

# I Notions d'acoustique musicale

## Sommaire :

- I - Le son : nature, production
- II - Caractéristiques physiques du son : amplitude, enveloppe, forme d'onde, fréquence, notions de psychoacoustique, vitesse du son, timbre et spectre
- III - Principes de production des sons dans un instrument
- IV - Tuyaux sonores
- V - Cordes vibrantes

*Les observations historiques, l'étude des sources iconographiques et le catalogage des instruments sont divers aspects de l'organologie. L'acoustique permet d'expliquer le fonctionnement des instruments. Elle apporte des informations objectives – car de type scientifique – et permet ainsi d'obtenir une meilleure connaissance des instruments de musique. Cette connaissance est indispensable pour la fabrication ou la restauration des instruments.*

*Ces notions techniques nous seront aussi fort utiles lorsque nous aborderons les instruments électroniques.*

## I- Le son : nature, production.

### 1) Définitions.

Quand les vibrations de l'air atteignent notre tympan, elles sont interprétées par notre cerveau et deviennent des sons.

Le son, c'est à la fois :

- la sensation que perçoit l'oreille
- et le phénomène physique qui le produit.

L'acoustique est une science, la musique est un art. Ce cours va essayer d'établir des liens entre ces 2 disciplines qui parlent de la même chose.

---

## 2) Phénomène vibratoire.

Un son est formé d'ondes sonores ou de vibrations microscopiques qui se propagent dans un milieu élastique : l'air.

Le son est une forme d'énergie produite par une source vibrante. C'est une perturbation **microscopique** ordonnée des molécules.

Dans le vide, il n'y a pas de propagation sonore, puisque c'est l'élasticité du milieu qui permet au son d'exister et de se propager.

# II- Caractéristiques physiques du son.

## 1) Vocabulaire.

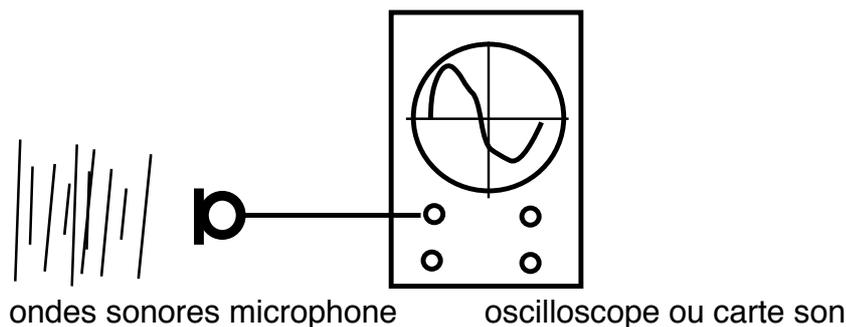
Les phénomènes sonores peuvent être très divers, comme on peut en juger par la palette sonore audible. Il faut être à même de caractériser les sons afin de les classer, de les comparer ou simplement d'en parler. Nous allons définir le vocabulaire utilisé par les scientifiques et leur correspondance avec le vocabulaire musical.

*Les critères scientifiques que nous allons définir sont trop complexes pour les musiciens, qui utilisent eux une notation symbolique : portée, notes, ...*

*Le musicien parle de hauteur, intensité, timbre, durée, espace, ...*

Notation musicale Notation symbolique Abstraction intellectuelle	Notation scientifique Grandeurs physiques, le plus proche possible de la réalité
hauteur 	Fréquence, période
durée tempo et 	Durée en s
intensité <i>pp p mf f ff</i> <input type="checkbox"/>	Amplitude en dB
timbre cello, flûte, piano indications de jeu	Forme d'onde Spectre
espace	Près - loin, droite – gauche, haut – bas, sec – réverbérant, dehors - dedans

## 2) Visualisation des ondes sonores, représentation graphique d'un son.



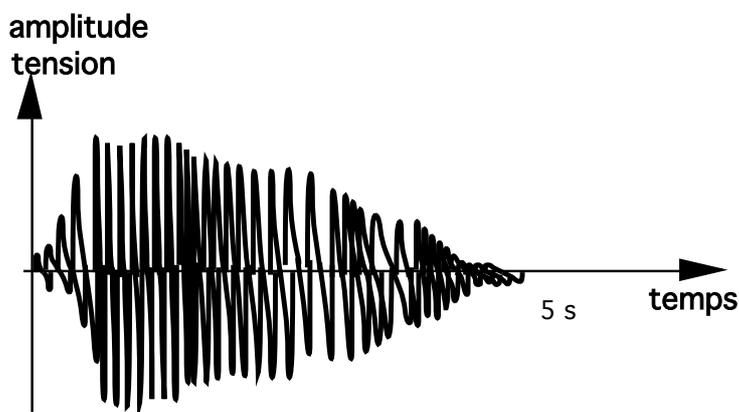
**Figure 1 : Capture et visualisation des ondes sonores**

Un oscilloscope permet de visualiser cette onde sonore, transformée en onde électrique par un microphone.

Les ordinateurs sont aujourd'hui tous dotés d'une carte son qui permet d'enregistrer, de numériser du son et de le stocker dans un fichier sur le disque dur. Des logiciels de montage audionumérique permettent facilement de visualiser les sons.

Note : cette visualisation est très précise. Elle ne peut toutefois être considérée comme un outil de mesure scientifique (notamment à cause des conditions de mesures)

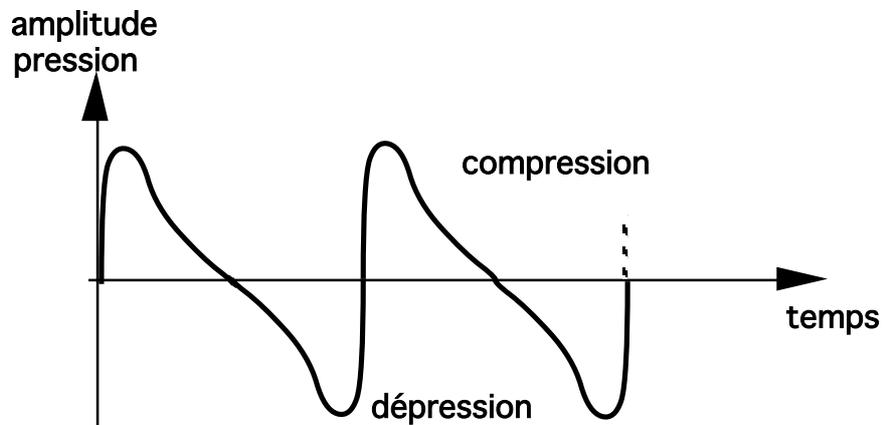
(voir photocopie : 3 notes de piano)



**Figure 2 : Forme d'onde ou représentation graphique d'un son  
(amplitude en fonction du temps)  
vue d'ensemble du son sur une durée de 5 secondes**

### 3) La forme d'onde.

L'allure des variations de pression en fonction du temps s'appelle la **forme d'onde**.  
ou encore évolution de l'amplitude dans le temps.



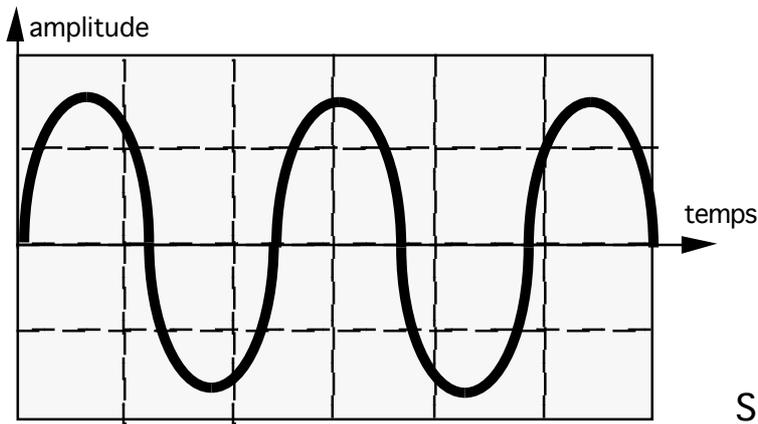
**Figure 3 : forme d'onde d'un signal sonore quelconque.  
Un son musical a en général une forme d'onde périodique.  
Un bruit a une forme d'onde complexe (non périodique).  
vue microscopique du son sur une durée de quelques millisecondes**

Au dessus de l'axe, il y a compression des molécules,  
en dessous raréfaction ou dépression.

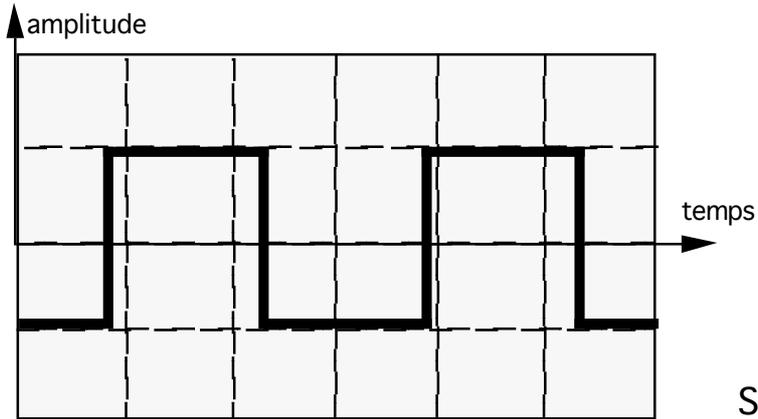
**La forme d'onde à une grande influence sur l'effet auditif perçu.**

La forme d'onde détermine le timbre.

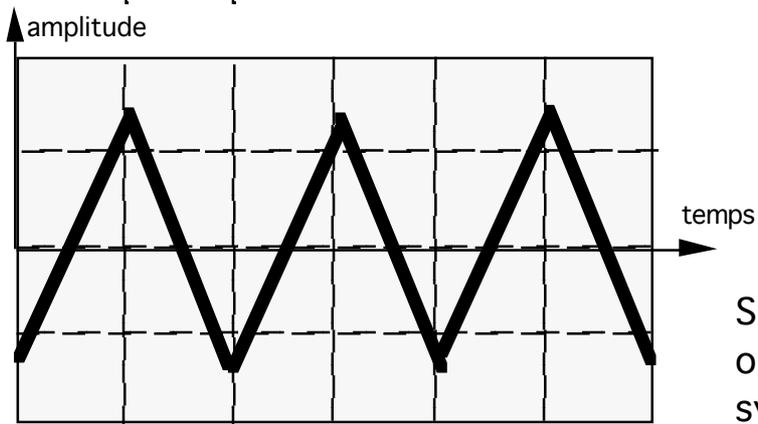
on distingue 2 niveaux :    macroscopique : la note de musique (fig. 2)  
  microscopique : vibration physique des molécules (fig. 3)



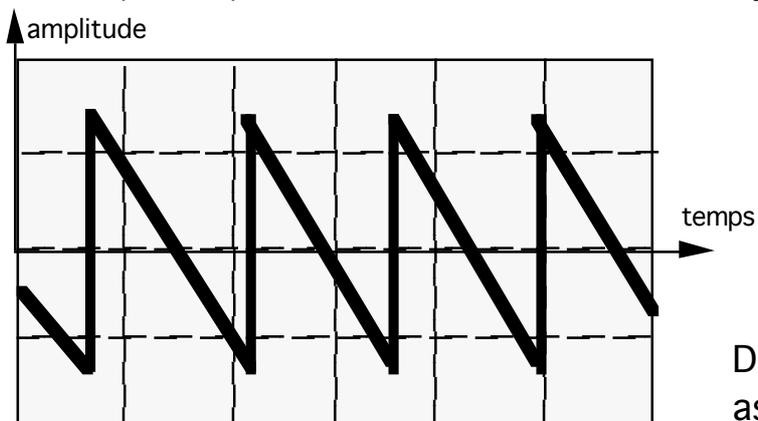
Signal sinusoïdal



Signal carré



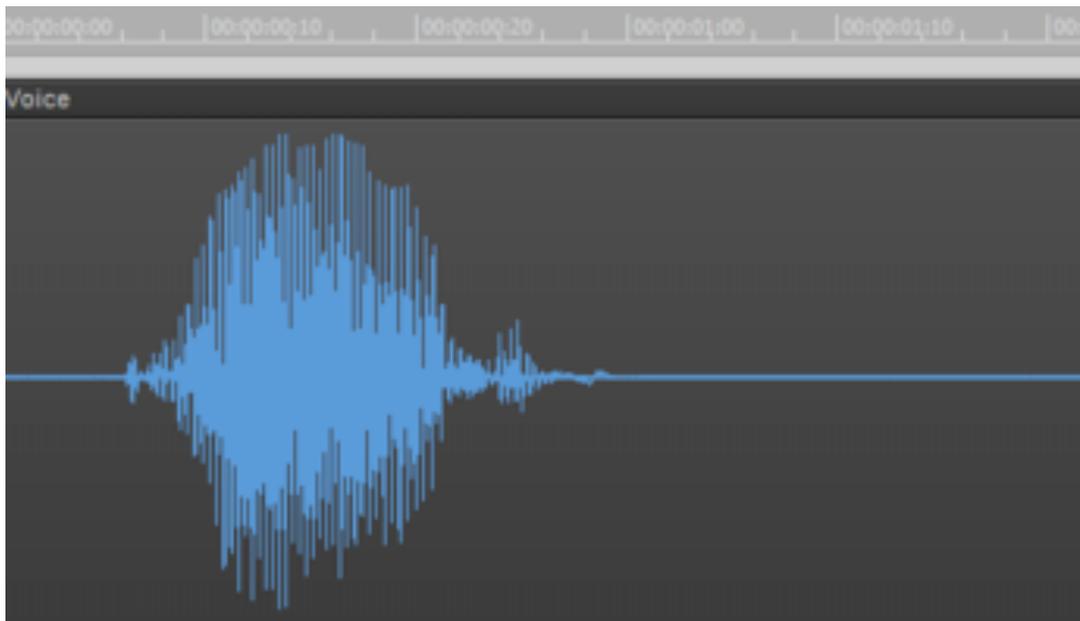
Signal triangulaire  
ou dent de scie  
symétrique



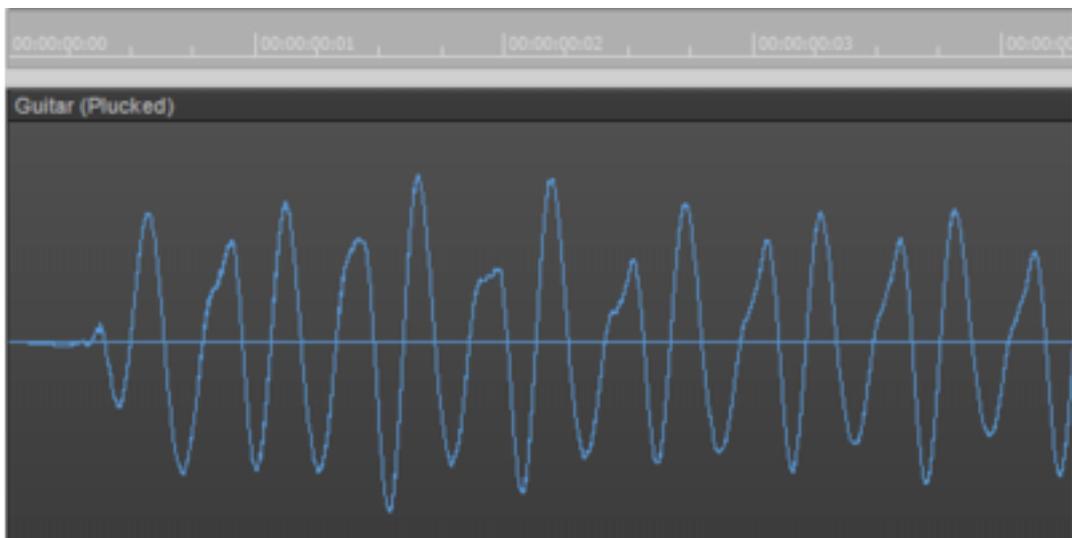
Dent de scie  
asymétrique

**Figure 4 : Diverses formes d'onde de synthèse vues à l'oscilloscope.  
Deux formes d'onde naturelles vues à l'oscilloscope.**

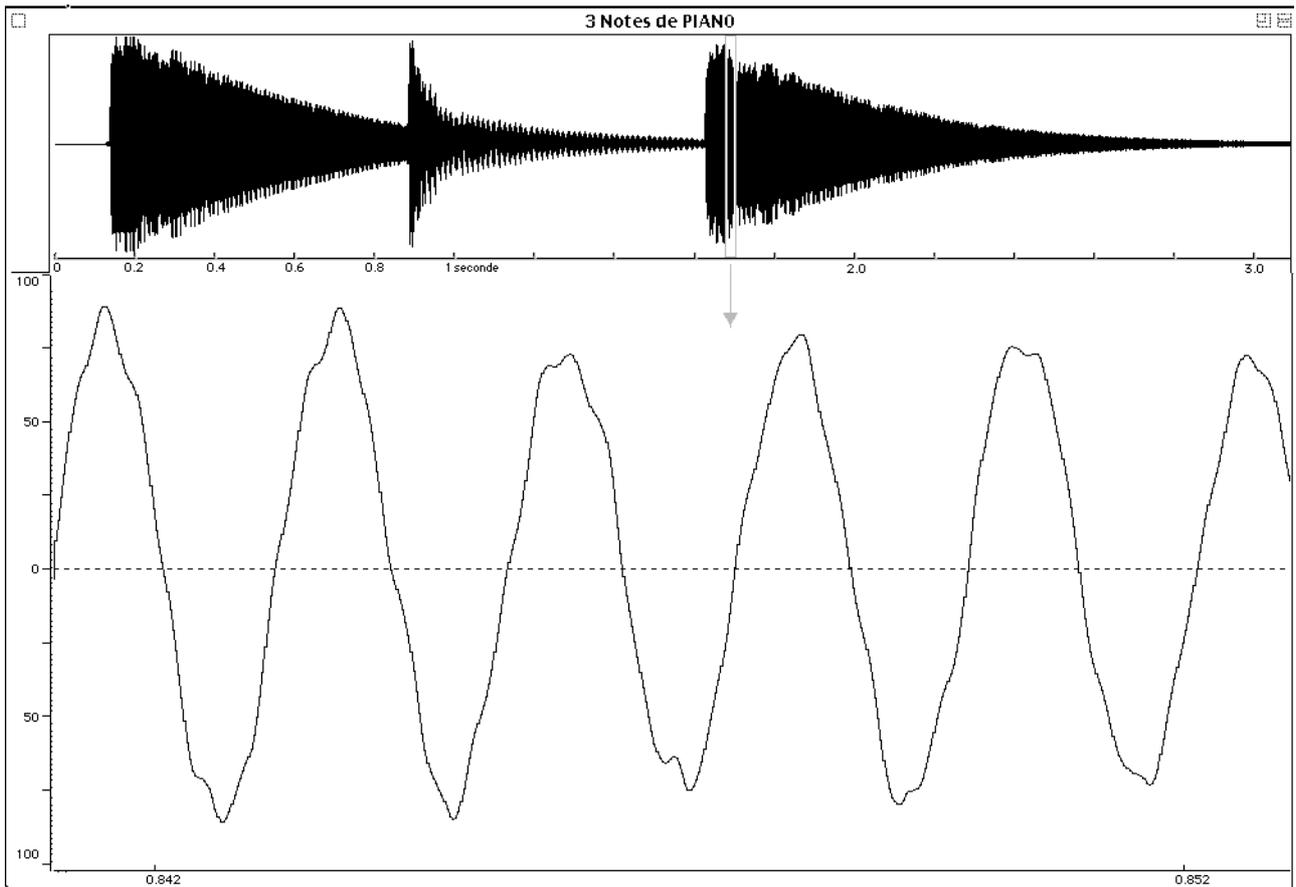
**Figure 5 : diverses formes d'ondes**



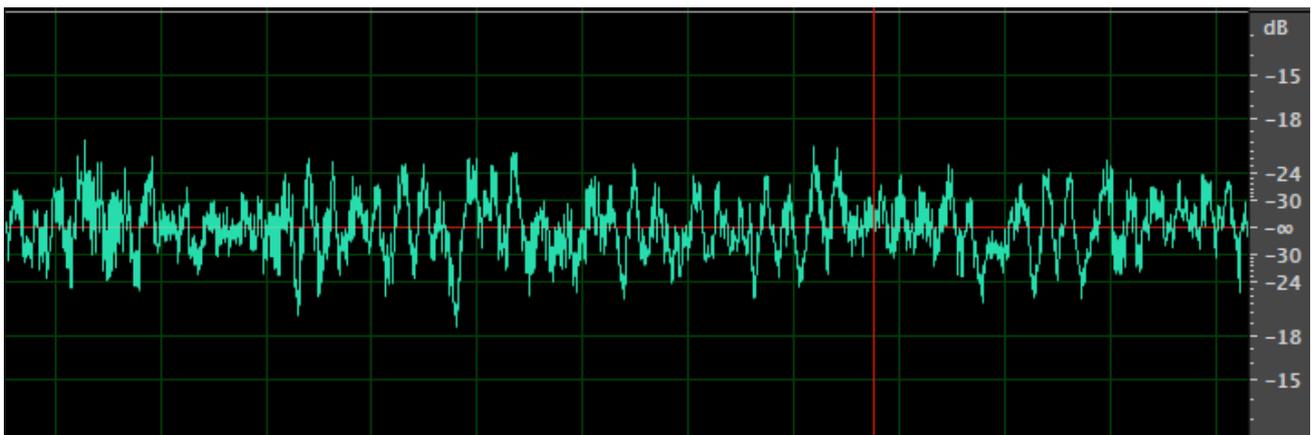
Son de guitare (vue de loin = échelle seconde)  
On peut observer l'enveloppe du son



Son de guitare (vue de près = échelle milliseconde)  
On peut observer la forme d'onde et entrevoir la périodicité



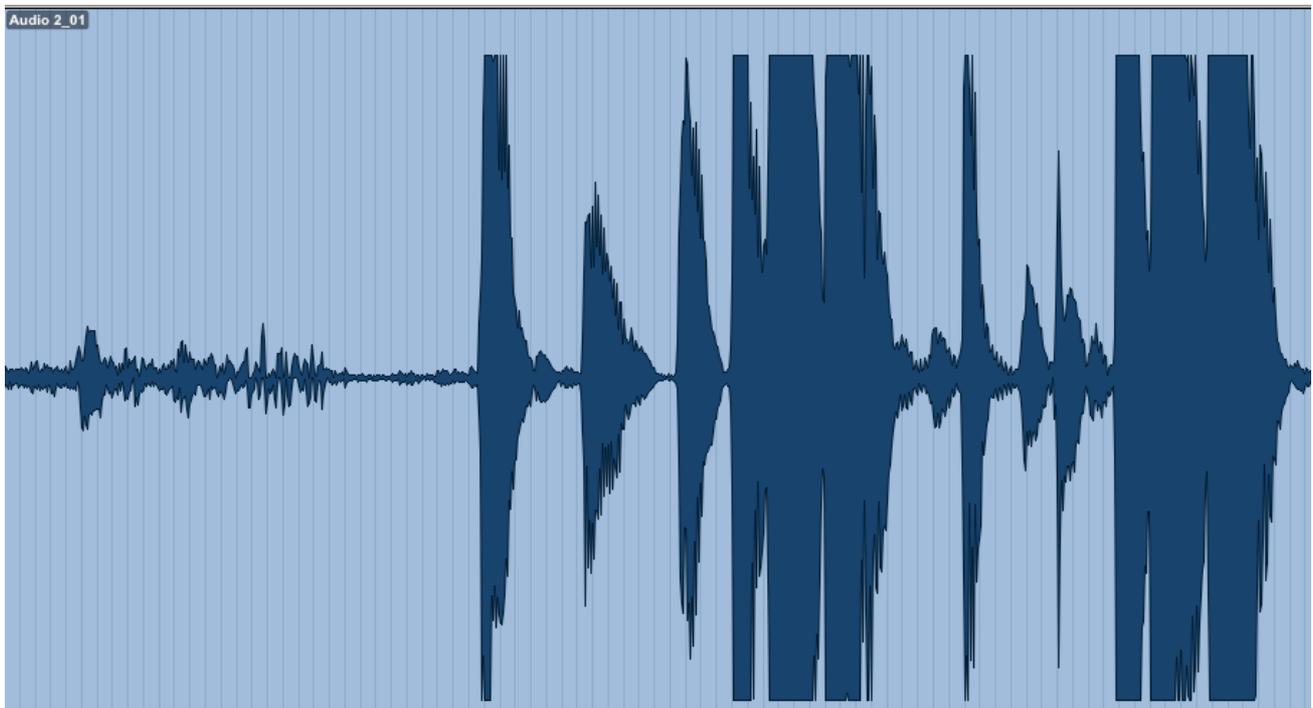
3 notes de piano  
 (en haut : vue de loin = échelle seconde)  
 (en bas : vue de près = échelle milliseconde)



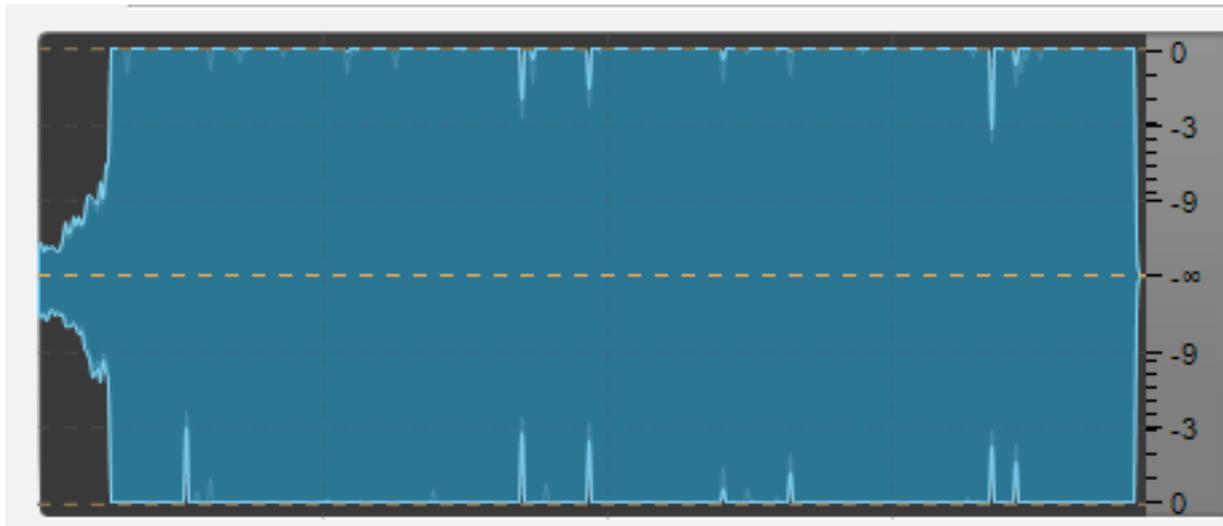
Bruit du vent  
 Aucune périodicité, chaotique  
 Aucune enveloppe (ou alors très longue, trop longue à l'échelle humaine)



Enregistrement possédant un niveau trop faible



Enregistrement un peu faible au début, puis saturé



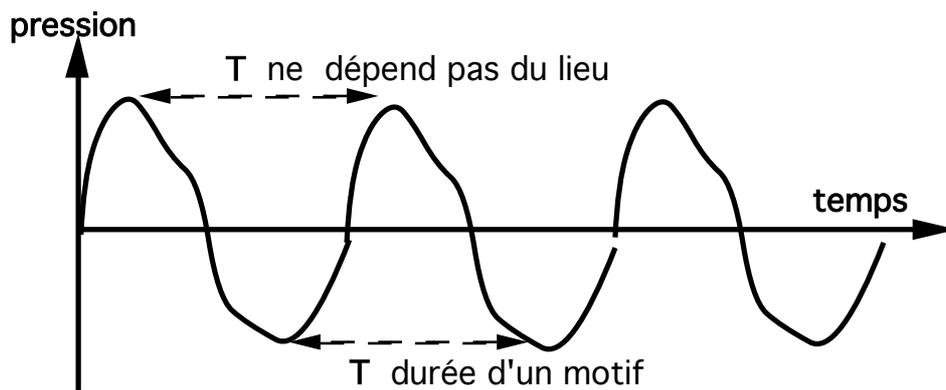
Totalement saturé = à jeter !

#### 4) La période, la fréquence.

Au contraire des bruits, les sons "musicaux" sont souvent composés de motifs répétitifs ou périodes : on parle d'onde périodique.

La période est le temps que met une forme d'onde pour se reproduire identique à elle-même. La mesure de la période ne dépend pas du point de mesure. La période, notée T, se mesure en seconde ou ses sous-multiples.

Une période suffit donc pour définir une forme d'onde "périodique".



**Figure 6 : L'onde sonore se répète de façon identique à un intervalle de temps régulier appelé période.**

L'inverse de la période est la fréquence (nombre de périodes par secondes) :

$$f = \frac{1}{T}$$

Elle se mesure en **Hertz** et ses multiples : kilo, Méga, ... ou encore en cycles par secondes.

Exemples : La3 du diapason  $f = 440 \text{ Hz}$   $T = 1/440 = 2,2727 \text{ ms}$   
référence en technique du son  $f = 1000 \text{ Hz}$   $T = 1 \text{ ms}$

L'oreille humaine perçoit les phénomènes sonores compris entre les fréquences de :  
20 et 20000 Hz

En dessous, infra-sons ; sons audibles ; au dessus ultra-sons.

**Plus le son a une fréquence élevée, plus il est aigu.**

Son graves : 20 à 500 Hz

Sons médium : 500 à 2000 Hz (dépend du spectre = du contenu harmonique)

Sons aigus : 2000 à 20000 Hz

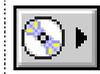
Note : La notion de périodicité est une simplification utilisée dans les modèles mathématiques de la réalité. Ceci est rarement vrai pour un instrument acoustique, mais

plus souvent vérifié pour les instruments électroniques (ce qui explique d'ailleurs en général leur son un peu figé). Nous admettrons par la suite (sauf exception) que nous avons à faire à des sons périodiques.

a) Notions de psycho-acoustique.

Aire d'audition : 20 à 20000 Hz, mais ça n'est pas si simple ...

Cf. courbe de Fletcher



• Test de l'oreille

idx 17-18

copie idx 1-12

Analyse du test :

- disparité entre individus,
- courbe de fréquence non linéaire

## 5) L'amplitude.

L'amplitude représente le déplacement maximum de l'onde sonore de part et d'autre de la valeur moyenne. Elle est associée à l'énergie acoustique du son et à la notion d'intensité.

**Plus le son est fort, plus son amplitude est importante.**

Unités :

N/m <sup>2</sup> ou Pascal	lorsqu'elle est associée à la pression ;
Volts	lorsqu'elle est associée à la tension électrique
dBA	souvent utilisé par commodité.
dBu	acoustique ou électrique

De quelle amplitude parle-t-on ?

amplitude maxi ← correspond à ce que l'on voit

crête à crête

moyenne

efficace

← correspond au fonctionnement de l'oreille



• DeciBel Scale

idx 8-11

copie idx 3-6

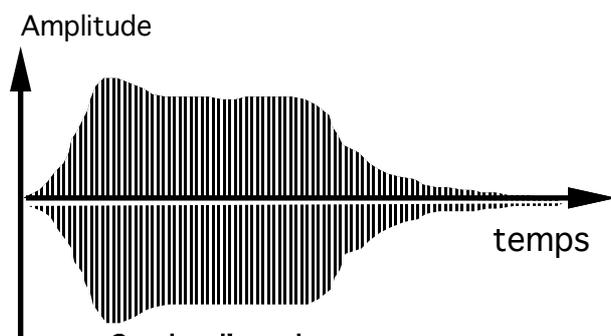
## 6) L'enveloppe d'amplitude.

Le son naît, grandit, vit et disparaît.  $\Leftrightarrow$  l'amplitude varie constamment en fonction du temps.

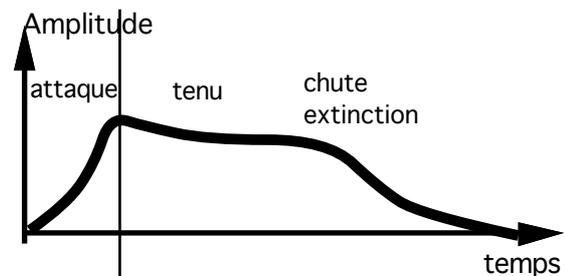
### a) Définition

L'enveloppe d'amplitude du son est la description de l'évolution de l'amplitude au cours du temps. Si on relie les maxima (minima) d'amplitude de la forme d'onde, on dessine son enveloppe.

Elle se divise généralement en 3 ou 4 parties : l'attaque (formation du son), le maintien (tenu du son) et la chute (extinction). Attack, hold, release en anglais.



Courbe d'enveloppe  
on relie les maxima d'amplitude

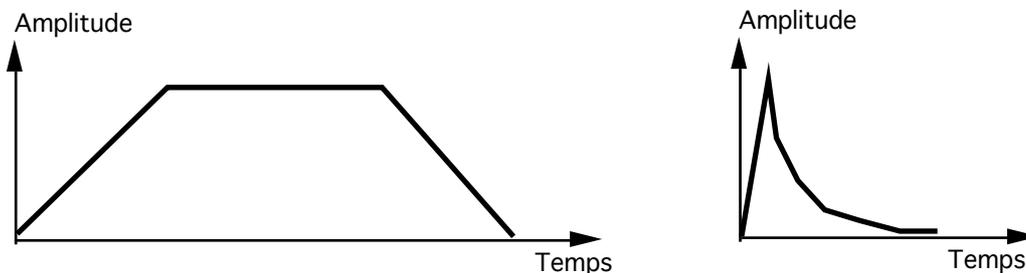


Courbe d'enveloppe

à cause de la symétrie, il est inutile de garder la partie négative

En anglais ADSR = Attack, Decay, Sustain, Release

## b) Diverses enveloppes



### Son soutenu et son percussif

**Figure 7 : Temps d'attaque et vitesse d'extinction de divers instruments acoustiques (dans J.VERPEAUX "Techniques complètes des synthétiseurs)**

Ces trois parties peuvent être isolées :

- d'une part, du point de vue de la production mécanique du son,
- d'autre part, du point de vue écoute physiologique.

**Chaque son instrumental possède une enveloppe particulière. C'est un paramètre essentiel à l'identification de l'instrument.**

## c) Attaque

**Les transitoires (attaque) sont prépondérantes pour la reconnaissance du timbre (rôle d'alerte de l'oreille).**

L'onde passe de zéro à une valeur maximale d'amplitude.

Exemples :

enveloppe du piano :                      attaque rapide (environ 50 ms)  
première décroissance (la touche reste enfoncée, les étouffoirs libérés)  
deuxième décroissance, plus lente  
extinction rapide, après relâchement de la touche (étouffoirs baissés).

enveloppe du violon :  
attaque lente (durée 300 ms environ),  
tenu sans décroissance, à cause de l'entretien du frottement de l'archet,

Les sons percussifs en général n'ont pas de phase intermédiaire.

L'attaque est un paramètre essentiel à l'identification des instruments.

---

En supprimant la portion d'attaque dans le son, il devient souvent impossible de reconnaître l'instrument.

Principe utilisé par les lecteurs d'échantillons Roland (ex. D10)

d) **Decay**

Première décroissance : léger repli du son, jusqu'à un palier stable.

Comparable à un phénomène de surtension mécanique ou électrique.

e) **Phase stationnaire**

**Le tenu permet à l'oreille de déterminer la hauteur et l'intensité d'un son,**

Son soutenu : valeur d'amplitude stable.

Exemple : piano, violon, trompette

Onde quasi périodique qui se répète des milliers de fois. Cette phase détermine la hauteur tonale du son.

f) **Extinction**

Relâchement : retour à zéro de l'amplitude.

Lorsque l'excitateur n'apporte plus d'énergie, le système met un certain temps avant de retourner au repos : il faut libérer l'énergie emmagasinée.

La phase d'extinction est également une caractéristique des instruments.

---

## 7) La vitesse du son ou célérité.

La vitesse du son ou célérité est indépendante de la grandeur, de la nature et de la forme de l'énergie initiale. Elle ne dépend que du milieu de propagation : nature, température, pression.

Célérité  $c$  dans quelques matériaux :

air	330 m/s à 0°C	324 m/s à 30°C
verre	540 m/s	
eau	1435 m/s	
sapin	4500 m/s	
acier	5100 m/s	
vide	pas de propagation.	

## 8) Le timbre.

C'est la "couleur du son". C'est ce qui permet de dissocier 2 sons de même hauteur, de même intensité et de même durée. Il est étroitement lié à la forme de l'onde. En acoustique, on caractérise souvent le timbre en effectuant une analyse spectrale du son (voir paragraphe suivant).

Le timbre est associé aux composantes harmoniques du son, ce que nous allons voir ci-après.

La forme d'onde est une représentation graphique possible du timbre.

**Des timbres différents ont des formes d'ondes différentes.** Cette représentation est peu utilisée par les acousticiens : les relations entre la forme et le son perçu sont peu évidentes.

Le timbre est la manifestation sonore de phénomènes vibratoires engendrés par une multitude de phénomènes mécaniques simultanés.

Le timbre peut-être considéré comme un assemblage d'une multitude de mouvements vibratoires simultanés.

## 9) Sons purs - sons complexes. Analyse de FOURIER.

La classification sons purs - sons complexes, ainsi que le théorème de Fourier, fournissent des outils de mesure et de comparaison des sons entre eux, plus concrets que la fugitive impression sonore. Nous allons donc nous familiariser un peu avec ces outils pour pouvoir parler ensuite le même vocabulaire.

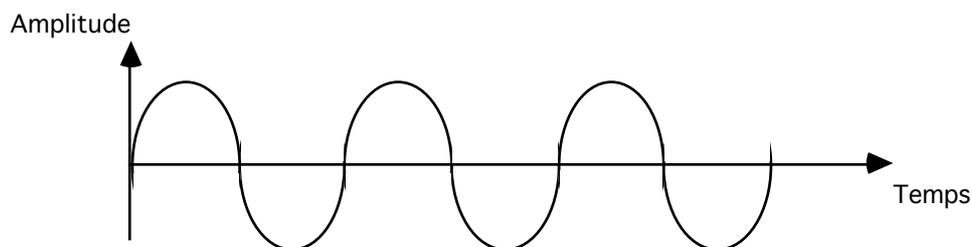
### a) Son pur. Onde sinusoïdale.

**Un son pur** est une entité mathématique. Il n'existe pas à l'état naturel (sauf éventuellement le diapason), mais il peut être engendré par un oscillateur électronique : par exemple le son INIT du DX7. Sa forme d'onde se dessine par une sinusoïde. La pression

---

de l'air varie de manière sinusoïdale en fonction du temps. L'onde sinusoïdale est musicalement peu intéressante, étrange, anti naturelle, par contre elle possède des propriétés mathématiques spécifiques et importantes.

Une onde sinusoïdale est complètement définie par 3 paramètres : amplitude, période et phase initiale. Elle se répète identique à elle-même indéfiniment. Ce son pur sert de référence pour analyser les autres sons, baptisés complexes.



**Figure 8 : Onde sinusoïdale correspondant à un son pur**

#### b) Formes d'ondes complexes et réelles.

**Les sons complexes** sont tous les sons qui ne sont pas purs ! (en particulier tous les sons naturels).

Voir schémas représentant différentes formes d'onde synthétiques ou réelles au paragraphe précédent (§ 4a : forme d'onde)

Les formes d'onde carrée, rectangulaire, les dents de scie symétrique ou asymétrique sont des **formes d'onde complexes**, ainsi que toutes les formes d'onde réelles (instruments traditionnels ou synthétiseurs).

#### c) Analyse de Fourier. (1772-1837)

Le **théorème de Fourier** dit que *"tout son complexe peut mathématiquement être décomposé en une somme de sons purs ou sinusoïdes de fréquence (hauteur) et d'amplitude (intensité) et de phase définies"*

La décomposition d'une fonction périodique peut s'opérer par le calcul ou au moyen d'appareils automatiques : analyseur de spectres.

#### d) Sons périodiques ou harmoniques ou à hauteur déterminé

Si les fréquences qui composent un son sont des multiples entiers de la fréquence la plus basse (fondamentale), on utilisera le terme "**harmonique**" pour désigner ces composantes :  $2f_0$ ,  $3f_0$ , ...  $nf_0$ . **Le son est dit harmonique**. C'est le cas de la plupart des instruments de musique (quand on y regarde pas de trop près...)

L'harmonique la plus grave - ou première harmonique - s'appelle aussi la fondamentale.  $f_0$  est appelée la **fondamentale ou première harmonique**,  $nf_0$  est l'**harmonique de rang n**

---

e) Sons à hauteur non déterminée, bruit

Si les fréquences qui composent un son ne sont pas des multiples entiers de la fondamentale (par exemple : 1,72.fo, 3,14.fo, 5,333.fo,... , on préférera le terme de "**partiels**" pour désigner ces composantes. **Le son est alors inharmonique**. C'est le cas des percussions, des bruits de la rue, du vent, de la mer,...

\*\*\* *La fondamentale correspond (en général) à la notion de hauteur utilisée par les musiciens et le contenu harmonique est une description possible du timbre*

2 conventions possibles :

fondamentale	ou	fondamentale ou 1ère harmonique
1ère harmonique		2ème harmonique
2ème harmonique		3ème harmonique
etc.		etc.



• RISSSET PIERCE	synthèse du son	idx 7 & 27
CD	Addition d'Harmoniques	idx 53
•	Cancelled Harmonics	idx 1
•	Mise en évidence des Harmoniques	idx 46
•	?? Spectre variable du basson	idx 57

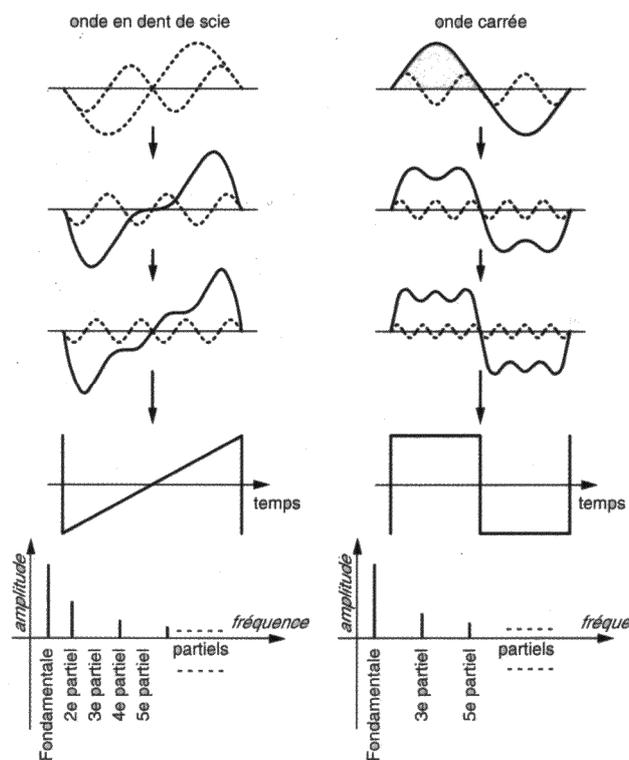


Figure 9 : Construction d'ondes complexes par addition de sinusoïdes

## 10) En résumé :

Un son est caractérisé par : son intensité (de 0 à 120 dBA)  
sa hauteur en Hertz (de 20 à 20000 Hz)  
son timbre = forme d'onde ou spectre  
sa durée en secondes

La forme d'onde est l'allure des vibrations au cours du temps.

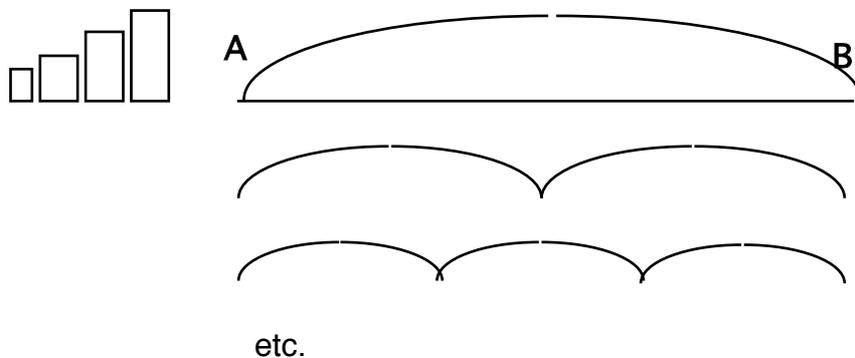
Elle peut être périodique ou non (harmonique ou inharmonique), simple ou composée (une ou plusieurs harmoniques).

Plus la fréquence est grande, plus le son est aigu.

Le spectre décrit le contenu harmonique d'un son, c'est-à-dire les fréquences qui le composent. Le sinus est en quelque sorte une unité de référence pour le physicien.

---

Une famille kangourou doit se rendre d'un point A à un point B.  
Ils partent tous en même temps, vont à la même vitesse et donc arrivent en même temps.  
En fonction de leur taille leurs sauts sont plus ou moins grands.



On remplace les kangourous par des molécules d'air, la hauteur des bonds par la pression de l'air et on a une idée de ce qui peut se passer dans un corps sonore.

Au passage, on a ici défini la fondamentale, l'octave, la quinte, l'octave, la tierce...

Bruit :

Une famille singe veut faire la même chose (mais en réalité, fait n'importe quoi...)

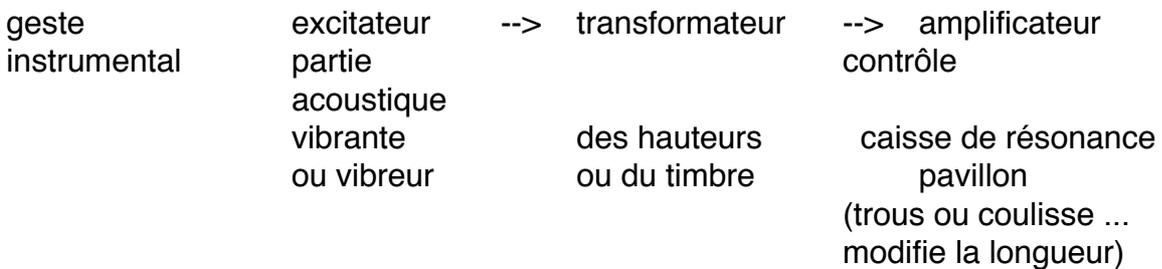
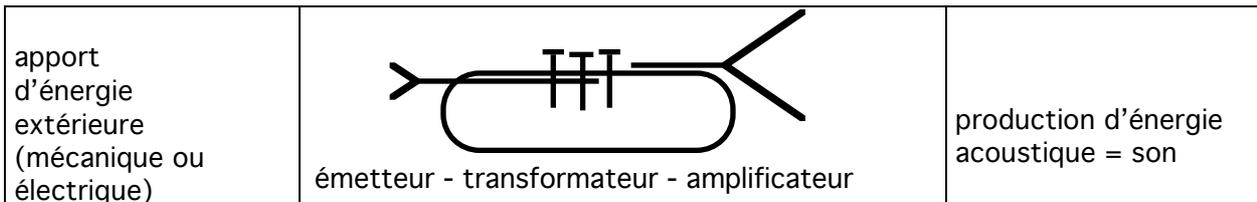
---

# III- Principes de production des sons dans un instrument

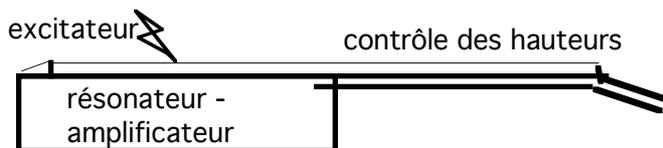
## Historique

La construction des instruments a été très longtemps empirique.  
 On ne connaissait que quelques lois fondamentales (souvent originaires des grecs)  
 Mersenne au XVII<sup>e</sup> s      loi des cordes vibrantes  
 Bernouilli au XVIII<sup>e</sup> s      loi des tuyau sonores  
 recherches sérieuses sur les instr à cordes au début du XIX<sup>e</sup> s      Savart

### 1) Description acoustique d'un instrument



ondes stationnaires      ondes progressives



## 2) Excitation, mise en vibration d'un corps. Comment se fait l'apport d'énergie ?

5 modes d'excitation : On peut faire vibrer un corps :

en le frottant (excitation continue) archet du violon, scie circulaire

en le frappant percussion

(choc unique ou multiple ou répétitif)

en soufflant (mise en mouvement d'une colonne d'air)

en grattant |

en pinçant | **1 à 2 millénaires**

| **d'expérience**

en l'excitant par une onde électrique (haut-parleur),

etc... **50 ans d'expériences**

## 3) Avec quoi se fait l'apport d'énergie ?

archets,

baguettes,

marteaux,

à air,

lèvres, bouche, colonne d'air des poumons,

plectre, ongle, plumes,

doigts

à influx magnétique

diapason,

## 4) Vibreur : partie vibrante du corps sonore. Qu'est-ce qui vibre ?

**idiophones** corps solide vibrant

tige, tuyau, plaques, cordes

en verre, pierre, métal, bois, ...

fixés en un point : ils peuvent vibrer dans toutes les directions

fixés en 2 points : ils ne vibrent que dans une seule direction

**aérophone** mise en vibration d'une masse gazeuse

délimité par des parois et devenue élastique par compression

**cordophone** corps souples rendus élastiques

par traction longitudinale (cordes)

**membranophones**

par traction exercée sur toute leur surface

**électrophones**

signaux électriques reproduit par un haut-parleur

## 5) Ondes progressives, ondes stationnaires

a) Le milieu (théoriquement ...) infini permet aux ondes de progresser.

b) Dans un milieu fini (tube fermé, salle de concert), les ondes progressent, se réfléchissent : les "ondes-aller" rencontrent les "ondes-retour" et se combinent. Pour certaines fréquences et certaines dimensions du milieu de propagation, il peut se produire des phénomènes d'interférence : les ondes ne se propagent plus : on observe des nœuds et des ventres de pression : il s'agit d'**ondes stationnaires**.

Seules les ondes dont les dimensions correspondent au(x) dimension(s) du milieu fermé perdurent dans le temps (état stationnaire). Les ondes qui ne coïncident pas avec les dimensions perdent rapidement leur énergie et disparaissent (transitoire d'attaque).

Les ondes stationnaires jouent un rôle important dans tous les instruments de musique à caisse de résonance, dans les instruments à vent ; mais elles sont gênantes en acoustique des salles.

Onde progressive

[http://www.ac-grenoble.fr/loubet.valence/userfiles/file/Disciplines/Sciences/SPC/TS/Son/web2014/co/vibration\\_corde\\_contrainte.html](http://www.ac-grenoble.fr/loubet.valence/userfiles/file/Disciplines/Sciences/SPC/TS/Son/web2014/co/vibration_corde_contrainte.html)

Onde stationnaire

[http://www.ac-grenoble.fr/loubet.valence/userfiles/file/Disciplines/Sciences/SPC/TS/Son/web2014/co/ondes\\_stationnaires.html](http://www.ac-grenoble.fr/loubet.valence/userfiles/file/Disciplines/Sciences/SPC/TS/Son/web2014/co/ondes_stationnaires.html)

## 6) Amplification dans un instrument

ces instruments doivent être amplifiés : caisses de résonance ou pavillon

Lorsque le vibreur ne peut, du fait de sa faible surface, produire une quantité suffisante d'énergie sonore (cordes, membranes), on lui adjoint un amplificateur qui présente les mêmes propriétés qu'un vibreur avec une surface plus étendue, permettant une plus forte production d'énergie. Les amplificateurs peuvent avoir une forme de caisse, de boîte, de tube, de récipient etc. Parfois on augmente la quantité d'énergie sonore produite en développant artificiellement la surface du vibreur. Le corps de grande surface ajouté ainsi au vibreur reçoit le nom de diffuseur.

Pour fonctionner correctement, un amplificateur doit renforcer les oscillations du vibreur sans déformation à toutes les longueurs d'onde. On utilise donc à cette fin des corps dont la forme et les dimensions garantissent qu'ils ne présentent pas d'oscillation propre ou que leur oscillation propre se trouve en deçà ou au-delà des oscillations limites du vibreur. Dans certains cas, lorsque le vibreur est fait pour vibrer à une certaine longueur d'onde, on s'arrange pour conserver la longueur d'onde des vibrations de l'amplificateur dans le même ordre de grandeur et on la coordonne exactement avec les vibrations du vibreur. La vibration propre de l'amplificateur vient alors renforcer la vibration du vibreur (c'est le cas par exemple des tuyaux à anches, du diapason) et on assiste à un phénomène de résonance. L'amplificateur prend alors le nom de résonateur.

## 7) Tuyaux sonores

Il s'agit d'un résonateur.

Il est mis en vibration par un excitateur.

L'excitateur doit être accordé en fréquence avec le résonateur, sous peine de rendement désastreux.

L'excitateur (anche, embouchure...) envoie de l'énergie. Après une brève période de turbulence et d'hésitation (transitoire d'attaque), très vite le son se stabilise : une note de hauteur précise se fait entendre.

À l'extrémité du tuyau, les ondes progressives repartent dans le sens inverse, se combinent entre elles, s'annulent ou se renforcent. Très vite, il s'établit un régime d'ondes stationnaires dans le tuyau.

Note : le débutant peut produire toute sorte de couacs qui correspondent à des régimes instables.

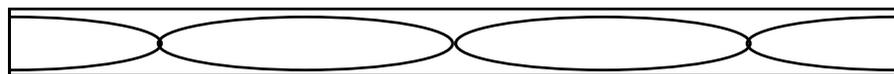
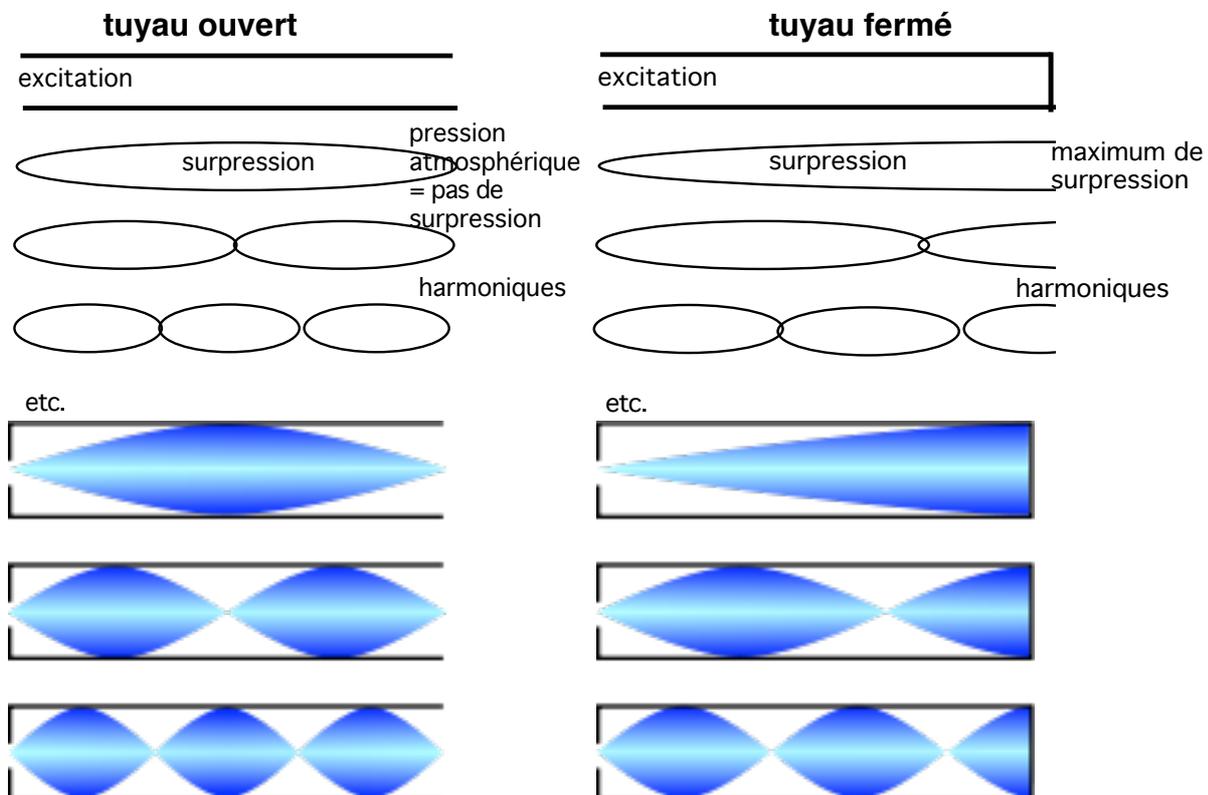


Figure 10 : ondes stationnaires : succession de ventres, nœuds

Le tuyau est toujours considéré comme ouvert au niveau de l'excitateur.



### **1) Cas du tuyau ouvert :**

Les tubes cylindriques ouverts

résonnent approximativement à des fréquences de  $f = n \cdot \frac{C}{2L}$

où "n" est un nombre entier (1, 2, 3...) représentant le mode de résonance, "L" est la longueur du tube et "V" est la vitesse du son dans l'air (qui est approximativement de 344 mètres par seconde à 20 °C et au niveau de la mer).

- plus le tuyau est long, plus la fréquence baisse
- outre la fondamentale, un tuyau génère toute une série d'harmoniques
- un tuyau fermé est à l'octave grave d'un tuyau ouvert

Ex. : l = 1 mètre     f = 172 Hz, 344, 516, 688, 860, ...

### **2) Cas du tuyau fermé :**

Un cylindre fermé aura approximativement des résonances de  $f = (2n - 1) \cdot \frac{C}{4L}$

Avec n un entier naturel.

Ce type de tube a sa fréquence fondamentale une octave inférieure à celle d'un cylindre ouvert (c'est-à-dire, la moitié de la fréquence), et peut produire seulement les harmoniques impairs, "f", "3f", "5f"... par rapport au tube ouvert.

f : fréquence en Hz  
n : numéro de l'harmonique    k=1 <=> fondamentale  
c : vitesse du son  
L : longueur du tuyau

- plus le tuyau est long, plus la fréquence baisse
- outre la fondamentale, un tuyau génère toute une série d'harmoniques
- uniquement des harmoniques impaires, une octave en dessous de l'autre

Ex. : l = 1 mètre     f = 86 Hz, 258, 430, ...

### **3) Exemple : tuyau d'orgue :**

tuyau d'orgue 8'     8 x 30 cm = 2,4 mètres ≈ 2,5 m

fermé :      $f = (2n - 1) \frac{c}{4L} = 34 \text{ Hz}$

ouvert      $f = n \frac{c}{2L} = 68 \text{ Hz}$

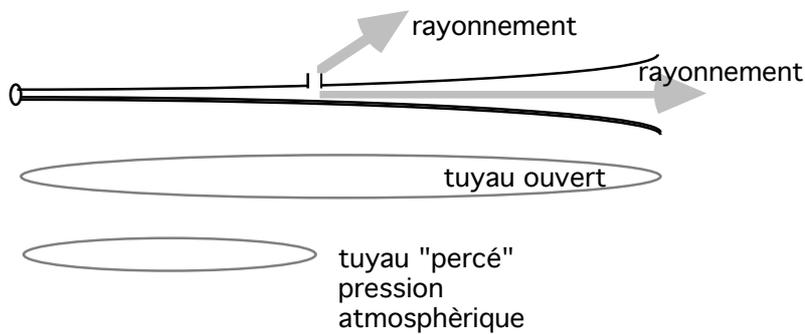
#### 4) Exemple : longueur des instruments et note fondamentale

flûte            0,6m             $f = n \frac{c}{2L} = 275 \text{ Hz}$

hélicon        1,5m             $f = n \frac{c}{2L} = 100 \text{ Hz}$

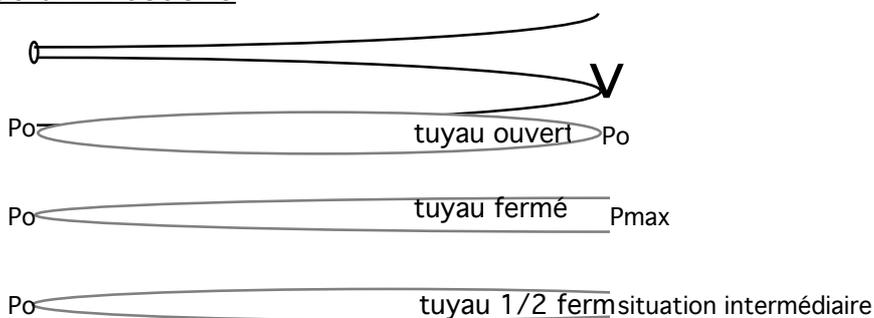
Enceintes    HP graves    ø 30 cm  
                   HP aigus     ø 1 cm

#### 5) tuyau percé : contrôle des hauteurs



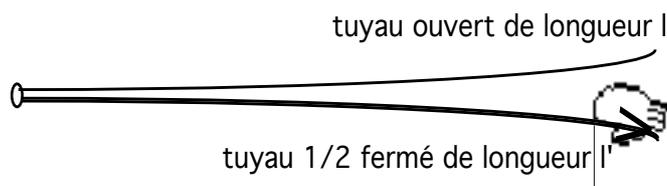
Si la longueur est diminuée de moitié, la hauteur double.

#### 6) tuyau à 1/2 bouché



Dans un tuyau à 1/2 bouché, on est dans un cas intermédiaire : la fréquence baisse, par rapport à un tuyau ouvert.

Pb : les cornistes utilisent cet effet pour faire monter la hauteur d'un 1/2 ton !!!  
 Le cas est différent, car ils mettent la main dans le pavillon et ainsi raccourcissent la longueur du tuyau !



la longueur diminue, donc la fréquence augmente

### a) embouchure des tuyaux

a) emb. de flûte : courant d'air dirigé sur un biseau.  
l'air se répartit des 2 côtés du biseau. Le son produit est renforcé par le tuyau



embouchure du flûte

b) embouchure à anche : une languette oscillante crée un mouvement vibratoire à l'origine du tuyau



embouchure à anche libre

=> anche libre : si la languette est plus petite que l'ouverture  
la fréquence de vibration du tuyau est réglée en faisant varier la longueur de l'anche, à l'aide de la rasette

harmonium utilise des anches libres, mais sans résonateurs  
certains tuyaux d'orgues sont à anche libre

=> anche battante : si la languette est plus grande que l'ouverture

la clarinette est un instr. à anche battante  
certains tuyaux d'orgue : hautbois, cromorne

c) embouchure lippale : les lèvres de l'instrumentiste vibrent dans un petit entonnoir appelé embouchure. Les lèvres jouent le rôle d'anches.



cas des cuivres : cor, clairon, trompettes,

sonogramme

harmoniques naturelles

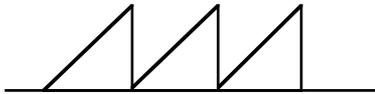
## 8) Cordes vibrantes

origine : corde de l'arc du chasseur préhistorique

### a) excitation à l'archet : oscillation de relaxation.

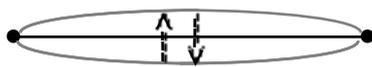
La colophane a des propriétés très particulières :

- à vitesse lente, le coefficient de frottement est très élevé : ça colle
- à vitesse rapide, l'archet semble glisser
- à l'arrêt, la mèche colle sur la corde, au point de ne faire qu'un seul

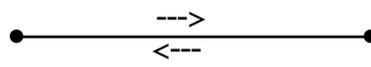


oscillation de relaxation  
produit un son très riche.

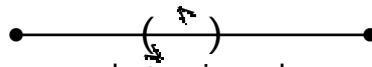
4 modes simultanés de vibration d'une corde attaquée par un archet.



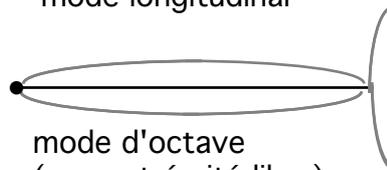
mode transversal



mode longitudinal



mode torsionnel



mode d'octave  
(une extrémité libre)

fil d'acier ou boyau de mouton

ébranlement initial par frappé (piano), gratté (guitare), pincé (harpe, mandoline),  
frotté (violon, violoncelle)

L'ébranlement se propage dans la corde et donne naissance à des ondes stationnaires dont la fréquence dépend des caractéristiques de la corde.

Les phénomènes transitoires ont atténués, car ils ne correspondent pas à la fréq de résonance de la corde.

### b) Vibration transversale = mode principal

cas de l'attaque à l'archet

$$\text{fréquence de résonance : } f = n \cdot \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

- où
- n : numéro d'harmonique
  - L : longueur de la corde en m
  - T : tension de la corde en N
  - $\mu$  : masse unitaire (masse par unité de longueur) en kg

- plus la corde est longue, plus la fréquence baisse

quand on pose son doigt sur la touche, on raccourci la corde  
ce qui permet de jouer des notes.

La fréquence est inversement proportionnelle à la longueur de corde

- plus la corde est tendue, plus la fréquence augmente
- plus la corde est lourde, massive, plus la fréquence baisse
- outre la fondamentale, la corde génère toute une série d'harmoniques

Exemple :  $L = 65,5 \text{ cm} = 0,65 \text{ m}$      $\mu = 0,4 \text{ g/m}$      $T = 75 \text{ N}$      $F_1 = 330 \text{ Hz (mi}_3)$

Ex du piano : les cordes du piano sont attaquées au 1/7ème de leur longueur, afin d'éviter l'apparition de l'harmonique 7.

Ex. du piano : la tension moyenne d'une corde est environ 40 kg  
la totalité des cordes engendre une tension de 9 tonnes.  
D'où l'importance du cadre.

Ex. la corde grave du violon (du piano) est filée, afin d'augmenter sa masse  
les cordes aiguës sont très fines

Pb : quand on pose son doigt sur la touche du violon, on écrase la corde, donc on modifie la longueur de la corde, mais aussi la tension de celle-ci.  
Le problème est donc complexe

### c) Vibration longitudinale

cas du frottement dans le sens de la longueur de la corde

fréquence de résonance :  $f = \text{Erreur !}$

où

k :	numéro d'harmonique	
l :	longueur de la corde	en m
E :	module de Young ou d'élasticité de la corde	en N
$\rho$ :	masse volumique (masse par unité de volume)	en kg

C'est principalement la vibration longitudinale qui différencie une corde en boyau et en acier (modules d'Young différents).

### d) Vibration de torsion

cas de la corde roulée entre les doigts

fréquence de résonance :  $f = \text{Erreur !}$

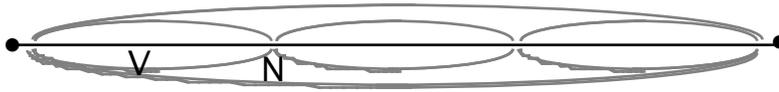
où

k :	numéro d'harmonique	
l :	longueur de la corde	en m
G :	coefficient ou module de torsion de la corde	en N
$\rho$ :	masse volumique (masse par unité de volume)	en kg

Le fabricant de corde doit "accorder" tous ces paramètres.

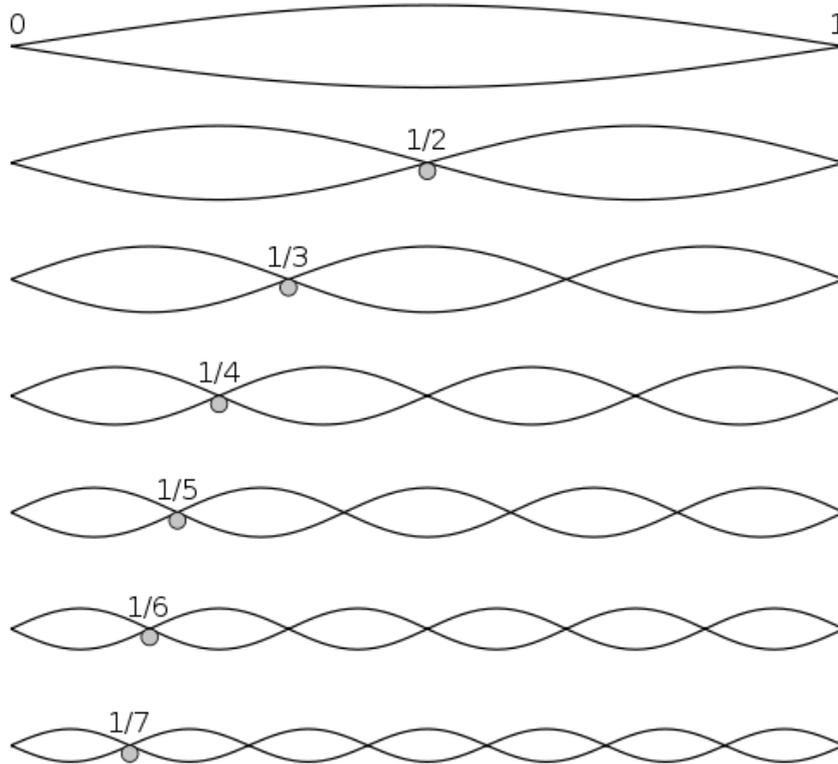
Le luthier en règle le dosage par les modalités de fixation, la structure de l'instrument.

e) Jeu en harmoniques



mode transversal : harmonique 1 et 3  
production de nœuds et de ventres

si l'on effleure du doigt le nœud N, on étouffe l'harmonique 1, l'harmonique 3 continue de vibrer librement, comme si on avait raccourci la corde.



Voir les figures sur : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Onde\\_sur\\_une\\_corde\\_vibrante](https://fr.wikipedia.org/wiki/Onde_sur_une_corde_vibrante)