générales	107
La sensibilité	107
Le bruit de fond propre au microphone	108
Le rapport signal/bruit	108
Le niveau maximal	108
La dynamique	109
La courbe de réponse	109
L'impédance de sortie	109
Tableau comparatif	110
5. Angle de captation	110
6. Facteur de directivité	111
7. Facteur de distance	112
8. Tableau récapitulatif	114

Chapitre 7 – La prise de son stéréophonique	
« mono dirigée » multimicrophonie.....	115
1. De la monophonie à la stéréophonie mono dirigée	115
2. Principe de la monophonie dirigée	117
3. Multimicrophonie	120
La balance sonore	124
4. La prise de son multimicrophonique : technique de play-back et de mixage	124
Principe du play-back	125
Phase 1 : réalisation de la base	125
Phase 2 : play-back ou <i>re-recording</i>	126
Phases suivantes	126
Phase finale : le mixage	126
Mixage final	127
5. Le <i>home studio</i>	128
6. Prise de son de proximité	130
Captation d'une partie du rayonnement sonore	130
Bruits annexes	131
Mode d'excitation	132
Cas des microphones utilisés en proximité	133

Chapitre 8 – Les systèmes de prise de son stéréophonique.....	135
1. L'angle utile de prise de son	135
2. La prise de son stéréophonique d'intensité	136
Le principe	136
Le système XY : une paire de microphones coïncidents	139
Remarques d'utilisation	140
Variante avec des microphones omnidirectionnels	141
Le système stéréosonic	141
Remarques d'utilisation	143
Cas d'une fiction	143
Le système MS (<i>Middle-Side</i>) : une paire de microphones coïncidents	144
Cas du microphone M omnidirectionnel	148
Remarques d'utilisation	149
3. La prise de son stéréophonique de temps	149
Le principe	149
Le système AB utilisant deux capsules omnidirectionnelles	152
Principe de fonctionnement	152
Remarques d'utilisation	152
4. La prise de son stéréophonique de temps et d'intensité	153
Le principe	153
Le système AB : une paire de microphones faiblement espacés	155
Principe de fonctionnement	155
Cas des microphones cardioïdes	157
Cas de microphones hypercardioïdes	162
Cas de microphones infracardioïdes	162
Compatibilité monophonique	163
Paire de microphones espacés de quelques décimètres à plusieurs mètres	163
Variante	164
Le système AB avec obstacle entre les deux microphones	165
Remarques d'utilisation de la sphère	166
La tête artificielle	167
5. Pratique des systèmes stéréophoniques	170
Connaissance du rayonnement énergétique de la source	170
Placement du système par rapport à une seule source sonore	172
Prise de son globale de plusieurs sources sonores	173
1 ^{re} étape : écoute dans la salle et position des interprètes	173
2 ^e étape : choix du système stéréophonique	174
3 ^e étape : mise en place du système de prise de son	175

4 ^e étape : écoute en cabine et réajustement du système	176
5 ^e étape : évaluation esthétique de la prise de son	177
Chapitre 9 – Corrections acoustiques et recours aux microphones d’appoint	179
1. Corrections acoustiques	179
Les artistes s’entendent difficilement	179
Excès de réverbération	180
Réduction du volume	180
Augmentation de la surface d’absorption	181
Manque de réverbération	182
Augmentation du volume	182
Augmentation de la diffusion	182
Recours à une réverbération artificielle	183
Manque de clarté	183
Présence de <i>flutter echo</i>	184
2. Corrections par des microphones d’appoint	185
Cas d’une prise de son globale	185
Renforcement d’une source sonore	185
Amélioration de l’image stéréophonique	186
Correction acoustique	188
Correction de l’emplacement des musiciens	191
Sources sonores enregistrées en plusieurs étapes	193
Raisons diverses	194
Cas d’une prise de son multimicrophonique	195
3. Précautions à observer	196
Respect de la localisation	196
Respect du timbre	197
Respect de la profondeur de champ	199
Chapitre 10 – Démarche méthodologique de la prise de son	201
1. Contrôle technique avant une prise de son	201
Alignement de la console de mixage et des haut-parleurs de contrôle	201
Initialisation de la console de mixage	201
Positionnement	202
Liaisons	202
Homogénéité spectrale	202

Alignement	202
Phase	202
Alignement de la console de mixage et d'un ordinateur	203
Alignement des niveaux	203
Vérification du bon fonctionnement des équipements	203
Alignement entre la console de mixage et les microphones	203
Préparation	204
Ajustement des niveaux d'entrée	204
Sensibilité du couple stéréophonique	204
Repérage gauche-droite	204
Vérification de la phase	204
Vérification de la qualité globale d'écoute de l'installation	204
2. Contrôle technique pendant la prise de son	205
Haut-parleur	206
VU-mètres	206
Crête-mètres	207
Indicateur de <i>loudness</i>	208
Corrélateur de phase et oscilloscope	210
Le corrélateur de phase	210
L'oscilloscope	213
Tableau récapitulatif	214
3. Contrôle technico-artistique de la prise de son selon les quatre critères d'évaluation	215
Réglage de l'équilibre spectral	215
Réglage de l'intensité sonore et de la dynamique	215
Respect des plans sonores	217
Information de profondeur	217
Information spatiale	217
Respect de la localisation spatiale	218
Résumé des quatre critères d'évaluation et du critère de clarté	219
4. Rapports avec les artistes	221
Avant l'enregistrement	221
Pendant l'enregistrement	222
Chapitre 11 – La perception, du xv^e siècle au multicanal	225
1. Le point de vue artistique	225
À la Renaissance	225
À l'époque classique	227

2. Le point de vue technologique	228
Tentative analogique	228
Évolutions dans les domaines du disque, de la radio, de la télévision	233
Le cinéma	236
Le cinéma analogique	236
Mutation vers le numérique	238
Dernier venu : le tout numérique image et son, le 3D	240
Le multicanal en écoute chez soi	241
Chapitre 12 — Systèmes d'écoute, de la mono au multicanal 5.1	243
1. Écoute 5.1 en cabine de prise de son	246
Radio, télévision, disque, cinéma, multimédia	246
Les faiblesses du système 5.1	248
2. Écoute 5.1 au casque	249
3. Écoute 5.1 <i>home theater</i>	250
4. Écoute en salle de cinéma et de spectacle	251
Écoute 2D	251
Dispositif Dolby surround 7.1	251
Écoute 3D	251
Dispositif 9.1	251
Dispositif Dolby Atmos	251
Dispositif 22.2	253
Dispositif WFS	254
Chapitre 13 – Les systèmes de prise de son multicanal	255
1. Systèmes à cinq microphones moyennement espacés, jusqu'à 100 cm, sans matricage	256
Principe de base	256
Système MMAD	258
Les segments frontaux	259
Le segment arrière	259
Les segments latéraux	259
Système OCT surround 3.2	262
Système INA 5	263
Système WCSA, une variante	264
Système DPA 5100	265

Système H3D ou H2-PRO	266
Système H3D adapté à l'écoute 5.1	266
Système H2-PRO adapté à l'écoute 7.1	266
Remarques générales d'exploitation	267
En captation	267
En restitution	267
2. Systèmes à quatre microphones groupés, dédiés aux ambiances, sans matricage	267
Système Croix IRT	268
Système double AB	268
Variante	269
Remarques générales d'exploitation	270
En captation	270
En restitution	270
3. Systèmes à microphones très espacés, de plus de 100 cm, sans matricage	270
Decca Tree	271
Système JML Tree	272
Fukada Tree	273
Rampe microphonique avec microphones d'ambiance	274
Remarques générales d'exploitation	274
En captation	274
En restitution	275
4. Systèmes à capsules groupées, coïncidentes, avec matricage	275
Système double MS sans écran, formant deux couples MS	275
Système WMS-5, une variante	276
Système double MS avec écran	277
Remarques générales d'exploitation	279
En captation	279
En restitution	279
5. Systèmes « ambisonic »	279
Notions spécifiques au principe ambisonic	280
Les formats A, B, D et les « ordres »	280
Les autres formats à définir	284
Système Soundfield	284
Systèmes à haute résolution spatiale	288
Système Trinnov SRP	288
Système HOA	290
Remarques générales d'exploitation	292
Captation	292
Restitution	292

6. Systèmes reposant sur la perception transaurale et le traitement des microphones d'appoint	292
Rappel du principe de la synthèse binaurale et transaurale	293
Comment gérer les points faibles de la restitution 5.1 avec des microphones d'appoint ?	294
1 ^{re} phase	295
2 ^e phase	295
3 ^e phase	295
4 ^e phase	296
Remarques générales d'exploitation	296
En captation	296
En restitution	296
7. Systèmes multimicrophoniques	297
Cas particulier de la prise de son multimicrophonique adaptée à l'écoute WFS	298
Remarques générales d'exploitation	300
En captation	300
En restitution	300
Pour conclure : de la théorie à la pratique	301
Chapitre 14 – Silhouette du preneur de son	303
1. La formation du preneur de son	303
2. L'équipe de prise de son	304
3. La personnalité du preneur de son	306
Conclusion	307
Annexes	309
Annexe 1 – Pratique du décibel	309
Exemples pratiques	310
Niveau d'un signal en valeur absolue	311
Contrôle visuel	312
Annexe 2 – Votre ouïe est-elle en danger ?	313
Signaux d'alarme	314
Comment peut-on contrôler l'état de l'ouïe ?	314
Annexe 3 – Représentation simplifiée d'un module d'entrée en ligne (<i>in line</i>) d'une console multivoie	317
Annexe 4 – Technique du play-back ou <i>re-recording</i>	319

Résumé des opérations	319
Phase 1 : réalisation de la base	319
Phase 2 : play-back ou <i>re-recording</i>	320
Phase 3 : éventuels 2 ^e surimpression (de bruitages) et 2 ^e mixage	320
Annexe 5 – Sigles, abréviations de normes	323
Annexe 6 – Formation	325
Annexe 7 – Disques de test	327
Vidéos 3D	327
Stéréophonie	327
Annexe 8 – Manifestations diverses : rencontres, expositions, symposiums...	329
Annexe 9 – Références bibliographiques et sites web	331
Annexe 10 – Questionnez, on vous répondra...	339
Annexe 11 – Lexiques	341
Lexique anglais-français	341
Lexique français-anglais	345
Index	349

Extrait Chapitre 3

Le phénomène sonore

1. Propagation du son

De manière extrêmement simplifiée, la figure 3.1 montre le mouvement des particules d'air soumises au mouvement alternatif d'une membrane de haut-parleur :

- les colonnes 1 à 6 représentent le mouvement alternatif des particules dans le temps pour chaque distance spécifique ;
- les lignes t_1 à t_6 représentent le mouvement alternatif des particules dans l'espace pour chaque instant spécifique (élongations maximales).

Sous l'effet du déplacement avant de la membrane du haut-parleur, une particule vient, au temps t_1 , « frapper » une particule voisine au point 1 pour revenir et atteindre une élongation maximale arrière au temps t_2 . La particule en 1 frappe à son tour la particule 2, et ainsi de suite.

Il y a formation et propagation d'une onde sonore : le « choc » des deux particules d'air en position 1 au temps t_1 se trouve ainsi transmis à deux autres particules en position 6 au temps t_6 . Au temps t_6 , on remarque que les particules élémentaires, qui étaient équidistantes, sont maintenant soit rapprochées (zone de pression), soit éloignées (zone de dépression). Il y a création d'un champ sonore ou champ acoustique.

Quand nous parlons, pour simplifier, de particules élémentaires d'air, il s'agit en fait de masses élémentaires d'air très petites, contenant elles-mêmes des millions de molécules qui se déplacent autour de leur position d'équilibre sur de très faibles distances (inférieures au millimètre).

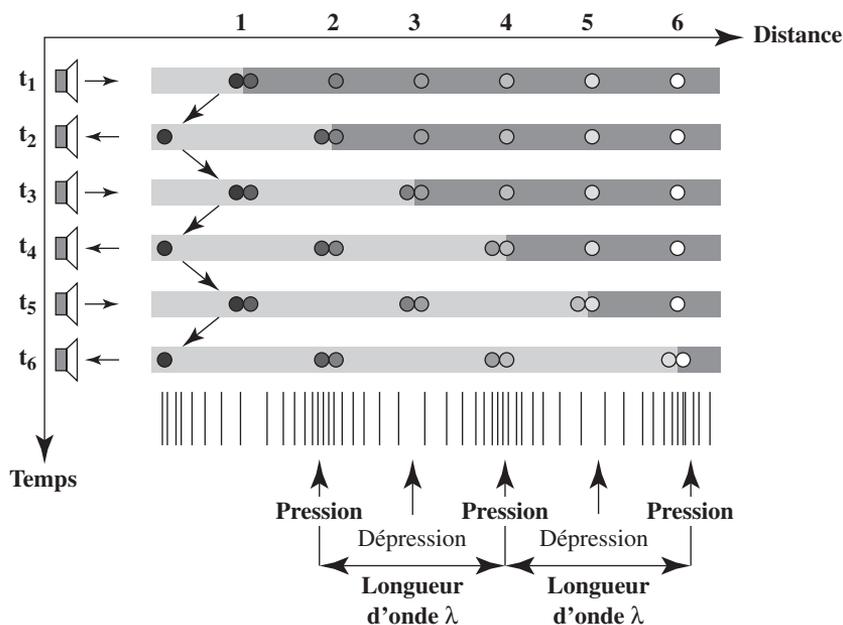


Figure 3.1 – Propagation du son par les particules élémentaires d'air.

2. Définitions et unités de base

La longueur d'onde, la période, la fréquence

À un temps donné, la distance qui sépare deux zones de pression ou deux zones de dépression est la **longueur d'onde** λ (mètre). Pour un observateur, le temps qui s'écoule entre deux zones de pression ou de dépression est la **période** T (seconde). La vitesse à laquelle se propagent ces zones de pression ou de dépression est appelée « **célérité** » (c). C'est le rapport entre la longueur d'onde et la période, qui est sensiblement égale à 340 m/s à 20° C dans l'air.

$$c = \frac{\lambda}{T} \quad (\text{m/s})$$

La **fréquence** (f) est le nombre de périodes perçues par unité de temps. Son unité est le hertz (Hz). La bande des fréquences audibles généralement adoptée s'étend de 20 à 20 000 Hz.

$$f = \frac{1}{T} \quad (\text{Hz})$$

La longueur d'onde (λ) est liée à la célérité et à la fréquence par la formule :

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (\text{m})$$

d'où les équivalences présentées dans le tableau suivant.

Fréquence f	20 Hz	1 000 Hz	20 000 Hz
Période $T = 1/f$	50 ms	1 ms	0,05 ms
Longueur d'onde $\lambda = c/f$	17 m	0,34 m	0,017 m

Ces équivalences sont d'une extrême importance pour aborder tous les mécanismes d'acoustique architecturale et instrumentale. On peut, par exemple, en déduire que tout objet (table, chaise, console) représente, selon ses dimensions, un obstacle ou non à la propagation du son. La comparaison entre longueur d'onde et dimension de l'objet doit devenir un réflexe.

La pression et l'intensité acoustique

Toute source en vibration génère une onde sonore dont la pression s'additionne et se retranche alternativement à la pression atmosphérique ; il s'agit de la **pression acoustique**. Cette pression acoustique excite le tympan. Sa périodicité nous renseigne sur la fréquence du signal et son amplitude sur la valeur du niveau sonore. Elle se mesure en pascals (Pa).

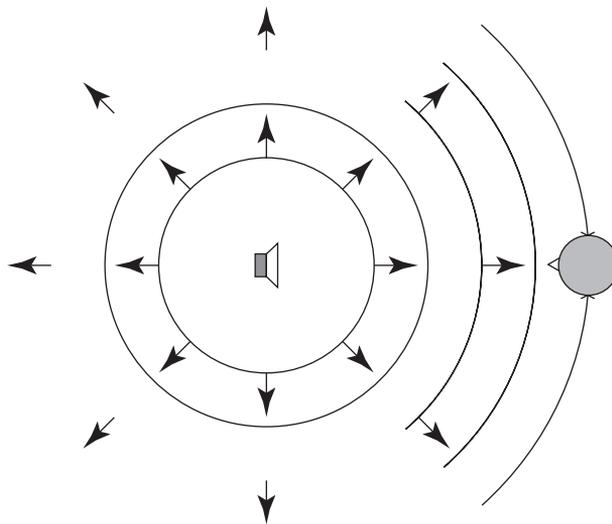


Figure 3.2 – Propagation de l'onde de pression.

En première approximation, cette onde de pression est supposée sphérique, car la taille de la source est souvent petite par rapport à la longueur d'onde du signal rayonné. Cependant, un observateur ou un microphone placé au-delà d'une certaine distance (environ 1/6 de la longueur d'onde) percevra cette source sous forme d'une onde plane, car le rayon de courbure de l'onde sera alors très faible.

La **puissance acoustique** (en watts), concentrée près de la source, se répartit sur des sphères de plus en plus grandes au fur et à mesure que l'onde progresse. Le niveau sonore perçu par un observateur sur l'une de ces sphères sera d'autant plus faible que la surface considérée est grande. Il correspond à la puissance rayonnée par unité de surface. C'est l'**intensité acoustique** (I_a) mesurée en watts/m^2 .

$$I_a = \frac{W}{4\pi r^2} \quad (\text{W/m}^2)$$

où W = puissance acoustique (W),
 $4\pi r^2$ = surface d'une sphère de rayon r (m^2).

L'intensité acoustique est proportionnelle au carré de la pression acoustique, et décroît en première approximation avec l'inverse du carré de la distance à la source.

La vitesse particulière

C'est la vitesse de chaque particule lors de son faible déplacement autour de sa position d'équilibre. Elle s'exprime en mètres/s. Selon la figure 3.1 (temps t_0), on remarque qu'à un maximum de déplacement particulière correspond un maximum de pression (particules rapprochées). À cet instant, avant de revenir à son état d'équilibre, la vitesse particulière est forcément nulle. À l'instant précis où une onde sonore vient frapper une paroi parfaitement réfléchissante, la vitesse est également nulle et la pression est maximale.

À chaque maximum de pression acoustique d'une onde plane correspond une vitesse particulière nulle. La pression sonore est toujours maximale sur les parois réfléchissantes.

Conséquences pratiques :

- un microphone posé sur une paroi réfléchissante de grandes dimensions capte une pression maximale à toutes les fréquences ;
- un microphone proche d'une paroi ne capte une pression maximale qu'aux fréquences basses (grandes longueurs d'onde), car les ondes incidentes et réfléchies restent encore en phase.

L'impédance acoustique

L'impédance acoustique (Z_a) peut être définie comme la résistance que présente le milieu de propagation au déplacement des particules élémentaires. Plus l'impédance est élevée, plus le déplacement des particules est freiné, et plus la vitesse particulaire est faible.

$$Z_a = \frac{p}{v} \quad (\text{Ns m}^{-3})$$

où p = pression acoustique (Pa),
 v = vitesse moléculaire (m/s).

Une paroi réfléchissante est un cas particulier de la notion d'impédance infinie qui entraîne une vitesse particulaire nulle.

3. Caractéristiques d'une source sonore et perception

Hauteur

Définition

L'oreille humaine perçoit, en moyenne, des fréquences qui s'étendent de 20 Hz à 20 000 Hz. À la valeur physique de la fréquence est liée la sensation physiologique de hauteur sonore.

Lorsque l'on multiplie (ou divise) une fréquence par deux, on définit un intervalle appelé « octave » : la différence de hauteur perçue entre 200 Hz et 400 Hz est la même qu'entre 400 Hz et 800 Hz, alors que la différence de fréquences est deux fois plus élevée dans le second intervalle que dans le premier. Cette constatation est surtout valable dans la zone sensible de l'oreille (200-4 000 Hz).

En fait, ce n'est pas la différence fréquentielle qui importe en perception sonore mais le rapport fréquentiel. Il ne faut donc pas soustraire mais diviser les fréquences entre elles. Le rapport est de 2 pour les intervalles ci-dessus. En représentation graphique, les fréquences de même rapport sont toujours équidistantes en abscisse. Il s'agit d'une échelle logarithmique.

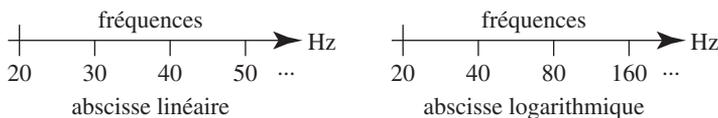


Figure 3.3 – Échelle linéaire et logarithmique.

Sons purs et sons complexes

À chaque signal sonore correspond une forme d'onde particulière qui peut être transposée graphiquement pour illustrer l'évolution de la pression acoustique dans le temps. Un diapason, frappé doucement, génère un son pur sinusoidal composé d'une seule fréquence. Il peut être représenté graphiquement en fonction du temps ou sous forme fréquentielle (composition spectrale).

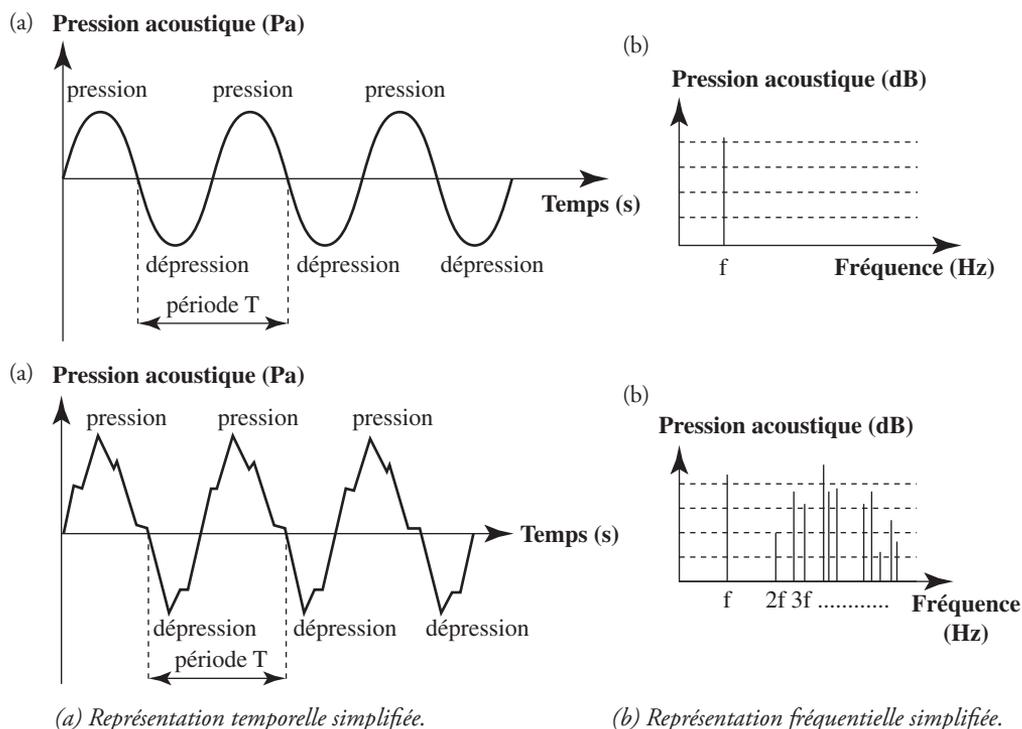


Figure 3.5 – Son de 440 Hz joué au violon.

Tout son complexe périodique peut être décomposé en une somme de sons purs dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence la plus basse f : $2f$, $3f$ (décomposition en série de Fourier) :

- la fréquence la plus basse est la plupart du temps appelée « fondamentale » ou « harmonique 1 » ;
- les fréquences multiples sont appelées « harmoniques » ($2f$, $3f$, $4f$) ou « partiels harmoniques » ;
- les fréquences qui ne font pas partie de la série harmonique ($2,3f$, $3,6f$, $4,7f$) sont appelées « partiels inharmoniques ».

Un signal rectangulaire peut être obtenu par l'addition de fréquences harmoniques impaires ($f, 3f, 5f, 7f$). La figure 3.6 représente la forme du signal obtenu par l'addition des trois premières harmoniques impaires ($f, 3f, 5f$).

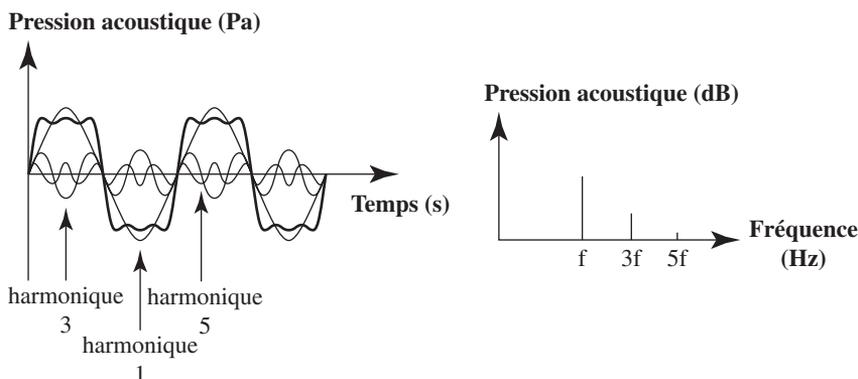


Figure 3.6 – Obtention d'une variation rectangulaire par sommation d'harmoniques impaires.

La figure 3.7, à la page suivante, montre l'étendue en fréquence de plusieurs instruments ainsi que de différentes voix. Ces sources sonores sont des sons complexes dont on a représenté les fondamentales en traits continus et les harmoniques (et partiels) en traits pointillés.

Niveau sonore

Définition

Le plus faible niveau d'un signal de 1 000 Hz perceptible par l'oreille humaine correspond à une intensité acoustique de 10^{-12} W/m^2 soit $1/1\,000\,000\,000\,000 \text{ W/m}^2$. Cette valeur est considérée comme le seuil d'audition. Le plus fort niveau admissible d'un même signal est d'environ 1 W/m^2 . Il correspond au seuil de douleur. Le rapport entre le niveau le plus fort et le niveau le plus faible est la **dynamique**. Elle varie de un à mille milliards !

Au-delà d'un niveau minimal, chaque fois que l'on multiplie l'intensité sonore d'un facteur 10, on perçoit globalement un doublement de la sensation. On obtient ainsi une échelle de 12 niveaux (fig. 3.8). Il s'agit d'une progression logarithmique à base 10 et, comme en perception de hauteur, la sensation (du niveau) sonore est proportionnelle au logarithme de l'excitation (loi de Weber Fechner).

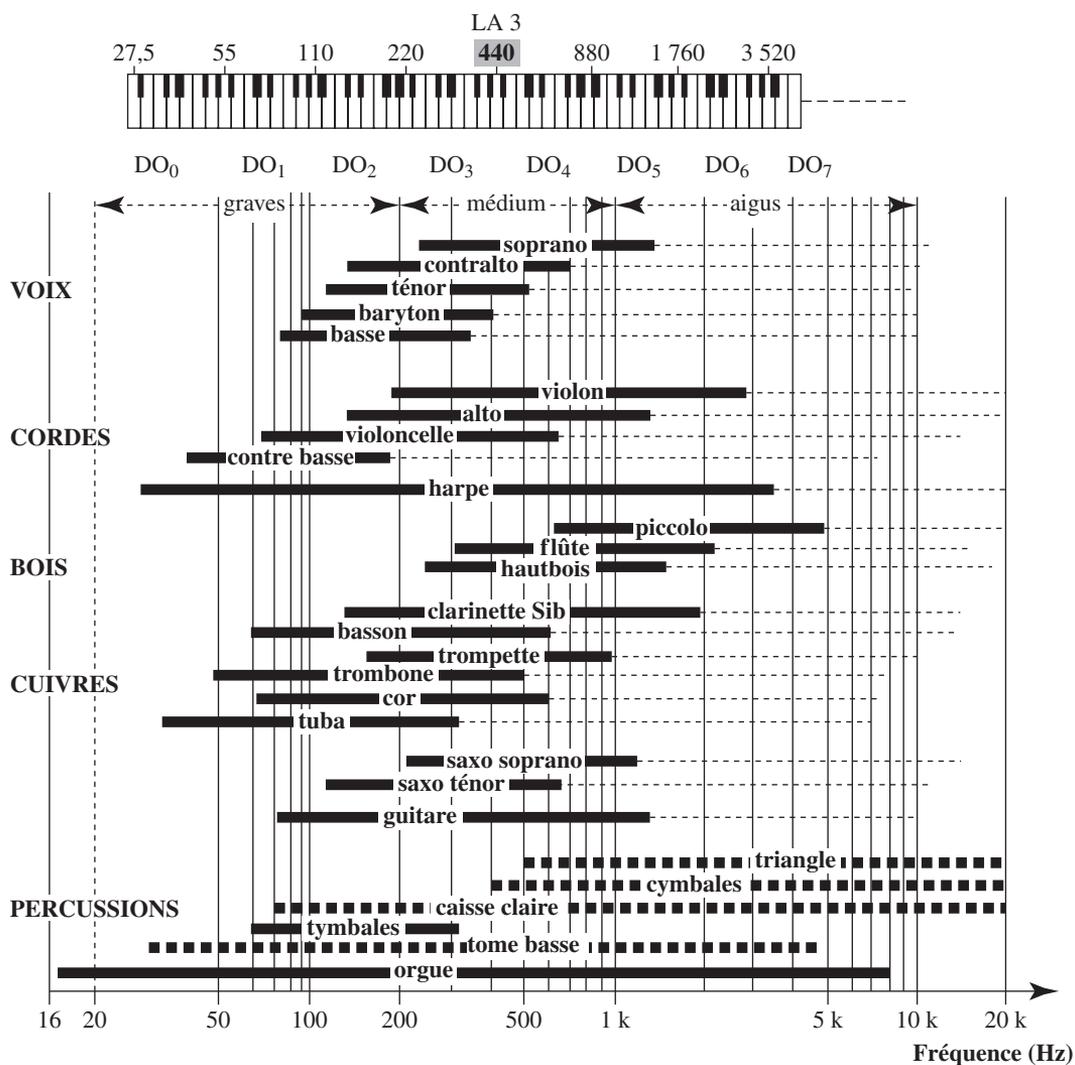


Figure 3.7 – Échelle fréquentielle des instruments de musique et des voix. Traits gras : fondamentales, traits pointillés fins : harmoniques, traits pointillés gras : étendue spectrale sans fondamentale.

L'unité de mesure est le bel avec comme référence l'intensité du seuil d'audibilité, soit 10^{-12} W/m^2 .

$$\text{Niveau} = \log \frac{I}{10^{-12}} \quad (\text{bel})$$

où I = intensité acoustique à mesurer.

Niveau d'intensité acoustique (W/m²) à 1 000 Hz

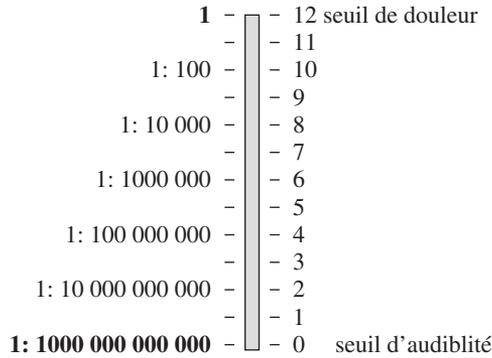


Figure 3.8 – Dynamique de niveau sonore perçue.

À cette échelle en bels, on a préféré une échelle plus fine. En introduisant 10 subdivisions par bel, on obtient donc 120 niveaux appelés « décibels » (dB).

$$\text{Niveau} = 10 \log \frac{I}{10^{-12}} \quad (\text{décibel})$$

L'intensité acoustique étant proportionnelle au carré de la pression, on obtient :

$$\text{Niveau} = 20 \log \frac{P}{2 \times 10^{-5}} \quad (\text{décibel})$$

où 2×10^{-5} Pa = pression acoustique du seuil d'audibilité (voir annexe 1).

Pression acoustique (Pa)	Intensité acoustique (W/m ²)	Niveau (bel)	Niveau (dB)	Appréciation
20	1	12	-120-	intérieur d'une grosse caisse
2	10 ⁻²	10	-100-	tutti d'orchestre
2 × 10 ⁻¹	10 ⁻⁴	8	-80-	cloche à 10 cm
2 × 10 ⁻²	10 ⁻⁶	6	-60-	saxophone à 40 cm
2 × 10 ⁻³	10 ⁻⁸	4	-40-	piano joué pp à 1 m
2 × 10 ⁻⁴	10 ⁻¹⁰	2	-20-	conversation à 1 m
2 × 10 ⁻⁵	10 ⁻¹²	0	-0-	appartement calme
				studio d'enregistrement
				seuil d'audition

Groupings on the right side of the table:

- insupportable (levels 120, 100, 80)
- très fort (level 60)
- fort (level 40)
- faible (level 20)
- très faible (level 0)
- inaudible (level 0)

Figure 3.9 – Correspondance des échelles de niveau et appréciation.

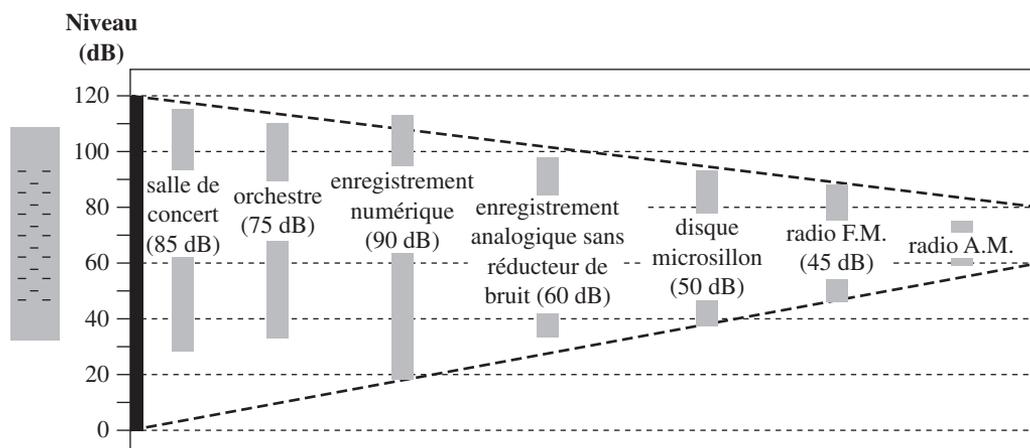


Figure 3.10 – Dynamique comparée de plusieurs sources et supports sonores.

La dynamique de l'audition est de l'ordre de 120 dB. Nous verrons au chapitre 6 que celle d'un microphone peut atteindre 140 dB. Nous avons porté sur la figure 3.10 la dynamique d'un orchestre symphonique, d'un enregistrement numérique, analogique sur bande magnétique et sur disque, d'un émetteur radio FM et AM limité aux niveaux faibles par le bruit de fond et aux niveaux forts par la saturation.

La sensation sonore en fonction de la fréquence

La sensibilité de l'oreille n'est pas la même à toutes les fréquences. Par rapport à une fréquence de 1 000 Hz perçue à un certain niveau, on remarque qu'une même sensation sonore aux fréquences basses et aiguës ne peut être obtenue que si l'on augmente ce même niveau dans des proportions importantes. Les valeurs de niveaux données à 1 000 Hz sont exprimées en phones.

Les courbes d'égal sensation sonore (courbes isosoniques) montrent que pour avoir la même sensation qu'un son de 1 000 Hz à 40 dB, un signal de 50 Hz doit être augmenté à 70 dB. La sensibilité de l'oreille, particulièrement bonne entre 500 et 5 000 Hz, s'atténue donc fortement aux fréquences basses. Elle est plus linéaire aux niveaux élevés : 80 à 100 dB.

Ces courbes présentent des conséquences multiples :

- en musique, un tuyau d'orgue de 30 Hz est pratiquement inaudible, alors qu'à niveau égal, un petit sifflet à 3 000 Hz émet un son perçant. Cela explique qu'une flûte *piccolo* émerge sans difficulté d'un *tutti* d'orchestre ;
- en électro-acoustique, l'effet *loudness* est prévu sur certains amplificateurs afin de renforcer les basses fréquences et les fréquences élevées à faible niveau d'écoute ;

- en mesure de bruit, des filtres sont introduits dans le sonomètre (appareil de mesures de bruits) pour pondérer les mesures : on utilise trois courbes de pondération correspondant à trois zones de niveau sonore :
 - courbe A : inférieure à 55 dB, mesure en dBA,
 - courbe B : de 55 dB à 85 dB, mesure en dB_B,
 - courbe C : supérieure à 85 dB, mesure en dB_C.

Niveau (db)

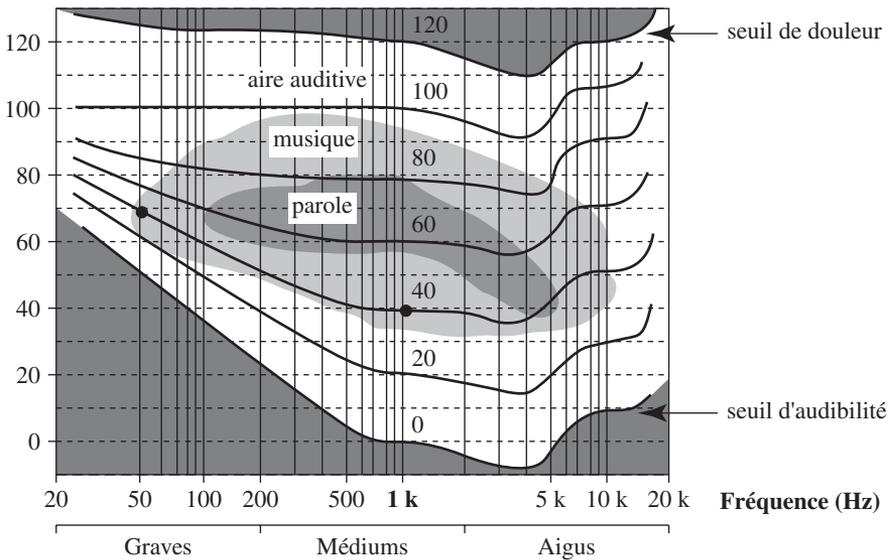


Figure 3.11 – Courbes d'égale sensation sonore (d'après Fletcher et Munson).

Réponse relative (dB)

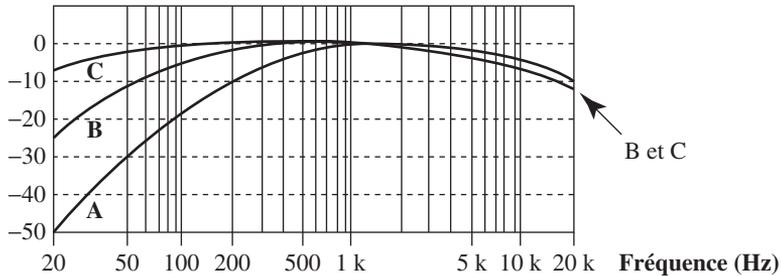


Figure 3.12 – Filtres de pondération.

L'effet de masque

Un bruit, un son peuvent masquer auditivement un autre son présent simultanément dans le même lieu. Un bruit de rue ou de machine oblige deux interlocuteurs à forcer leur voix pour se comprendre. La situation est la même dans une discothèque, en présence d'une sonorisation notamment riche en basses fréquences.

Subjectivement, il y a donc modification du seuil de perception du son masqué en présence du son masquant. Pour le mesurer, on fait entendre à un auditeur placé dans un lieu calme une certaine fréquence dont on note le seuil de perception. On fait entendre ensuite simultanément un son masquant (1 200 Hz dans notre exemple) à un certain niveau, et on augmente le niveau du signal masqué pour qu'il soit à nouveau audible.

La modification du seuil de perception est la différence entre l'ancien niveau de seuil et le nouveau en présence du son masquant. Cette expérimentation, répétée à différentes fréquences, permet d'obtenir les courbes de la figure 3.13 (donnée ici pour un son masquant de 1 200 Hz à 60 et 100 dB). On voit que pour un son masquant de 100 Hz à 100 dB, il faut remonter le niveau du son masqué de 70 dB à la fréquence de 1 600 Hz et de 20 dB à 800 Hz.

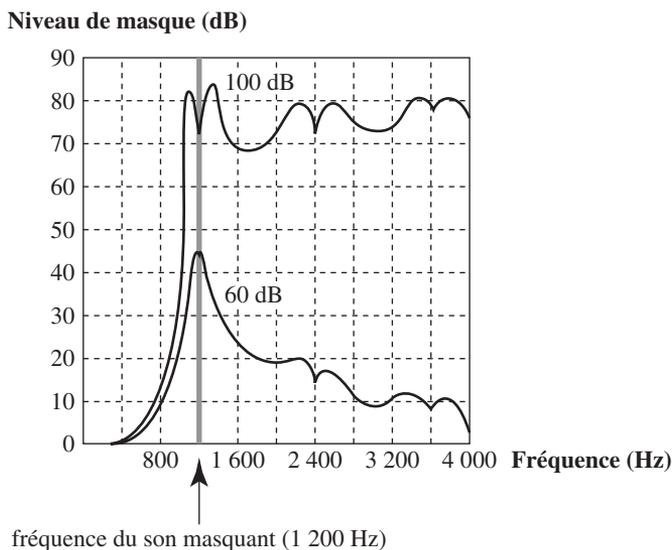


Figure 3.13 – Courbes de masque d'un signal masquant de 1 200 Hz à 60 et 100 dB sur des sons purs (d'après Vogel et Lane).

L'effet de masque est :

- maximal lorsque les fréquences sont voisines ;

- très prononcé pour les fréquences supérieures à la fréquence masquante et peu prononcé pour les fréquences inférieures ;
- d'autant plus important que le son masquant est fort ;
- inexistant si le son masqué a le même niveau que le son masquant.

Compositeurs, arrangeurs et bruiteurs doivent prendre cet effet en considération pour éviter de rendre difficile l'audition d'un soliste entouré d'instruments maladroitement orchestrés, ou d'une annonce couverte par un indicatif.

L'effet de masque est largement utilisé aujourd'hui dans les algorithmes de compression du signal numérique, afin d'éliminer les informations sonores masquées, donc inutiles, et d'augmenter le volume des données tant à l'enregistrement qu'à la diffusion.

Le timbre

Définition

Le timbre est un mélange de diverses fréquences à des intensités différentes. Il permet de distinguer un son parmi d'autres, de même intensité et de même hauteur. Il dépend autant des composantes spectrales que de l'évolution du signal dans le temps.

Composantes spectrales

Le timbre dépend de :

- l'intensité du fondamental et des harmoniques ;
- la présence ou l'absence de certaines harmoniques.

Par exemple, la clarinette, l'accordéon, l'harmonica, certains jeux d'orgues favorisent les harmoniques impaires et le hautbois les harmoniques paires.

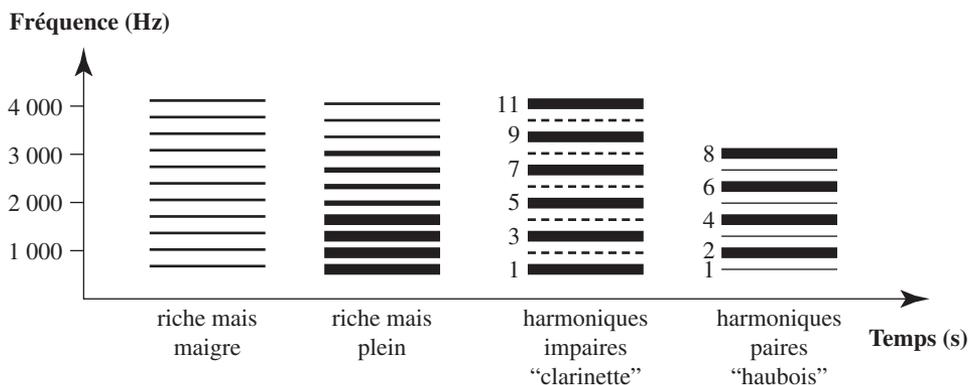


Figure 3.14 – Représentation graphique des raies harmoniques pour quatre timbres différents (selon E. Leipp).

Un spectre de bruit est constitué de composantes quelconques : il n’y a ni harmoniques, ni partiels ; c’est, par exemple, le bruit de l’échappement de l’air comprimé. Deux spectres de bruit nous intéressent particulièrement :

- le **bruit blanc**, à l’instar de la lumière blanche qui est un mélange de toutes les couleurs, est composé de toutes les fréquences, chaque fréquence ayant la même énergie. Le nombre de fréquences doublant d’un octave à l’autre, l’énergie croît linéairement de 3 dB par octave ;
- le **bruit rose** est composé également de toutes les fréquences, mais l’énergie est ici constante pour chaque bande de fréquences.

Ils sont utilisés notamment :

- comme source sonore pour mesurer les performances acoustiques des salles (bruit blanc ou bruit rose) ;
- comme source sonore pour ajuster les enceintes acoustiques aux locaux d’écoute (bruit rose).

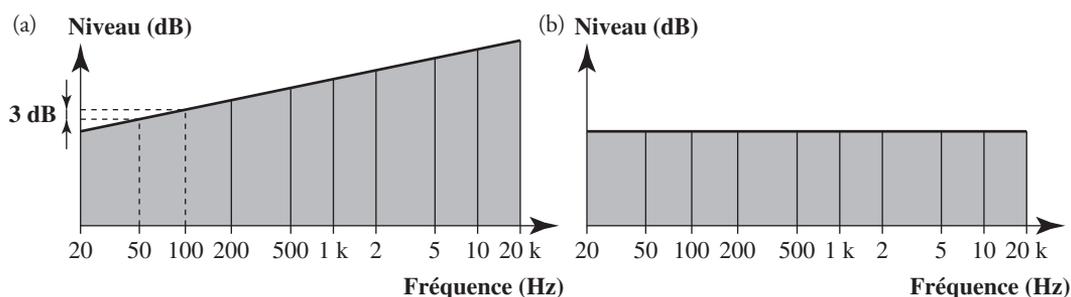


Figure 3.15 – (a) Spectre de bruit blanc. (b) Spectre de bruit rose.

Enveloppe du signal

L’enveloppe dynamique d’un signal sonore est caractérisée par son attaque, son évolution et son extinction ; le rôle de l’attaque est primordial, en particulier dans la formation du timbre.

- Le contenu spectral des transitoires d’**attaque** se rapproche de celui d’un bruit ; la suppression de l’attaque d’un instrument rend difficile sa reconnaissance.
- L’**évolution** participe à l’organisation du son en favorisant et en supprimant certaines harmoniques.
- Le mode d’**extinction** sera influencé par l’acoustique du lieu et en particulier par sa réverbération. Nous en verrons l’importance lors du réglage du taux et de la durée d’une réverbération artificielle (voir chapitre 9).

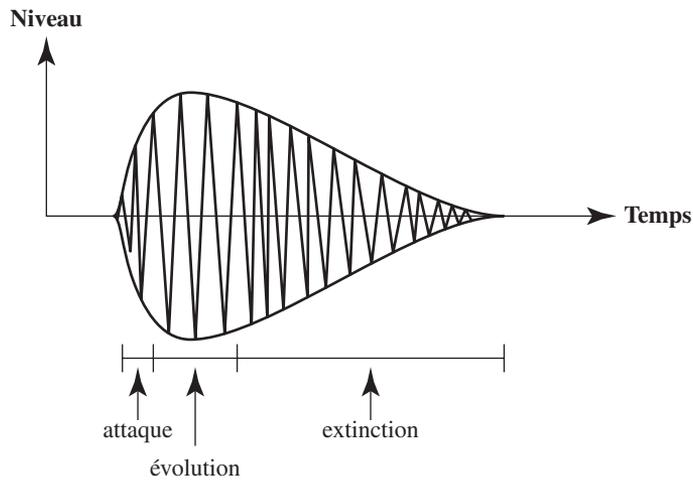


Figure 3.16 – Profil dynamique d'un signal sonore.

L'évolution et l'extinction ne font qu'une dans le cas du piano : dès que le marteau a frappé une corde (attaque), un système d'échappement la laisse vibrer jusqu'à son extinction.

Le quantum acoustique

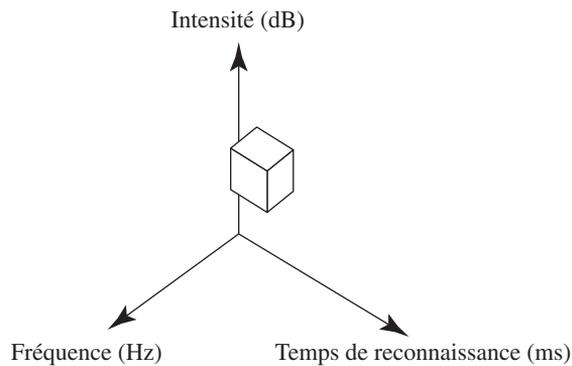


Figure 3.17 – Représentation graphique du quantum acoustique.

Dans son livre *Le Monde sonore sous la loupe*, Fritz Winckel a repris une citation d'Abraham Moles de la représentation du plus petit élément audible par l'oreille humaine, le quantum acoustique. Sa valeur moyenne est donnée par les valeurs suivantes :

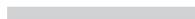
- 2 à 3 dB en intensité ;
- 2 à 3 ‰ en fréquence ;
- 50 ms, durée moyenne de reconnaissance d'un son.

Ce quantum montre les plus petites variations audibles auxquelles il faudrait encore ajouter les notions infinies du timbre et de l'évolution.

4. Directivité des sources sonores

L'énergie rayonnée par une source sonore se répartit différemment dans l'espace. Il se crée des zones de propagation préférentielles dépendant de la fréquence, de la forme et du mode d'émission de la source.

Les zones de répartition énergétique des figures 3.18 à 3.23 ont été obtenues par extrapolation à partir de divers résultats expérimentaux (diagrammes d'Harry Olson et de Jürgen Meyer), et ont une valeur indicative. Les zones de rayonnement hachurées correspondent à une énergie moyenne qui ne chute pas de plus de 3 dB par rapport au niveau maximum de chaque bande de fréquence. Les quatre nuances de gris représentent les bandes de fréquence suivantes. Elles n'indiquent en aucun cas des niveaux sonores de référence.

	200 – 500 Hz
	500 – 1 000 Hz
	1 000 – 2 000 Hz
	2 000 – 4 000 Hz

Les mesures ayant été réalisées en chambre sourde avec des instruments excités par un dispositif électro-acoustique, nous noterons qu'un musicien peut en modifier les résultats par l'effet d'obstacle qu'il représente et par son jeu ; de plus, la chambre sourde supprime toute interaction avec le milieu acoustique : par exemple, l'influence du sol sur la qualité du timbre. Chaque membre d'une même famille d'instruments présente dans les grandes lignes une similitude de rayonnement, au timbre près, et compte tenu de leurs spectres respectifs.