

CHAP 05-COURS Les instruments de musique

1. LA MUSIQUE EST UNE SCIENCE

Un mélomane est capable de percevoir à l'oreille si une musique est harmonieuse ou non. Il n'est pas nécessaire d'être mathématicien pour apprécier la musique. Pourtant... « la musique est un exercice d'arithmétique secrète et celui qui s'y livre ignore qu'il manie les nombres » (G. W. LEIBNIZ, 1712).

Comment l'harmonie et les gammes permettent-elles de comprendre que la musique est une discipline scientifique.

2. HISTORIQUE DE L'HARMONIE

Selon Jamblique (env. 250-330 ap. J.-C.), auteur de Vie de Pythagore, PYTHAGORE passa un jour devant l'atelier d'un forgeron et écouta les marteaux battre le fer. Certaines combinaisons de sons étaient harmonieuses, d'autres moins. Il étudia les marteaux et s'aperçut que deux sons étaient harmonieux lorsque les masses des deux marteaux étaient dans un rapport simple de nombres entiers.

Que cette histoire soit vraie ou simplement une légende, il apparaît acquis que Pythagore a le premier mis en évidence le fait que l'oreille humaine est sensible aux rapports simples de fréquences existant entre les sons. [...] Les rapports simples de fréquences ont reçu des noms particuliers. L'intervalle qui correspond à un rapport de fréquences égal à deux s'appelle une octave. [...] L'octave est l'intervalle fondamental qui délimite la gamme. C'est l'intervalle qui existe entre le premier et le deuxième Do dans l'énumération Do, Ré, Mi, Fa, Sol, La, Si, Do. »

Extrait de F. BRUNAUT, « Musique et Mathématiques », CASA info, n° 77, déc. 2002, mwAumpa.ens-lyon.fr

3. HARMONIES

- L'oreille humaine est sensible au rapport entre les fréquences de deux notes jouées simultanément. Lorsqu'un instrument émet un La₃, de fréquence fondamentale $f = 440$ Hz, l'oreille perçoit un son de fréquence f , et, suivant l'instrument, des harmoniques de fréquence $f_2 = 2f_1$ et $f_3 = 3f$, etc. Quand une deuxième note est émise, un La₄ de fréquence fondamentale $f' = 880$ Hz, l'oreille entend déjà ce son dans les harmoniques du La₃. Il en est de même du deuxième harmonique du La₄ de fréquence :

$$f'_2 = 2 \cdot f'_1 = 1\,760 \text{ Hz} = 4 \cdot 440 = 4f_1$$

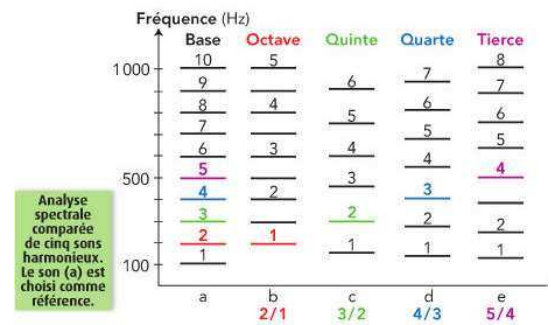
Plus les harmoniques de deux notes ont des fréquences communes, plus ces notes sont harmonieuses à l'oreille. Elles sont consonantes.

Rapport des fréquences fondamentales	Position par rapport à la note de référence	Nom	Exemple
$\frac{2}{1}$	8	Octave	Do – Do
$\frac{3}{2}$	5	Quinte	Do – Sol
$\frac{4}{3}$	4	Quarte	Do – Fa
$\frac{5}{4}$	3	Tierce majeure	Do – Mi

Quelques accords harmonieux.

On parlera d'harmonie entre deux notes lorsque le rapport des fréquences de leur fondamental est « simple ». Le rapport le plus simple est celui qui a pour valeur 2. Les deux notes sont dites à l'octave. Jouées simultanément, ces deux notes semblent n'en faire qu'une.

Il existe d'autres rapports simples représentés dans le tableau ci-contre.



Ainsi, sur la représentation ci-contre, le rapport de la fréquence du fondamental du son (c) sur celle du fondamental du son (a) est égal à $\frac{3}{2}$. Le son (c) est dit à la quinte du son (a). On constate également que la fréquence du 3e harmonique du son (a) est égale à celle du 2e harmonique du son (c).

Deux notes à la quinte se distinguent mieux, se fondent moins, que deux notes à l'octave, car elles ont moins d'harmoniques en commun.

4. GAMMES

Il y a eu, dans l'Histoire, de nombreuses constructions de gammes pour ordonner les notes au sein d'une octave. Les premières gammes furent appelées naturelles, car elles étaient construites à partir de sons émis par des cordes vibrantes de différentes longueurs. Ces gammes, comme la gamme de PYTHAGORE, présentent un inconvénient important. Les rapports de fréquences entre des notes consécutives ne sont pas constants. On ne peut donc pas transposer dans une autre tonalité toutes les notes d'une œuvre musicale. Jean-Sébastien BACH (1685-1750) résout ce problème en créant la gamme tempérée.

• La gamme de PYTHAGORE

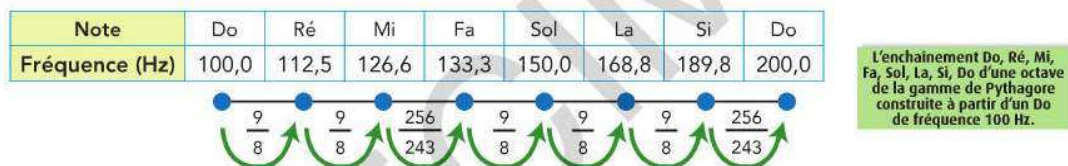
Elle correspond à des notes obtenues par des cordes vibrantes dont les rapports de longueurs, égaux à $\frac{3}{2}$, sont considérés harmonieux. Ces notes, dont les rapports de fréquences sont aussi de $\frac{3}{2}$ forment des **quintes**.

Il est possible, par quintes successives, de retrouver les fréquences des notes d'une octave :

- par quintes montantes, la fréquence d'une note de base est multipliée par 1,5 puis si besoin divisée par 2 pour être dans l'intervalle de fréquences correspondant à l'octave de la note de base. En procédant de la même manière à partir de la note obtenue, on construit une série de notes dont les six premières sont affectées d'un nom simple (Do, Ré, Mi, Sol, La, Si);

- par quintes descendantes, la fréquence d'une note de base est divisée par 1,5 puis si besoin multipliée par 2 pour être dans l'intervalle de fréquences correspondant à l'octave. En procédant de la même manière à partir de la note obtenue, on construit une autre série de notes dont la première est affectée d'un nom simple (Fa).

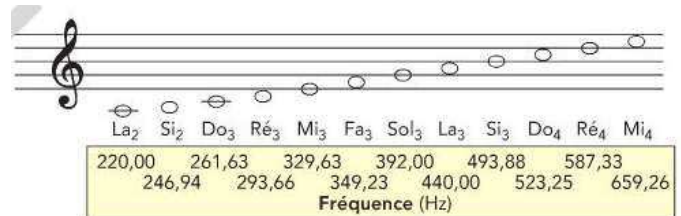
- Les autres notes de l'octave sont dites altérées, et notées dièse (#) ou bémol (b). Elles ne sont pas conservées si leurs fréquences sont trop proches les unes des autres. Le tableau ci-dessous indique les rapports de fréquences entre deux notes non altérées consécutives.



• La gamme tempérée ou à tempérament égal

Douze notes sont placées sur une octave qui est alors divisée en douze intervalles appelés demi-tons.

Ces notes sont Do, Do[#], Ré, Mi^b, Mi, Fa, Fa[#], Sol, Sol[#], La, La[#] et Si.



Quelques notes de musique de la gamme tempérée et leurs fréquences.

« # » se lit dièse; « b » se lit bémol. Le rapport de fréquences entre deux notes consécutives de fréquences respectives f_1 , et f_2 est constant : $\frac{f_2}{f_1} = 2^{1/12}$.

5. LES DEUX FONCTIONS DES INSTRUMENTS DE MUSIQUE

Pour produire un son les instruments de musique doivent vibrer et émettre.

5.1. Vibrer

La vibration d'un exciteur est nécessaire pour produire l'onde sonore.

Dans le cas des instruments à cordes, l'exciteur est une corde tendue.

Suivant la façon dont la corde est mise en vibration, on distingue :

- les cordes frottées : violon, violoncelle, contrebasse ;
- les cordes pincées : guitare, harpe, banjo ;
- les cordes frappées : piano, cymbalum.

Dans les instruments à vent, l'exciteur produit une vibration dans un écoulement d'air insufflé dans l'embouchure (fig. 1).

L'air insufflé peut être mis en vibration par sa rencontre avec une arête rigide appelée biseau : flûte à bec, flûte traversière, cornemuse.

Il peut mettre en vibration une ou deux lamelles élastiques, appelées anches : clarinette, saxophone (anche simple) ; hautbois (anche double) ; les lèvres du trompettiste constituent les anches de son instrument.

Avec les instruments à percussion, la vibration est obtenue en frappant une membrane (tambourin, caisse claire, timbale), une plaque (xylophone)...

5.2. Émettre

Pour que l'instrument émette un son d'intensité acceptable, il faut que l'énergie de vibration de l'excitateur soit transmise efficacement à l'air environnant.

On dit alors qu'un **couplage est réalisé entre l'excitateur et l'air.**

Ce couplage peut être assuré par :

- une caisse de résonance (instruments à cordes) ;
- un tuyau (instruments à vent) ;
- un micro relié à un amplificateur (guitare électrique).

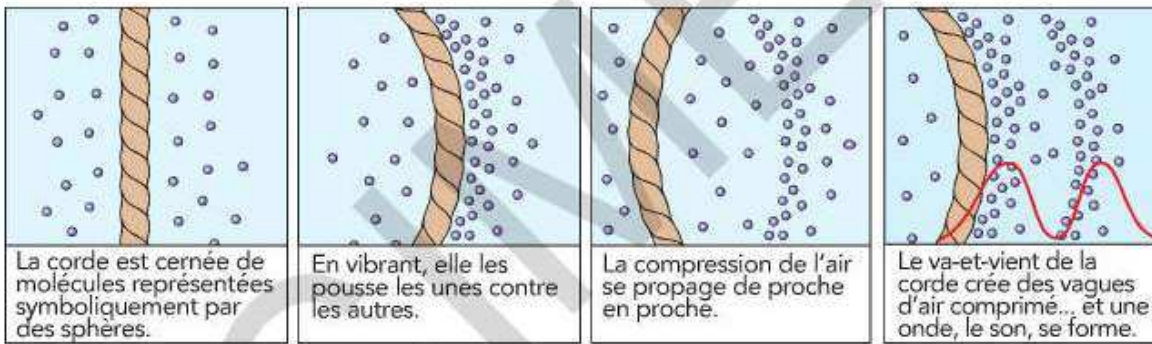
6. LES INSTRUMENTS A CORDES

On peut classer les instruments en trois familles qui sont les instruments à cordes, à vent et à percussion.

Pour la première de ces familles, la corde constitue le système excitateur qui fait vibrer l'instrument. Quels sont les différents modes de vibrations d'une corde?

6.1. Une note est née

Du bout du doigt, le guitariste a déplacé la corde pour la faire vibrer. Celle-ci se déforme alors d'avant en arrière et bouscule les molécules d'air autour d'elle. Ainsi, quand la corde avance, elle repousse les molécules devant elle, qui se retrouvent ratatinées les unes contre les autres. L'air est donc comprimé à l'endroit où vient de passer la corde, et les molécules cherchent aussitôt à retrouver leur espace vital en s'écartant les unes des autres. Elles repoussent alors leurs voisines comme des boules de billard et, de proche en proche, la zone de surpression se déplace. Le va-et-vient de la corde vibrante crée ainsi une succession de zones de surpression qui vont se déplacer comme des vagues dans la pièce : le son naît. Et le nouveau- né prend la forme d'une onde, dont les pics correspondent à chaque battement de la corde. Il vibre donc au même rythme. Aussi, la vitesse de vibration de la corde - autrement dit, le nombre de battements par seconde - détermine la fréquence du son, qui s'exprime en hertz (Hz). D'après F. MARTIN, . « Silence », Sciences & Vie Junior, n° 9, nov. 1989.



6.2. Ça pince, ça frappe ou ça frotte

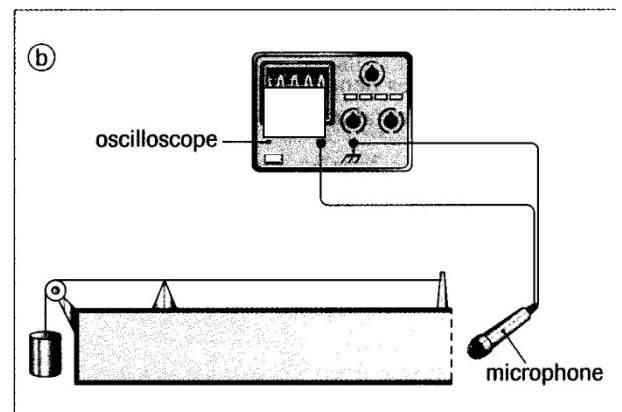
Il existe différentes manières de faire vibrer les cordes d'un instrument :

les cordes d'une guitare sont pincées avec les doigts, avec un médiator (dispositif permettant de pincer ou gratter les cordes d'un instrument, aussi appelé plectre) ou avec un onguet; les cordes du piano sont frappées par des petits marteaux; les cordes du violon ou d'un violoncelle sont frottées avec un archet-

6.3. Oscillations libres

a) Expérience

- Placer un microphone relié à un oscilloscope à mémoire devant la caisse de résonance
- Observer le signal sonore produit en pinçant la corde.

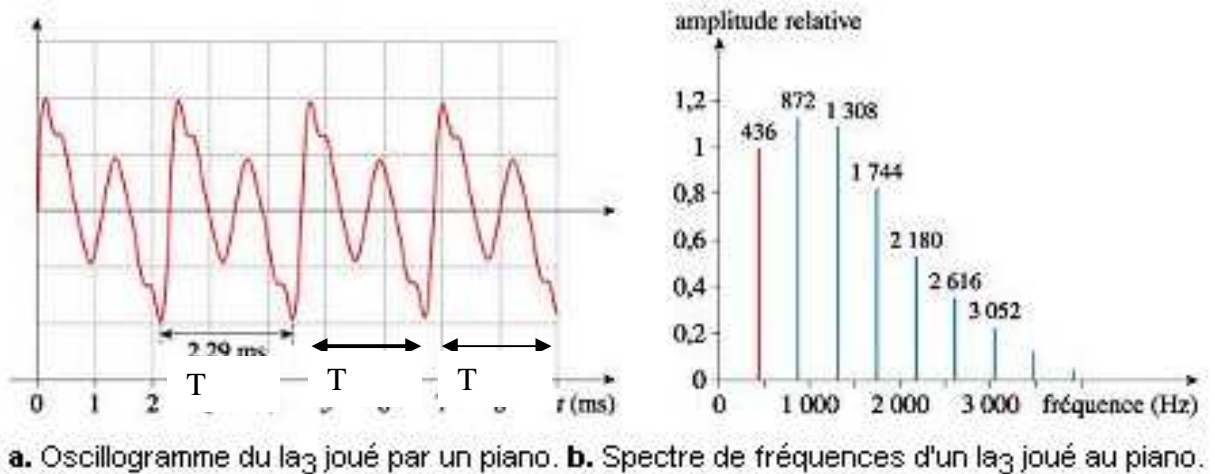


Corde de guitare placée sur une caisse de résonance

b) Observation et conclusion

Une corde pincée et livrée à elle-même **oscille librement**

Elle émet un son **non sinusoïdal** de fréquence **f_1 appelé fondamental ou fréquence propre (cf dessin ci-dessous)**

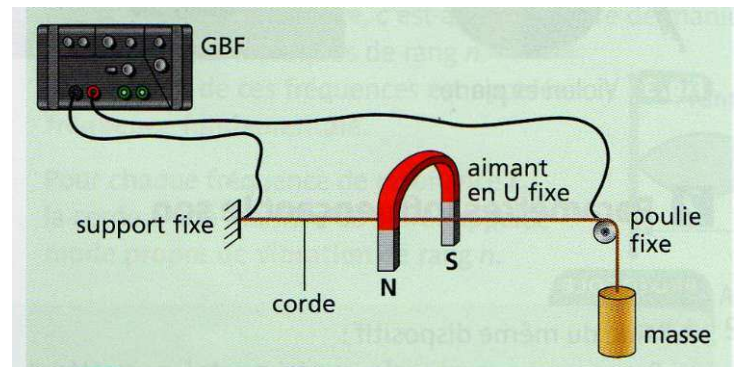


6.4. Oscillations forcées

cf vidéo

a) Expérience

- Réaliser le montage schématisé ci-contre.
- Faire circuler dans la corde un courant sinusoïdal.
- Observer le comportement de la corde quand on applique différentes fréquences du courant

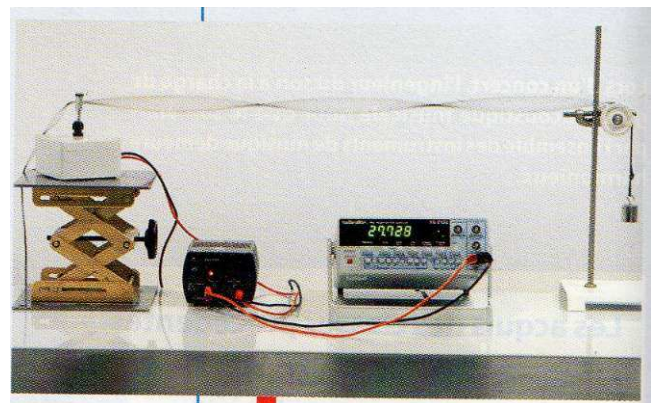


b) Observation et conclusion

La corde, parcourue par un courant alternatif et placée au voisinage d'un aimant, est soumise à la force de Laplace, également alternative, et de même fréquence que le courant : cette force transversale provoque le mouvement de la corde qui **subit des oscillations forcées.**

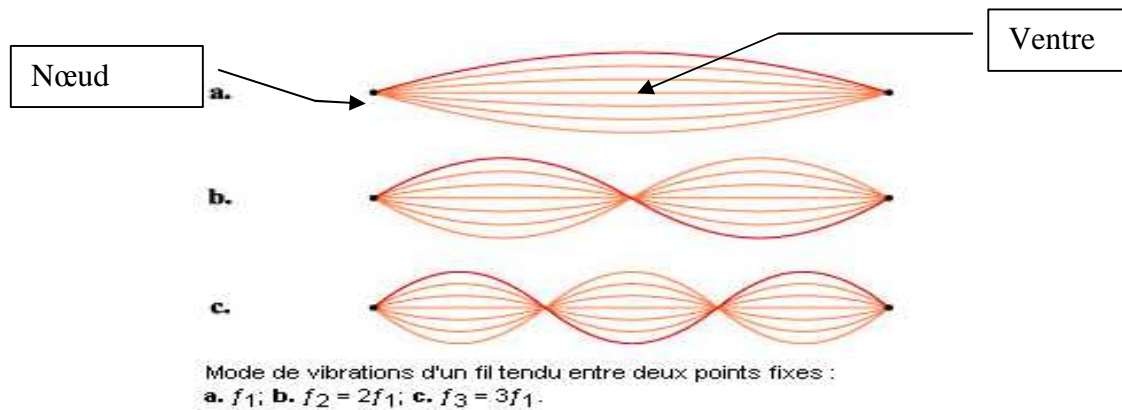
L'excitateur est le G.B.F.,

Le résonateur est la corde.



Pour des fréquences d'excitation quelconques, le mouvement de la corde a une très faible amplitude.

Cependant, **pour certaines valeurs de la fréquence d'excitation, multiples d'une fréquence f_1 et appelées fréquences propres**, la corde vibre avec une grande amplitude en formant un ou plusieurs fuseaux (résonance).



- À la résonance, on observe un nombre entier n de fuseaux identiques et stables (doc. ci-dessus).

- Les extrémités des fuseaux égaux sont immobiles (amplitude de vibration nulle) : ce sont des **nœuds** d'amplitude équidistants.

- Au milieu de l'intervalle entre les nœuds se trouvent les points dont **l'amplitude de vibration est maximale** : ce sont les **ventres** d'amplitude, également équidistants.

- Entre un nœud et un ventre, les points vibrent avec une amplitude intermédiaire.

- Il n'y a qu'un nombre limité de modes de vibration possibles ; c'est ce que l'on appelle **quantification des modes propres** de vibration d'une corde tendue, de longueur L donnée. On distingue :

- **Le mode fondamental** ou premier harmonique, pour lequel la corde vibre en un seul fuseau, il correspond à la fréquence f_1 . Cette fréquence f_1 est celle du son émis par la corde pincée et qui oscille ensuite librement ; **(cf 1)**

- Les harmoniques de rang n entier, pour lesquels la corde vibre en n fuseaux, et qui correspondent aux fréquences :

$$f_n = n.f_1$$

Remarques :

f_1 est appelé **fondamental**, ou **1er harmonique**, f_2 est appelé **2ème harmonique**.....

A la fréquence f_1 , la corde présente **1 ventre** et 2 nœuds

A la fréquence f_n , la corde présente **n ventres** et $n+1$ nœuds

7. INSTRUMENTS À VENT

Comment un orgue ou une flûte de Pan produisent-ils des sons ? Les instruments à vent ont-ils des points communs avec les instruments à cordes ?

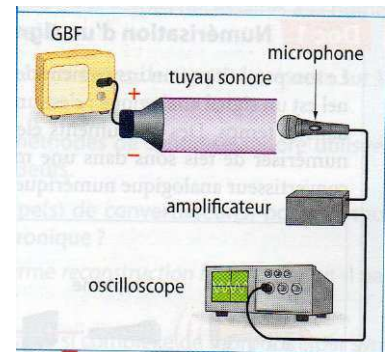
Pour la plupart des instruments à vent, le son est produit par la vibration d'une colonne d'air dans des tuyaux sonores.

Cette vibration est provoquée soit par les lèvres du musicien (trompette), soit par une anche (saxophone, hautbois), soit par un biseau (flûte).

Nous allons montrer dans cette partie comment vibre une colonne d'air dans un tuyau sonore et à quelles fréquences.

7.1. Expérience

- Prenons un tube transparent de longueur L , d'assez gros diamètre et ouvert aux deux extrémités.
- Excitons l'air qu'il contient.
- Placer à une extrémité un haut-parleur alimenté par une tension sinusoïdale délivrée par un G.B.F.
- Faire varier la fréquence du G.B.F. et repérer, à l'oreille et à l'aide d'un microphone extérieur, les fréquences pour lesquelles le son produit par le tuyau est le plus intense.



7.2. Observation et conclusion

Lorsqu'une colonne d'air est excitée de manière périodique, elle rentre en résonance, c'est-à-dire ne vibre de manière importante, que pour certaines fréquences f_n , appelées harmoniques de rang n .

La plus petite de ces fréquences est appelée **fréquence fondamentale**.

Ces vibrations résultent de la superposition d'ondes progressives se propageant dans l'air dans un sens et dans l'autre, et dont l'interférence n'est constructive qu'à ces fréquences de résonance.

Le résonateur (par exemple le tuyau pour un orgue) impose à l'onde d'avoir un **ventre de vibration à une extrémité ouverte** et un **nœud de vibration à une extrémité fermée** s'il y en a une.

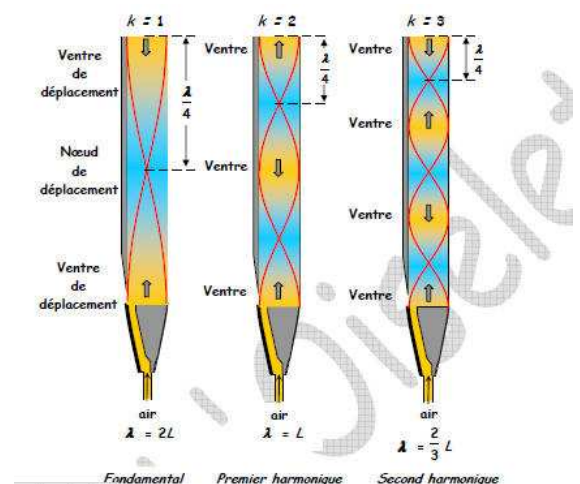
Le **ventre de vibration est un lieu de vibration d'amplitude maximale** et un **nœud est une zone de vibration d'amplitude nulle**.

- On a également :

$$f_n = n.f_1$$

Remarques :

A la fréquence f_1 , le tuyau présente 2 ventres et 1 nœud
à la fréquence f_n , la corde présente $n+1$ ventres et n nœuds



a) Relation entre la longueur d du tuyau et la longueur d'onde λ

- Les fréquences de résonance d'une colonne d'air de longueur L sont quantifiées et leurs valeurs dépendent de la longueur L : un tuyau sonore de longueur L est un résonateur à fréquences multiples.
- Les nœuds de vibration sont équidistants.

- Deux nœuds ou 2 ventres consécutifs sont séparés d'une

$$d = \frac{\lambda}{2} \quad \text{distance}$$

- La longueur L du tuyau correspond à un nombre entier n de demi-longueur d'onde :

$$L = n \cdot \frac{\lambda}{2}$$

Remarque :

Dans le cas particulier d'un tuyau fermé à une extrémité, un ventre de vibration se trouve à l'embouchure et un nœud à l'extrémité fermée ; on obtient alors une condition différente :

$$L = (2 \cdot n + 1) \cdot \frac{\lambda}{4}$$

b) La relation entre la célérité v du son et la température T de l'air

$$v = \sqrt{\frac{\gamma \cdot R \cdot T}{M}}$$

T est la température absolue de l'air en kelvins,

$\gamma = 1,40$ est un nombre sans unité caractéristique des gaz présents dans l'air,

R = 8,314 J.mol⁻¹.K⁻¹ est appelée constante des gaz parfaits,

M = 28,9 g.mol⁻¹ est la masse molaire moyenne de l'air.

À température de 20°C la célérité du son vaut $v = 344 \text{ m.s}^{-1}$

8. INSTRUMENTS À PERCUSSION

8.1. Définition

Un instrument à percussion est un instrument de musique dont l'émission résulte de la frappe ou du grattage d'une membrane ou d'un matériau résonant.

Alors qu'une corde est un système vibrant à une dimension, les peaux tendues sur des toms de batterie, les lames de claviers et les cloches, sont des systèmes à deux dimensions.

- La première étude physique de ces systèmes a été menée au XIXe siècle par Ernest Chladni sur des plaques vibrantes saupoudrées de sable (Fig. 1).



Un instrument à percussion joue-t-il une note de musique?

8.2. Spectre inharmonique

- La plupart des instruments à percussion produisent des sons qui ne sont pas périodiques.

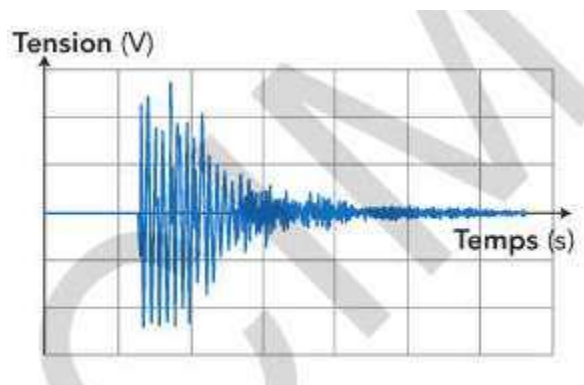
Dans ce cas, l'énergie sonore est répartie sur des fréquences dont les valeurs n'ont pas de relations entières ou fractionnaires entre elles. On dit que l'on a un spectre « inharmonique ».

- Ce type de spectre n'engendre pas de sensation de hauteur bien nette, voire, comme c'est le cas pour certaines cloches, peut évoquer plusieurs hauteurs simultanément.

8.3. Exemples d'instruments à percussion

a) La caisse claire

La caisse claire est un des éléments principaux d'une batterie. Sur la caisse, en bois ou en métal, on fixe deux membranes, une de percussion et l'autre de résonance.



Signal électrique à la sortie d'un microphone correspondant au son émis par une caisse claire de batterie.



b) La timbale

- La timbale est formée d'une membrane circulaire; cette « peau » est aujourd'hui fabriquée en mylar, un polymère synthétique. Elle est tendue sur une coque (ou fût) de forme quasi hémisphérique. Pour produire le son recherché, le timbalier frappe sur la peau avec une ou plusieurs « mailloches ». Un petit trou situé dans le fond du fût de la timbale garantit que lorsque l'instrument est au repos, les pressions de part et d'autre de la membrane sont égales (sinon, la peau serait trop tendue et vibrerait mal sous la frappe du timbalier).

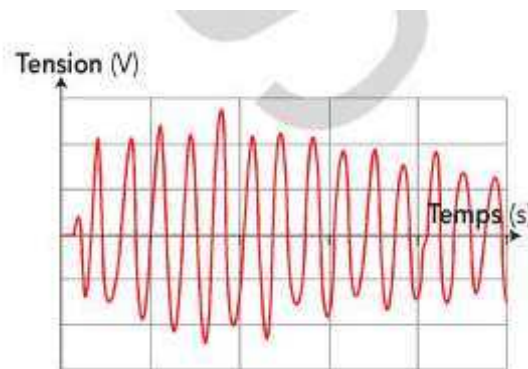
- Les timbales ont une fonction rythmique, bien sûr, mais elles ont aussi une couleur musicale.

- Les timbales engendrent une sensation de hauteur un coup de timbale est perçu comme plus ou moins aigu - qui, sans être aussi nette que celle d'une flûte ou d'un piano, n'en est pas moins réelle.

Lorsqu'on joue de la timbale, on constate que cette sensation de hauteur est d'autant plus perceptible que le coup porté sur la peau est proche du bord (si l'on frappe la membrane au centre, on obtient un son plus sourd). »



Coupe d'une timbale : schématisation du trajet du son en bleu.



Signal électrique à la sortie d'un microphone correspondant au son émis par une timbale.