

Précis d'acoustique musicale

Michel Mourey

EMR 18393

- 1) Introduction
- 2) Nature du son et sa modélisation
- 3) oscillateurs et ondes sonores
- 4) Parcours du son
- 5) Caractéristiques de l'oreille humaine
- 6) Caractéristiques d'un instrument de musique
- 7) Correspondance « écriture musicale » / acoustique
- 8) Les gammes (la gamme est la fréquence fondamentale de chaque note dans l'espace de l'octave)
- 9) Les phénomènes sonores dans une salle
- 10) Les 3 commas principaux
- 11) le cycle des quintes et l'armure
- 12) construction des accords



EDITIONS MARC REIFT

Route du Golf 150 • CH-3963 Crans-Montana (Switzerland)

Tel. +41 (0) 27 483 12 00 • Fax +41 (0) 27 483 42 43 • E-Mail : info@reift.ch • www.reift.ch

Sommaire

- 1) Introduction
- 2) Nature du son et sa modélisation
- 3) oscillateurs et ondes sonores
- 4) Parcours du son
- 5) Caractéristiques de l'oreille humaine
- 6) Caractéristiques d'un instrument de musique
- 7) Correspondance « écriture musicale » / acoustique
- 8) Les gammes (la gamme est la fréquence fondamentale de chaque note dans l'espace de l'octave)
- 9) Les phénomènes sonores dans une salle
- 10) Les 3 commas principaux
- 11) le cycle des quintes et l'armure
- 12) construction des accords

1) Introduction

Pour Pythagore (580-497 av JC), la structure de la musique permettrait et suffirait à expliquer la structure de l'univers.

L'ouïe est un sens appartenant à l'un des systèmes nerveux du corps, le système nerveux sensoriel et celui-ci est comme une voie de passage qui relie le fini à l'infini.

La sensation est proportionnelle au logarithme de l'excitation et ce qui est en haut (aigu) est comme ce qui est en bas (grave).

La diversité de manifestation de l'énergie sonore est sans limite. Celle de l'occident a une source et une histoire. Ce document succinct et non exhaustif permet au musicien d'en connaître les grandes lignes afin de faire le lien avec le solfège.

2) Nature du son et sa modélisation

Phénomène/modélisation	effet	Autres caractéristiques
Masse vibrant autour d'une position d'équilibre (anche, corde, colonne d'air)	Son : réponse à une excitation faisant vibrer la masse	Limite humaine du son perçu Le son ne se propage pas dans le vide mais de molécule à molécule sans déplacement de celles-ci (pas de transport de matière) sous forme d'ondes progressives
Son pur (sinusoidal) $X(t) = A \sin(2\pi t/P)$ A est l'amplitude maximum de l'onde sur l'axe vertical Axe horizontal : temps t	P : période (processus qui se répète identique à lui-même après un intervalle de temps appelé période) Fonction $f(t + P) = f(t)$	Pas de table d'harmonie Exemple : diapason à fourche La fréquence exprimée en Hertz (Hz) donne la hauteur du son
$X(t) = A \sin(2\pi t/P)$ $Y(t) = A \sin(2\pi t/2P)$	Notion de fréquence f $f_1 = 1/P$ $f_2 = 1/2P \rightarrow f_1 = 2 f_2$ Si $Y(t) = DO1 \rightarrow X(t) = DO2$ Soit un intervalle d'octave	f_1 et f_2 sont des fréquences fondamentales qui donnent la note de musique (f : nombre de cycles par seconde exprimé en Hertz).

Battement Si f1 peu différent de f2	Fluctuation de l'intensité du son lorsque deux ondes sonores de même intensité interfèrent	Fréquence perçue de la variation périodique de l'intensité : $f = f_2 - f_1$ Exemple : deux diapasons à fourche de 435 Hz et 440 Hz sur une table d'harmonie donnent un battement Le battement sert à accorder les instruments de musique
Résonance acoustique	Etat d'un système vibratoire auquel une source extérieure fournit un apport d'énergie périodique en phase avec lui	Compensation des pertes dues au frottement Exemples : balançoire, diapason sur une boîte de fréquence propre identique
Son complexe harmonique (périodique mais non sinusoïdal)	Son musical Le spectre des harmoniques définit la nature de la source (timbre) Spectre : amplitude fonction de la fréquence pour la fondamentale et chaque harmonique	Fondamentale + harmoniques (multiples entiers de la fréquence fondamentale f) → loi de Fourier Note de musique donnée par la fondamentale
son complexe inharmonique : C'est une superposition de sons purs dont les fréquences n'ont pas de lien entre elles	Il n'y a pas de relation simple entre les fréquences	Pas d'accord possible entre les fréquences
Le bruit : il correspond à une variation « aléatoire » de la pression acoustique	les sons musicaux comportent souvent une composante bruitée et une composante harmonique (exemple : son de saxophone : partie bruitée issue du souffle du musicien) On ne peut pas faire l'unisson d'un bruit	Exemples : Bruit blanc, bruit rose Bruit blanc : densité spectrale constante et énergie par bande d'octave qui croît de 3 dB par octave Bruit rose : énergie par bande d'octave constante et densité spectrale qui décroît de 3 dB par octave
Vitesse du son : V (on parle de célérité c ou de vitesse de phase pour une onde progressive)	Le son ne se propage pas à la même vitesse dans tous les matériaux Toutes les fréquences se propagent à la même vitesse dans le même milieu	$V = 340$ mètres/seconde dans l'air vers 15°C Augmente avec la température et l'hygrométrie $V = 1480$ mètres/seconde dans l'eau
Mouvement relatif source - observateur	Effet Doppler : variation apparente de la fréquence f' perçue par un observateur en mouvement relatif par rapport à la source f. La hauteur du son croît ou décroît suivant que la source s'approche ou s'éloigne	$f' = f(c + V_3) / (c - V_1)$ C : célérité du mouvement vibratoire Mobile source de vitesse propre V1 Mobile récepteur à distance d de vitesse propre V2 Source et récepteur : se rapprochent : V1 et V2 > 0 s'éloignent : V1 ou V2 < 0 la vitesse du son reste constante : $c = \lambda f = \lambda' f'$
Longueur d'onde spatiale λ (lambda) = V / f	Distance parcourue x par l'onde pendant la durée d'une période vibratoire P : $\lambda = V P$ $f(x + \lambda) = f(x)$	Elle dépend du milieu de propagation comme la vitesse du son Seule la fréquence reste inchangée
Intensité sonore ou acoustique I	L'intensité acoustique (sonore) est la puissance par unité de surface exprimée en $Watts / m^2$ $I = P/S$	L'intensité est proportionnelle au carré de l'amplitude A
L'oreille est sensible à des variations de pression (en Pa ou Pascals).	le rapport des pressions acoustiques entre le « premier son » audible et un son douloureux est de 1 million	Amplitude des mouvements des particules dans l'air → Son faible : 10^{-10} m

	soit 10^6 On peut mesurer les deux seuils suivants : seuil d'audibilité $p_0 = 20 \mu Pa$ ou $2 \cdot 10^{-5}$ Pa seuil de douleur $p = 20 Pa$ $p / p_0 = 10^6$	→ Son douloureux : 0,25mm Niveau de pression acoustique (Level) $L_p = 10 \log p^2 / p_0^2$ en dB(A) soit décibel acoustique
--	---	--

→ **Les harmoniques (multiples de la fréquence fondamentale f) sur une corde tendue à tension constante**

Expérience : Sur une corde de longueur L qui résonne à la fréquence f, promenons un chevalet mobile

Fréquence	f	2f	3f	4f	5f	6f	7f	8f	9f
Longueur	L	L/2	L/3	L/4	L/5	L/6	L/7	L/8	L/9

La fréquence d'une corde qui vibre est inversement proportionnelle à sa longueur pour une tension constante

→ **La vitesse de phase (célérité de l'onde)** est la vitesse à laquelle doit se déplacer un observateur pour voir à chaque instant, la vibration dans le même état de phase. L'onde apparaît immobile à l'observateur (un cycle de phase = 360° ou 2π radians)

→ **fréquences fondamentales f et harmoniques nf (cas idéal théorique)**

Fréquence $f = c / \lambda$	f	2f	3f	4f	5f	nf
Tuyau ouvert aux 2 extrémités	$L = \lambda / 2$	$L = \lambda$	$L = 3 \lambda / 2$	$L = 2 \lambda$	$L = 5 \lambda / 2$	$L = n \lambda / 2$
Nœud de pression au niveau de l'ouverture (ventre de vitesse)						
Tuyau ouvert / fermé	$L = \lambda / 4$	néant	$L = 3 \lambda / 4$	néant	$L = 5 \lambda / 4$	Si n impaire $L = n \lambda / 4$
Nœud de pression au niveau de l'ouverture (ventre de vitesse)						Si n paire néant
Ventre de pression au niveau de la fermeture (nœud de vitesse)						
Corde : $f = (1 / 2 L) (T / \pi r^2 \rho)^{1/2}$	$L = \lambda / 2$	$L = \lambda$	$L = 3 \lambda / 2$	$L = 2 \lambda$	$L = 5 \lambda / 2$	$L = n \lambda / 2$
T : tension en newton						
L : longueur de corde en mètres						
r : rayon de la corde en mètres						
ρ : densité de la corde en Kg/m^3						
$c = (T / \pi r^2 \rho)^{1/2}$						

La vibration de l'air dans le tuyau peut donner plusieurs modes (n ventres de vitesse sur la longueur L)

Corde frotée : peu d'harmoniques

Corde pincée : d'autant plus d'harmoniques que la tension et l'écartement de la corde augmentent

Corde frappée : beaucoup d'harmoniques car forte tension

→ seuils d'intensité et de pression

Seuils de l'oreille à 1000 Hz	Puissance acoustique P ou intensité sonore en watts/m ²	Pression p en pascals
d'audibilité	10 ⁻¹²	2 · 10 ⁻⁵
de douleur	1	20

3) oscillateurs et ondes sonores (l'onde peut être positive ou négative contrairement à une particule)

Les différents oscillateurs et ondes	caractéristiques
Oscillateur harmonique	Fréquence fixe et amplitude variable Exemples: pendule, métronome, corde vibrante, ressort A chaque alternance, l'énergie passe de la forme potentielle à la forme cinétique
Compensation de l'amortissement de l'oscillateur harmonique	Compensation par des impulsions injectées en phase avec les oscillations propres de l'oscillateur Exemple : excitation du pendule simple (balançoire) à la même fréquence et en phase
Deux oscillateurs harmoniques de fréquences propres égales fréquences propres : valeurs discrètes définies par la forme, les dimensions du résonateur	Ils interagissent l'un sur l'autre : c'est la résonance entre un exciteur et un résonateur Grâce à la résonance, nous percevons les sons
Oscillations harmoniques forcées	Mouvement d'un système (corps) oscillant soumis à une fréquence d'excitation différente de sa fréquence propre
Oscillateur de relaxation	Fréquence variable et amplitude fixe Oscillations obtenues par augmentation continue d'une contrainte, puis relâchement subit de celle-ci Exemples: compte goutte, archet Oscillations non amorties Accord sur la période de l'oscillateur ou d'un de ses multiples
Onde longitudinale	Exemples : onde sonore, ressort tendu
Onde transversale	Exemples : corde pincée, impact sur surface de l'eau
Onde sinusoïdale	Son pur
Onde progressive	Le son se propage sous forme d'onde progressive de pression à la vitesse (célérité) $V = \lambda \cdot f$ où λ est la longueur d'onde : $f(x, t) = A \sin(\omega t - kx + \alpha)$ nombre d'onde $k = 2\pi / \lambda$
Onde amortie	L'amplitude décroît régulièrement avec le temps mais la fréquence reste constante

Onde entretenue Avec un apport d'énergie, le son musical harmonique peut être entretenu par un oscillateur de relaxation	L'amplitude reste constante avec le temps L'archet permet d'entretenir la vibration (rétention et relâchement de la corde)
Ondes stationnaires	Les phénomènes d'oscillation sont, en tout point, soit en phase, soit en opposition de phase (contrairement aux ondes progressives) Dans un milieu fermé, par exemple sur une corde vibrante (ou tuyau sonore), ou quand une source se trouve entre deux murs parallèles, on observe des zones où le son est fort (ventre de vibration) et des zones où il est très faible (nœud de vibration) $f(x, t) = A \sin(\omega t) \sin(kx)$ avec nœuds et ventres d'amplitude fixes dans l'espace autres milieux affectés : table d'harmonie, surface d'un plan d'eau, volume d'une pièce
Interférence entre deux ondes	$f(x, t) = f_1(x, t) + f_2(x, t)$ exemple : un diapason frappé que l'on fait tourner sur lui-même face à l'oreille

4) Parcours du son

phénomène	caractéristiques
le parcours (traversant plusieurs milieux) choisi est celui qui rend minimal le temps total du parcours	Analogie avec le rayon lumineux
l'affaiblissement à une distance D de la source est plus importante pour les aigus que les graves	Si on place une source contre un mur, on accentue davantage les basses fréquences
L'onde sonore se réfléchit (écho, réverbération)	Si la longueur d'onde << aux dimensions de l'obstacle
L'onde sonore se diffracte au niveau de l'arrête d'un obstacle et crée une source secondaire	quand l'onde rencontre - une ouverture de dimension de la longueur d'onde, il y a déviation de la propagation - un obstacle de dimensions << longueur d'onde, elle contourne celui-ci Exemple : un son grave contourne un pilier alors que les sons aigus sont réfléchis
Il se réfracte (rayon brisé en passant d'un milieu à un autre)	Exemple: Le son monte avec l'air de plus en plus chaud
L'onde peut être absorbée par un matériau	L'onde pénètre dans les cavités du matériau qui dissipe l'énergie. Les fréquences aiguës seront plus atténuées que les graves en fonction de la longueur d'onde et de l'épaisseur de matériau

→ Ondes stationnaires longitudinales

L'équivalent de la corde vibrante est un tuyau sonore (ouvert / ouvert). L'onde incidente et l'onde réfléchie sont entre deux extrémités

Des ondes stationnaires apparaissent dans le tuyau avec des nœuds et des ventres de vibration

Il y a résonance quand la longueur du tuyau vaut (n entier) :

$$L = n \lambda / 2 \quad (\text{tube ouvert / ouvert})$$

$$L = (2n + 1) \lambda / 4 \quad (\text{tube fermé / ouvert})$$

Si la longueur est fixe, les résonances sont obtenues pour des fréquences :

$$f = n c / 2L \quad (\text{tube ouvert / ouvert})$$

$$f = (2n+1) c / 4L \quad (\text{tube fermé / ouvert})$$

5) Caractéristiques de l'oreille humaine

Chez l'homme, la sensation sonore est proportionnelle au logarithme de l'excitation

On parle de rapports de fréquences ou d'intensités et non de différences

sensation	caractéristiques
intensité acoustique ou sonore en watts par m ²	L'oreille humaine peut capter des variations de pression acoustique comprise entre 0,00000000001 watts/m ² (seuil d'audibilité) et 1 watts/m ² (seuil de la douleur).
Le rapport entre les deux valeurs (seuil d'audibilité, seuil de la douleur) est de : 1 / mille milliards soit 10 ⁻¹² L échelle est inutilisable: Le décibel (dB) permet d'adapter l'unité acoustique à la sensation humaine (unité internationale) Le décibel (soit un dixième de Bel) donne un niveau sonore = 10 log (I / 10 ⁻¹²) avec I = Intensité acoustique à mesurer	A chaque intensité acoustique (Watts / m ²) correspond un niveau en décibel (dB) l'intensité d'un son correspond à son niveau sonore exprimé en décibels (unité que l'on doit à Alexander Graham Bell (1847-1922)). Le seuil d'audition de notre oreille se situe à 0 dB, le seuil de douleur aux alentours de 120 dB. Le seuil différentiel de perception du niveau sonore est d'environ 1 dB où P/Po ~1,25 avec P en watts / m ²
D'un point de vue « perceptif », on parlera de niveau sonore en utilisant le décibel Pour avoir la sensation (tests d'écoute) qu'un son est deux fois plus « fort », il faut augmenter son niveau de 10 décibels (dans un orchestre de 10 violons, pour que le son paraisse deux fois plus fort, il faut 100 violons) Lorsqu'on double la distance par rapport à la source on perd 6 dB	Décibel (dB) = 10 log (I/Io) Io étant la référence de puissance (seuil d'audibilité) Ou 20 log (p/po) p : niveau de pression en pascal (newton / m ²) po : pression atmosphérique = 1,013 10 ⁵ pascals Niveau de pression acoustique (Level) Lp = 10log p ² / po ² en dB(A) soit décibel acoustique Si un son S donne 50 dB, 2 sons identiques à S donnent 53 dB, 4 donnent 56 dB, 10 donnent 60 dB
De combien semble être plus fort le son audible le plus fort (120dB) que le bruit de fond d'une ambiance calme (30dB) ?	120 - 30 = 90 dB soit (9 x 10) dB Soit un son 9 fois doublé en sensation, c'est-à-dire 2 ⁹ = 512 fois plus fort et non pas 4 fois comme cela serait le cas si la sensation était proportionnelle au niveau en dB

Addition de deux sources sonores décorrélées 40 dB et 40 dB ? 40 dB et 140 dB ?	43 dB 140 dB (effet de masque)
La sensation auditive double (le son paraît deux fois plus fort) quand on augmente le niveau de 10 dB	En augmentant le niveau de la source de 10 dB En divisant la distance à la source par 3
Le phone Les phones sont les dB à 1000 Hz la fréquence de référence est de 1000 Hz (meilleure écoute moyenne en fréquence)	Aux limites du champ d'audibilité, la sensibilité de l'oreille décroît A 1000 Hz: 40 dB = 40 phones 20 phones sont obtenus par un son de 60 dB à 50 Hz ou un son de 80 dB à 4000 Hz
L'isophonie (égale sensation sonore) est fonction de la fréquence La sensation de niveau (appelée sonie) est une sensation égale à celle du niveau du son de référence de 1000 Hz Le sone : 1 sone est le niveau subjectif d'un son de 1000 Hz qui possède un niveau physique de 40 dB 1 sone = 40 phones à 40dB	une courbe isophonique correspond à l'intensité pour laquelle toutes les fréquences audibles provoquent une sensation de niveau (sonie) égale à celle du niveau du son de référence de 1000 Hz 1 sone est le niveau subjectif d'un son de 1000Hz qui possède un niveau physique de 40 dB Un son de 4 sones est deux fois plus fort qu'un son de 2 sones
L'ouïe perçoit (variable selon les individus) les sons	Entre 16 et 20000 Hz (bande passante) soit environ 10 octaves : 2 ¹⁰ (f2/f1 = 2 = 1 octave) Entre 0 et 120 dB (dynamique entre seuils de perception et de douleur)
L'ouïe distingue les rapports R en (discrimination = rapport minimum reconnaissable)	De fréquences : R = f ₂ / f ₁ f ₂ / f ₁ (intervalle en savart = 1000 log f ₂ / f ₁) : discrimination = 2 savarts (R = 1,005) soit - 300000 hauteurs différentes possibles sur la bande passante 16 - 20000 Hz ou 150 notes monochromatiques sur une octave (gamme tempérée) voir également le cent D'intensités : R = I ₂ / I ₁ intensités I ₂ / I ₁ (niveau en décibel = 10 log I ₂ / I ₁ avec I ₁ comme référence) : discrimination = 1dB (R= 1,25) est insensible aux phases (conditions normales)
La sensation de hauteur est une perception différentielle en fréquence, mais quelle est sa précision ? le plus petit intervalle perceptible en fréquence se situe à 1000Hz Δ f = 0,003 x 1000 = 3 Hz	Le seuil Δ f / f = 0,003 est quasiment constant pour les fréquences entre 200 et 5000 Hz Cette valeur qui paraît « grande » peut être comparée à l'intervalle musical du demi-ton pour avoir une meilleure appréciation de cet intervalle L'écart fréquentiel entre deux demi-tons aux alentours de 1000 Hz est : 1000 (2 ^{1/12} - 1) = 59 Hz soit plus de 19 fois l'intervalle perceptible
Le conduit auditif de l'oreille est identique à un tube acoustique ouvert/fermé (par le tympan). Pour un adulte, la longueur moyenne du conduit est de 2,7 cm, trouvons les fréquences de résonance naturelle de l'oreille	f _n = (2n + 1) V / 4L correspondant à la sensibilité maximale de l'oreille V=340 m/s n=0 F ₀ = 3148 Hz n=1 F ₁ = 9444 Hz n=2 F ₂ = 15740 Hz

Temps d'intégration de l'oreille Il est d'environ de 50 millisecondes au mieux en moyenne. Il peut varier de 50 à 100 millisecondes en fonction de l'intensité. Le seuil de reconnaissance d'une hauteur est de l'ordre du centième de seconde. Plus brève, elle devient un claquement	exemple : un écho est franc s'il parvient plus de 50 ms après le son direct soit $t = 2d / c > 50 \text{ ms}$ d'où $d > 8,5 \text{ m}$
---	---

→ **Intensité d'un son**

C'est la quantité d'énergie transportée par l'onde par unité de temps à travers l'unité d'aire d'une surface normale (perpendiculaire) au sens de propagation de l'onde (exprimée en watts par m²)

L'intensité acoustique caractérise l'ampleur de la sensation sonore produite par le son. Elle dépend de la distance d à la source et de la fréquence f du son (les fréquences graves se propagent plus loin que les fréquences aiguës)

Pour une même fréquence f, elle est approximativement inversement proportionnelle au carré de la distance d à la source (k : coefficient de proportionnalité)

$$I = k_1 \omega^2 / 2 d^2 = k_1 (2\pi f)^2 / 2 d^2 = k f^2 / d^2 \quad \text{avec} \quad \omega = 2\pi f \quad \text{pulsation physique}$$

Pour un son direct

$$P = p^2 / \rho_0 c \quad (\text{célérité du son } c = 340 \text{ m/s} - \text{masse volumique de l'air } \rho_0 \approx 1,2 \text{ Kg/m}^3)$$

$$P = k p^2$$

$$k \approx 2,5 \cdot 10^{-3} = 1 / 400$$

	Puissance P en watts / m ²	Pression p en pascals
Mesure du son en décibels (dB)	$10 \log_{10} (P / 10^{-12})$	$20 \log_{10} (p / 2 \cdot 10^{-5})$
Dynamique de l'ouïe mesurée en dB (max – mini)	$10 \log_{10} (1 / 10^{-12}) = 120$	$20 \log_{10} (20 / 2 \cdot 10^{-5}) = 120$

Échelle des niveaux sonores en dB (décibel)

Intensité acoustique	$10 \log (I / I_0)$	Niveau en décibel
Seuil de douleur : 1 W/m^2	$10 \log (10^{12})$	120 dB
	$10 \log (10^{10})$	100 dB
	$10 \log (10^x)$	10 X dB
	$10 \log (10^3)$	30 dB
	$10 \log (2) = 10 \log (10^{0,3})$	3 dB
Seuil d'audibilité : $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$	$10 \log (1) = 10 \log (10^0)$	0 dB

Effet de masque : lorsqu'il y a 10 dB d'écart entre 2 sources sonores, on ne perçoit que la source qui a le plus fort niveau

Le rapport signal/bruit P_s/P_b (exprimé en dB) est un des éléments fondamentaux permettant l'utilisation et la transmission de l'information

Emergence : pour qu'une source soit perçue nettement dans une ambiance bruyante, son niveau doit être supérieur d'au moins 15 dB au niveau du bruit de fond

- Doubler la puissance correspond à un gain de 3 dB
- Quadrupler la puissance correspond à un gain de 6 dB
- Multiplier la puissance par 10 correspond à un gain de 10 dB (60 chanteurs donneront un niveau perçu 2 fois plus fort que 6 chanteurs – idem entre 100 violons et 10 violons)
- Multiplier la puissance par 100 correspond à un gain de 20 dB
- Un gain de 10dB (A=10) est la somme de 7dB (A=5,01) + 3dB (A=2) et correspond au produit 5,01x2

Orchestre symphonique : compris entre 60 dB et 90 dB (6 niveaux perceptibles à 5 dB près : pianissimo, piano, mezzo piano, mezzo forte, forte, fortissimo)

- Lorsque deux sources produisent des sons en un point, ce sont les intensités acoustiques (ou les carrés des pressions acoustiques) qui s'ajoutent et non pas les niveaux sonores en décibels.

Pour la première source, $LI1 = 10 \log (I1/I_0)$.

Pour la deuxième, $LI2 = 10 \log (I2/I_0)$.

Le niveau d'intensité acoustique résultant du fonctionnement des deux sources est

$$LI = 10 \log ((I1+I2)/I_0)$$

- Si les deux sources produisent la même intensité $I1 = I2$

$$LI = 10 \log (2 I1 / I_0) = LI1 + 10 \log 2$$

$$\text{Soit } LI1 + 3 \text{ dB} \quad (\text{ex : } 60\text{dB} + 60\text{dB} \rightarrow 63\text{dB})$$

Cet exemple montre l'importance de 3 dB.

Un écart de 3 dB, correspond à deux sons dont l'un a deux fois plus d'énergie que l'autre

Exemples

R (dB) = 10 log (I1 / I2)	I1/I2	A1/A2	R (dB) = 20 log (A1 / A2)
12dB	16	4	12dB
10dB	10	$10^{1/2}$	10dB
6dB	4	2	6dB
3dB	2	$2^{1/2}$	3dB
0dB	1	1	0dB
-3dB	1/2	$1/2^{1/2}$	-3dB
-6 dB	1/4	1/2	-6 dB
-10dB	1/10	$1/10^{1/2}$	-10dB
-12 dB	1/16	1/4	-12 dB

Atténuation du son

Atténuation géométrique

Niveau en dB à la distance r d'une source (puissance P en watts par m²) située contre une paroi, répartie sur une demi-sphère de rayon r avec une atténuation géométrique

$$\text{Puissance sur un axe} = 2P / 4\pi r^2$$

Différence de niveau entre deux points d'écoute

$$I(r_1) - I(r_2) = 10 \log(P / 4\pi r_1^2 10^{-12}) - 10 \log(P / 4\pi r_2^2 10^{-12}) = 20 \log(r_2 / r_1)$$

- Pour que le son paraisse deux fois plus fort (10 dB d'augmentation) :

$$20 \log(r_2 / r_1) = 10$$

$$r_2 / r_1 = 10^{1/2} \approx 3$$

il faut diviser la distance par 3 par rapport à la source

- Pour doubler la sensation sonore sans bouger

$$10 \log(P / 4\pi r_1^2 10^{-12}) = 10 \log(P_2 / 4\pi r_1^2 10^{-12}) + 10 \text{ dB}$$

$$10 \log(P / P_2) = 10 \text{ dB}$$

$$P / P_2 = 10$$

il faut multiplier par 10 la puissance P de la source

- décroissance du niveau avec la distance

Distance r (m)	2	5	10	20	30	40	50
I(r) - I(1m) (dB)	-6	-14	-20	-26	-29,5	-32	-34

Atténuation par dissipation : La dissipation se fait par frottement des molécules l'une sur l'autre. Elle est proportionnelle au carré de la fréquence

→ Sensibilité auditive en fonction de la fréquence : Caractéristiques physiologiques du son

Courbes d'iso sonie de Fletcher et Munson : I (en dB) fonction de la fréquence

Mesure conventionnelle de l'impression auditive : le phone caractérise un niveau auditif égal au niveau de pression acoustique exprimé en dB, d'un son à 1000 Hz, provoquant la même réaction auditive

Si I₁ correspond à un niveau de 60 phones donné par un instrument de musique, le niveau produit par 100 instruments identiques jouant simultanément sera égal à 80 phones soit 20 sones

Par expérience on montre que la sensation auditive double chaque fois que le niveau sonore augmente de 10 dB

Il n'est pas possible d'additionner les phones de deux sons de fréquences différentes. Pour ce faire, on utilise une unité : le sone. L'échelle en sonnes est construite de manière à ce qu'un son de 2n sonnes soit deux fois plus fort qu'un son de n sonnes

100 instruments donneront un niveau de sonie 4 fois plus fort seulement qu'un seul

$$\text{Relations entre la sonie et le niveau d'iso sonie } S = 2^{(ph - 40)/10} \quad \log_{10} S = 0,03 (ph - 40)$$

Niveau d'iso sonie (phones)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Sonie (sones)	0,125	0,250	0,500	1	2	4	8	16	32	64	128	256

$$\text{Exemple : } S = 2^{(100 - 40)/10} = 64$$

L'accord d'un instrument se fait sur les notes fondamentales f et les partiels : c'est un compromis

→ Echelle des sons

Fréquence (hauteur)	< 16 Hz	16 Hz → 20000 Hz	20000 Hz → 10 ¹³ Hz
Longueur d'onde (c = 340 m/s)	> 21,25 m	0,017 m → 21,25 m	< 0,017 m
Pour l'homme	infrasons	Sons audibles	ultrasons

→ Le cent

1 cent = 4 savarts

La valeur de l'octave qui est de 4 × 301,03 = 1 204,12 cents, a été arrondie à 1 200 cents.

$$1 \text{ cent} = 2^{1/1200} = 1,000 577 79$$

La valeur y en cents du rapport R = f₂ / f₁ est y = 1 200 log₂ R, ou y = 3 986 log₁₀ R

Le rapport R correspondant à y cents est R = 2^{y/1200}, ou R = 10^{y/3986,314}

Exprimé, en cents, les intervalles du tempérament égal sont, en valeur exacte, des nombres entiers :

1 demi-ton = 100 cents

1 ton = 200 cents

tierce majeure (4 demi-tons) = 400 cents

quarte (= 5 demi-tons) = 500 cents

quinte (7 demi-tons) = 700 cents

1 cent = 1/100 de demi-ton de tempérament égal

6) Caractéristiques d'un instrument de musique

caractéristiques	Notions correspondantes
Le timbre permet de différencier la sonorité entre deux instruments	Les harmoniques des deux instruments ont des amplitudes différentes Les spectres (amplitude fonction de la fréquence) ne coïncident pas
Source musicale + bruit ambiant	La source sera clairement perçue si son niveau est supérieur au minimum de 15 dB du bruit de fond

Notion d'accord	Si les sons produits sont harmoniques, on peut parler de consonance : il y a absence de battements entre les différentes harmoniques des sons Pratiquement, il est impossible d'obtenir une absence de battements. La notion de consonance semble donc en définitive liée à l'absence ou à la lenteur des battements entre les différents sons Une octave, une quinte juste sont consonantes parce que leurs spectres se fondent partiellement l'un dans l'autre, c'est-à-dire qu'ils ont des harmoniques en commun
Superposition de n sons identiques (de même intensité $I_1 = 10 \log_{10} E_1$ et de même hauteur)	avec $E_1 = P_1 / 10^{-12}$ le son résultant aura la même hauteur et une intensité $I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n$ $I_{total} = 10 \log_{10} n E_1 = I_1 + 10 \log_{10} n$ (loi logarithmique de Weber-Fechner) Si on divise la puissance du son par 2, on a un affaiblissement de - 3 dB
Tolérance sur la discrimination différentielle de la hauteur sur une gamme tempérée	Jusqu'à 8 savarts ($f / f_0 - 1,019$) pour la justesse de l'instrument
La table d'harmonie ?	→ une corde vibrante rayonne très peu d'énergie car sa surface est trop petite pour mettre l'air en mouvement dans la famille des instruments à cordes, le rôle des cordes est de mettre en vibration la table d'harmonie de l'instrument via le chevalet dont la surface d'émission est fonction des longueurs d'onde utilisées
Puissance sonore (niveau en dB) La dynamique d'émission (son le plus faible → son le plus fort)	caractéristique intrinsèque à chaque instrument de musique, et, par extension, à chaque partition musicale Variation maximum de l'intensité émise, du grave à l'aigu
Les 4 étapes d'un son musical dans le temps (enveloppe)	<ul style="list-style-type: none"> - Attaque - Diminution - Stabilité - Extinction progressive
La nature du matériau (densité, rigidité, résistance) n'agit que sur le timbre	L'instrument vibre grâce à l'excitateur et émet un son audible grâce au résonateur (caisse, tube)
La tessiture (fréquence la plus petite → fréquence la plus grande)	La longueur d'onde sur la tessiture influe sur les dimensions du résonateur
Influence de la température	La fréquence diminue avec la température pour une corde et augmente pour un vent

→ Superposition de n sons identiques

Nombre de sons n	Puissance résultante	Intensité résultante en dB
1	X 1	I_1
2	X 2	$I_2 = I_1 + 3$ (gain de 3 dB)
10	X 10	$I_{10} = I_1 + 10$ (gain de 10 dB)
100	X 100	$I_{100} = I_1 + 20$ (gain de 20 dB)
1000	X 1000	$I_{1000} = I_1 + 30$ (gain de 30 dB)

→ Choix des matériaux (table d'harmonie, résonateur)

Le timbre, l'intensité et la durée du son obtenu dépendent du volume, de la forme et du matériau utilisé pour faire la caisse de résonance. Pour que chaque corde génère un son d'un niveau égal à celui des autres avec une même force appliquée, les fréquences de résonance de la caisse de résonance doivent coïncider avec les fréquences fondamentales des cordes. Certaines pièces à l'intérieur de la caisse transmettent les vibrations à un niveau optimal (âme, barrage)

7) Correspondance « écriture musicale » / acoustique

« Ecriture musicale »	« acoustique »	
Note (do, ré, ...)	Fréquence fondamentale f	Nombre de cycles par seconde exprimé en Hertz Hz
La3	Fréquence de référence internationale	f = 440 Hz
Harmoniques d'une note	Fréquences 2f, 3f, 4f, 5f, 6f, ...	Multiples de la fréquence fondamentale
grave	Fréquence f faible	La1 plus grave que le la2
aigu	Fréquence f élevée	Do3 plus aigu que le do2
Intervalle entre 2 notes	Rapport f2 / f1	
octave	Rapport f2 / f1 = 2	
Quinte juste	Rapport f2 / f1 = 3 / 2	
Quarte juste	Rapport f2 / f1 = 4 / 3	
Tierce majeure juste	Rapport f2 / f1 = 5 / 4	
Tierce mineure juste	Rapport f2 / f1 = 6 / 5	
Demi-ton tempéré	Rapport f2 / f1 = racine douzième de 2	
gamme	Fréquences utilisées sur une octave	
Gamme tempérée	12 demi-tons égaux sur une octave	Exemple : piano, guitare
Cycle des octaves	f, 2f, 4f, 8f, 16f, 32f, ...	On multiplie les fréquences par 2
Cycle des quintes	f, 3f / 2, 9f / 4, 27f / 8, 81f / 16, ...	On multiplie les fréquences par 3 / 2
Corde à tension constante ou tuyau sonore	Oscillation harmonique	Fréquence constante et intensité variable La longueur est inversement proportionnelle à la fréquence
archet	Oscillation de relaxation	Fréquence variable et intensité fixe
Intensité du son (piano, fortissimo, ...)	Niveau sonore	Exprimé en décibels (dB) 0 dB = limite de perception 120 dB = seuil de douleur
Résonance (unisson)	f2 = f1	
battement	f2 proche de f1	Ecoute de f = f2 - f1
métronomie	pulsation	Écoulement du temps toutes les x secondes
note fixe	f = constante	Exemple : piano