

# 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](mailto:info@reift.ch) • [www.reift.ch](http://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 (sinusoïdal) $X(t) = A \sin(2\pi t/P)$ A est l'amplitude maximum de l'onde sur l'axe vertical Axe horizontal : temps t	<b>P : période</b> (processus qui se répète identique à lui-même après un intervalle de temps appelé <b>période</b> ) <b>Fonction <math>f(t + P) = f(t)</math></b>	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 $\lambda$ (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 <i>Watts / m<sup>2</sup></i> $I = P/S$	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 $p_0 = 20\mu\text{Pa}$ ou $2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$ seuil de douleur $p = 20\text{Pa}$ $p/p_0 = 10^6$	→ 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 =  $360^\circ$  ou  $2\pi$  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 Nœud de pression au niveau de l'ouverture (ventre de vitesse)	$L = \lambda / 2$	$L = \lambda$	$L = 3 \lambda / 2$	$L = 2 \lambda$	$L = 5 \lambda / 2$	$L = n \lambda / 2$
Tuyau ouvert / fermé Nœud de pression au niveau de l'ouverture (ventre de vitesse) Ventre de pression au niveau de la fermeture (nœud de vitesse)	$L = \lambda / 4$	néant	$L = 3 \lambda / 4$	néant	$L = 5 \lambda / 4$	Si n impaire $L = n \lambda / 4$ Si n paire néant
Corde : $f = (1 / 2L) (T / \pi r^2 \rho)^{1/2}$ T : tension en newton L : longueur de corde en mètres r : rayon de la corde en mètres $\rho$ : densité de la corde en $\text{Kg/m}^3$ $c = (T / \pi r^2 \rho)^{1/2}$	$L = \lambda / 2$	$L = \lambda$	$L = 3 \lambda / 2$	$L = 2 \lambda$	$L = 5 \lambda / 2$	$L = n \lambda / 2$

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 <sup>2</sup>	Pression p en pascals
d'audibilité	10 <sup>-12</sup>	2 · 10 <sup>-5</sup>
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) $V = \lambda f$ où $\lambda$ 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) $f(x, t) = A \sin(\omega t) \sin(k x)$ 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 $\ll$ aux dimensions de l'obstacle
L'onde sonore se diffracte au niveau de l'arrêt 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 $\ll$ 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 l'épaisseur de matériau

#### → Ondes stationnaires longitudinales

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