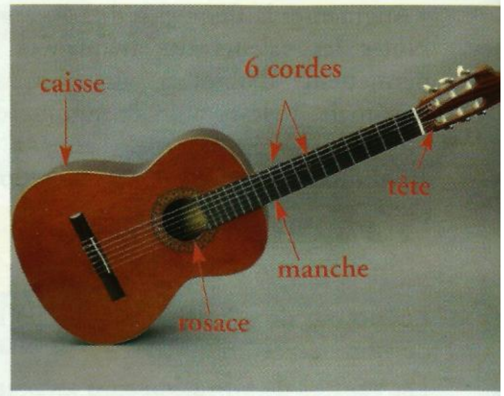
Les sons résultent de vibrations se propageant le plus souvent dans l'air. Étudions comment un instrument à cordes produit un son.

1. Vibration d'une corde tendue

Une guitare comporte trois parties : six cordes parallèles tendues le long d'un manche, une caisse en bois de forme particulière et percée d'une rosace ; un manche dont la tête permet de régler la tension des cordes [Doc. 1].



Doc. 1 *Les parties d'une guitare.*

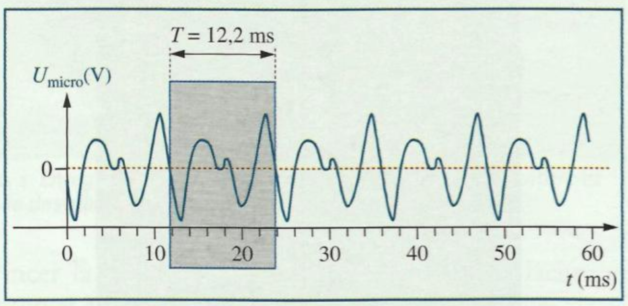
1.1 Production d'un son par un instrument à cordes

Lorsqu'un guitariste pince une corde de sa guitare, cette corde entre en vibration. Elle est le siège d'**oscillations libres**. Les vibrations sont transmises à la caisse et à l'air qu'elle contient puis à l'air environnant.

Au § 1 (page 70) on a étudié le son produit par la vibration d'une corde de guitare.

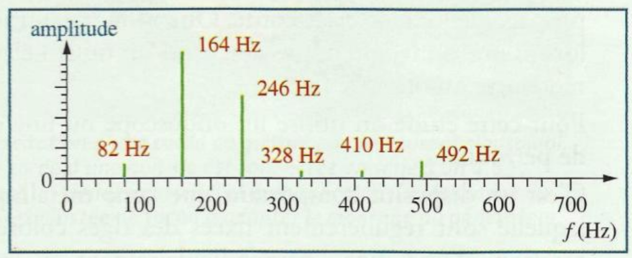
Le son émis par une corde à la même fréquence que les vibrations de cette corde.

L'observation de l'enregistrement montre que le son produit par une guitare n'est pas un son pur [Doc. 2]. L'analyse de FOURIER de ce son met en évidence la présence de nombreux harmoniques [Doc. 3].



Doc. 2 *Le son émis par la plus grosse corde d'une guitare n'est pas pur, car le signal obtenu n'est pas sinusoïdal. Il est périodique de période T = 12,2 ms et de fréquence*

$f = \frac{1}{T} = 82$ Hz.



Doc. 3 *Analyse de FOURIER de l'enregistrement précédent. On peut observer la présence de nombreux harmoniques : toutes les fréquences présentes sont multiples de 82 Hz.*

La fréquence du son produit par une corde dépend de la tension et de la longueur de cette corde.

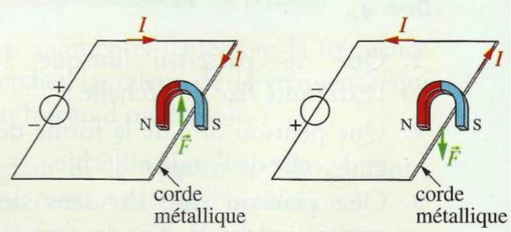
Avant de jouer, le guitariste règle la fréquence de vibration de chaque corde en ajustant la tension de cette corde. On dit qu'il accorde sa guitare.

Le fondamental est aussi le premier harmonique :
$f_1 = 1\,f_1$.

1.2 Modes de vibration d'une corde

En plaçant un aimant à proximité d'une corde parcourue par un courant d'intensité sinusoïdale on peut imposer les vibrations de cette corde. En effet, la corde est alors soumise à la force de LAPLACE qui provoque un déplacement transversal de la corde de même fréquence que le courant [Doc. 4]. La corde est alors le siège d'**oscillations forcées**.

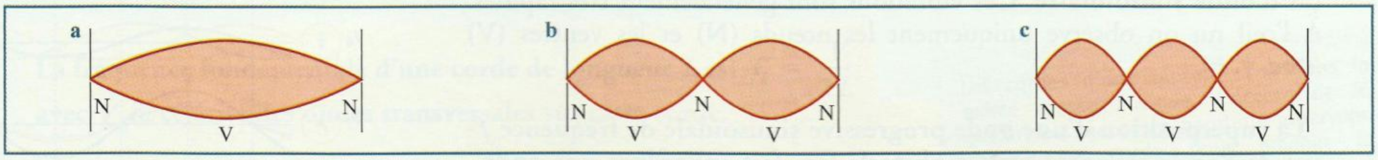
Pour certaines fréquences d'excitation, la corde vibre avec une grande amplitude. On observe un seul fuseau pour la plus petite de ces fréquences, notée f_1 et appelée **fréquence fondamentale** ou premier harmonique. Le § 2 (page 70) montre que cette fréquence est la même que celle des oscillations libres obtenues lorsque la corde est pincée. Pour les fréquences



Doc. 4 *Le sens de la force de LAPLACE dépend du sens du courant dans la corde.*

multiples de f_1, la corde vibre en formant plusieurs fuseaux. Ainsi, lorsque $f_n = n \cdot f_1$ avec n entier naturel ; la corde vibre en n fuseaux **[Doc. 5]**. Cette fréquence est l'**harmonique** de rang n.

Le *document* 5 montre l'état de la corde dans chaque mode propre. Chaque mode propre correspond à un harmonique. Les fréquences des harmoniques sont des multiples de la fréquence du fondamental $f_n = n \cdot f_1$ avec n entier naturel non nul.



Doc. 5 *Modes de vibration d'une corde tendue entre deux points fixes avec les nœuds (N) et les ventres (V) de vibration.*
a. *Dans le mode fondamental la corde vibre avec un fuseau et $f = f_1$.*
b. *et* **c.** *Dans les modes harmoniques, la corde vibre avec un nombre de fuseaux égal au rang de l'harmonique.*

Lorsque la corde de la guitare est en vibration, ses extrémités sont immobiles car la corde est tendue entre deux points fixes. On parle de **nœuds de vibration** (ou nœuds d'amplitude). Dans les modes harmoniques il y a aussi des nœuds entre les extrémités. Au milieu de chaque intervalle entre deux nœuds consécutifs se trouvent les points dont l'amplitude de vibration est maximale, ce sont des **ventres de vibration** (ou ventres d'amplitude) **[Doc. 5]**.

La superposition des divers modes de vibration permet d'expliquer le spectre obtenu lors de l'analyse de FOURIER.

Le son produit par la vibration d'une corde, lorsqu'elle oscille librement, résulte de la superposition des vibrations de divers modes propres de cette corde.

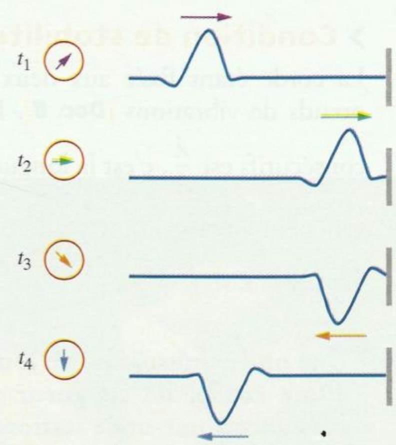
2. Interprétation ondulatoire

La corde de la guitare est un milieu vibrant limité. Observons ce qui se passe lorsqu'une onde parvient aux extrémités de la corde.

2.1 Réflexion d'une onde sur un obstacle fixe

Le § 3 (page 71) montre qu'une onde transversale se propageant le long d'une corde se réfléchit sur l'extrémité fixe de cette corde **[Doc. 6]**.

Lorsqu'une onde transversale se réfléchit à l'extrémité fixe d'une corde il apparaît une onde réfléchie, de forme renversée, qui se propage à la même vitesse mais en sens contraire par rapport à l'onde incidente.



Doc. 6 *Réflexion sur un obstacle fixe.*
À t_1 et t_2 : *l'onde incidente se propage vers la droite, la déformation est vers le haut.*
À t_3 et t_4 : *l'onde réfléchie se propage vers la gauche, la déformation est vers le bas.*

2.2 Réflexion d'une onde périodique sinusoïdale sur un obstacle fixe, onde stationnaire

> Onde incidente et onde réfléchie

Lorsqu'une onde périodique sinusoïdale se propage sur une corde, l'onde réfléchie est, elle aussi, périodique sinusoïdale. La fréquence f de l'onde réfléchie est la même que celle de l'onde incidente.

> Onde stationnaire

L'aspect de la corde résulte de la superposition de l'onde incidente et de l'onde réfléchie. Comme les célérités de ces ondes sont les mêmes, ces deux ondes ont la même longueur d'onde λ **[Doc. 7. a]**. Sur ce **document** on observe que certains points sont constamment immobiles tandis que d'autres vibrent avec une grande amplitude. Ce sont des nœuds et des ventres de vibration.

Il y a vibration de la corde sans propagation de l'onde, on parle dans ce cas d'**onde stationnaire**. Ces vibrations sont généralement très rapides. À l'œil nu on observe uniquement les nœuds (N) et les ventres (V) **[Doc. 7. b]**.

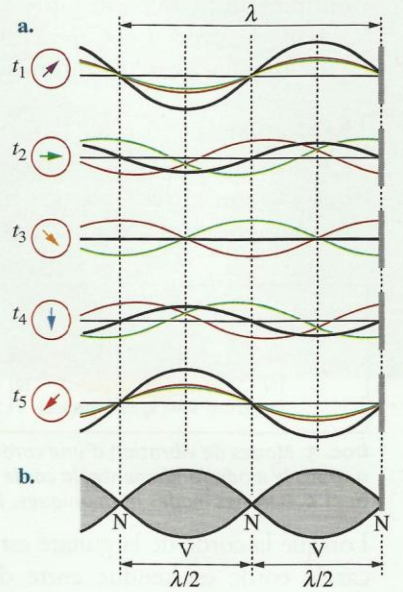
La superposition d'une onde progressive sinusoïdale de fréquence f et de l'onde réfléchie sur un obstacle fixe fait apparaître une onde stationnaire de même fréquence f.

Une telle onde stationnaire apparaît pour toute fréquence de l'onde incidente : il n'y a pas de quantification des fréquences.

Lorsque l'onde stationnaire est établie sur la corde, l'extrémité fixe est un nœud de vibration. La distance séparant deux nœuds consécutifs ou deux ventres consécutifs est égale à la moitié de la longueur d'onde de l'onde incidente ou de l'onde réfléchie **[Doc. 7. b]**.

Une onde stationnaire présente des nœuds et des ventres de vibration.

La distance entre deux nœuds consécutifs, ou entre deux ventres consécutifs, est égale à $\frac{\lambda}{2}$, demi-longueur d'onde de l'onde incidente.



Doc. 7 *Onde stationnaire.*
a. *Le trait noir représente la corde en vibration à différentes dates. Les ondes incidentes et réfléchies sont symbolisées par des traits fins verts et rouges.*
b. *À l'œil nu on observe les nœuds (N) et les ventres (V) de vibration.*

2.3 Réflexion sur deux obstacles fixes

Une corde de guitare est fixée à ses deux extrémités. Lorsqu'une onde se propage sur cette corde, elle est réfléchie de nombreuses fois aux extrémités. Dans certaines conditions on obtient des ondes stationnaires.

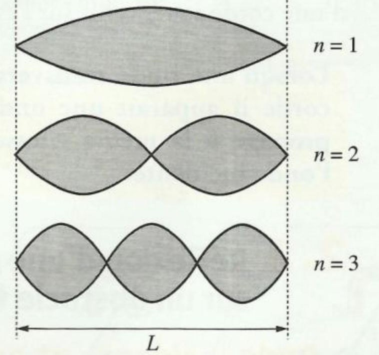
> Condition de stabilité

La corde étant fixée aux deux extrémités, ses deux extrémités sont des nœuds de vibrations **[Doc. 8]**. De plus, la distance séparant deux nœuds consécutifs est $\frac{\lambda}{2}$, c'est la longueur d'un fuseau.

On peut observer une onde stationnaire de n fuseaux sur la corde de longueur L si $L = n\frac{\lambda}{2}$.

Une onde sinusoïdale de longueur d'onde λ se propageant le long d'une corde, de longueur L, fixée aux deux extrémités, donne naissance à une onde stationnaire de n fuseaux si :

$$L = n \cdot \frac{\lambda}{2} \text{ avec } n \text{ entier naturel non nul.}$$



Doc. 8 *Réflexion sur deux obstacles fixes. Il doit y avoir un nombre entier de fuseaux sur la corde pour observer une onde stationnaire.*

> Fréquences propres

En notant V la célérité de l'onde sinusoïdale le long de la corde, les fréquences des ondes pouvant donner naissance à des ondes stationnaires sont telles que $f_n = \frac{V}{\lambda} = n \cdot \frac{V}{2L}$.

Ces fréquences sont des multiples de la fréquence fondamentale $f_1 = \frac{V}{2L}$.

Ce sont les fréquences propres de la corde.

La fréquence fondamentale d'une corde de longueur L est $f_1 = \frac{V}{2L}$ avec V la célérité des ondes transversales sur cette corde.

Les fréquences propres de la corde sont $f_n = n \cdot \frac{V}{2L} = n \cdot f_1$.

Elles sont quantifiées.

Les cordes d'une guitare n'ont pas la même masse linéique. L'accord de la guitare est réalisé en modifiant la tension de chaque corde pour amener la fréquence fondamentale des vibrations à la valeur désirée.

> Célérité le long de la corde et hauteur du son produit

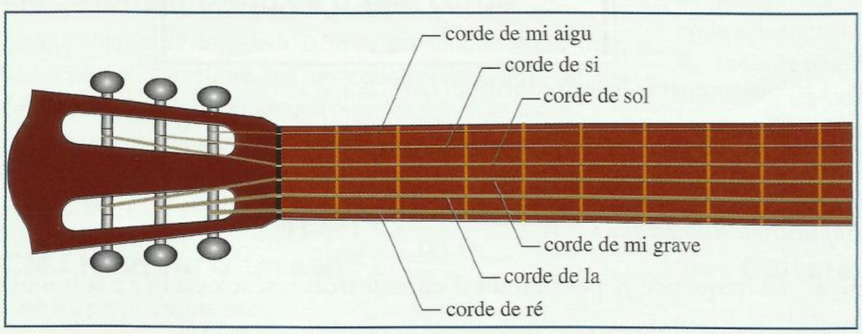
La célérité d'une onde transversale le long d'une corde est donnée par $V = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$.

Dans cette relation T est la tension de la corde (en N) et μ est sa masse linéique (en kg . m^{-1}). Alors $f_n = \frac{n}{2L} \cdot \sqrt{\frac{T}{\mu}}$.

Les fréquences propres d'une corde dépendent de la tension de la corde, de sa masse linéique et de sa longueur.

2.4 Les notes produites par une guitare

Les résultats précédents permettent d'expliquer la constitution et le fonctionnement d'une guitare. Celle-ci comporte des cordes de masses linéiques différentes. Cela permet de produire des sons dans des gammes de fréquences différentes **[Doc. 9]**.



Doc. 9 *Note émise par chacune des cordes de la guitare lorsqu'elle vibre sur toute sa longueur.*

L'accord d'une guitare est effectué en modifiant la tension de chaque corde. Avec une même corde on peut obtenir des sons de hauteurs différentes en modifiant la longueur de la corde pouvant vibrer. Pour cela le guitariste plaque la corde contre le manche de la guitare **[Doc. 10]**.

Doc. 10 *Pour changer la hauteur du son produit, le guitariste modifie la longueur utile de la corde.*