# Propagation d'un signal. Présentation des ondes progressives.

## 1. Observation sur un film d'introduction.

### 1.1. Présentation du système et du film.

L'échelle de perroquet est un système composé de barreaux métalliques disposés à intervalle régulier le long d'une lame métallique.
Lorsque la lame se tord, les barreaux suivent la rotation locale induite par cette torsion et permette de visualiser la déformation de la lame métallique. On peut étudier l'angle de torsion de la lame métallique en relevant la position angulaire du barreau positionné au point observé.
Lorsqu'on observe le film, on suit l'évolution temporelle d'une déformation se déplaçant le long de l'échelle de perroquet.

### 1.2. Observations sur le film. (prise de notes)

## 2. Qu'est-ce qu'une onde ? Onde progressive ?

### 2.1. Définition d'une onde.

**Définition** : **Une onde** est une perturbation d'un milieu, générée par **une source**, et qui se déplace dans l'espace, sans qu'il y ait déplacement global de la matière qui constitue le milieu de propagation.

- La source a un rôle primordial ; elle donne un certain nombre de caractéristiques à l'onde, comme sa forme, son éventuelle périodicité, son amplitude, la nature de l'onde (lumineuse, mécanique, électrique, …).
- Le milieu va déterminer comment évolue le phénomène, à quelle vitesse, dans quelle direction, s'il est déformé par la dispersion ou atténué par l'absorption d'énergie au cours de la propagation.

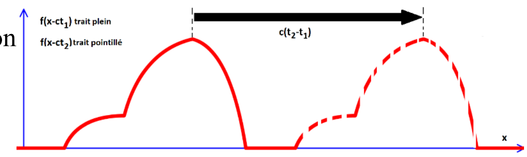
### 2.2. Onde progressive. Célérité.

Lorsqu'on observera une onde se propageant :

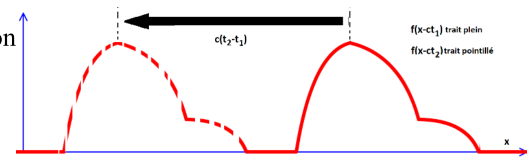
- Le long d'un axe de direction fixe (par exemple Ox) à vitesse constante. On parle alors de propagation **unidimensionnelle linéaire.**
- Sans subir de déformation ou pour laquelle on fera l'hypothèse que la déformation est négligeable, ou pour laquelle on prendra pour modèle une onde ne se déformant pas. On parle alors de propagation **non dispersive.**

On la qualifiera d'onde progressive et on pourra alors écrire que le paramètre physique (par exemple p) variant en fonction du temps t et de la variable spatiale (par exemple x) s'exprime comme une fonction d'une unique variable couplant le temps et l'espace :

- $p(x,t)=f(x-ct)=g\left(t-x/c\right)$ lorsque la propagation s'effectue dans le sens croissant de x.



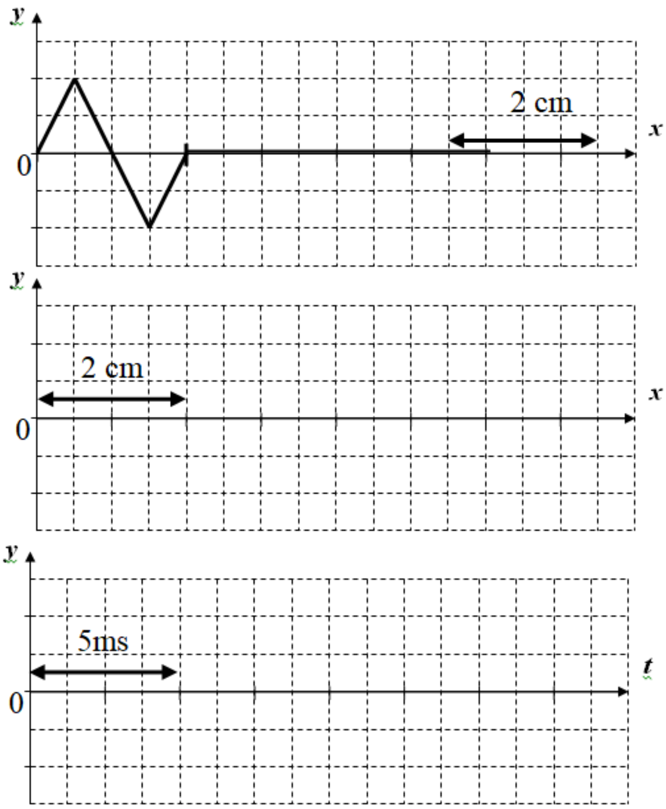

- $p(x,t)=f(x+ct)=g\left(t+x/c\right)$ lorsque la propagation s'effectue dans le sens décroissant de x.




- On nomme alors c la célérité de l'onde, elle est homogène à une vitesse (m.s$^{-1}$).

Si l'onde parcourt la distance d pendant l'intervalle de temps δt, sa célérité est : $\boxed{d=c\,\delta t}$

**<u>AD 1 : onde progressive unidimensionnelle non dispersive :</u>**




On donne ci-contre la représentation graphique d'une OPUND (onde progressive unidimensionnelle non dispersive) dans la direction et dans le sens direct de l'axe (Ox) à l'instant initial t=0. On donne la célérité de l'onde $c=2 m.s^{-1}$.

1. Effectuer la représentation graphique de l'onde le long de l'axe (Ox) à l'instant $t_1=20ms$.
2. Effectuer la représentation graphique de l'onde en fonction du temps en x=3cm.

### *2.3. Onde progressive sinusoïdale. (prise de notes)*

**<u>AD 2 : onde progressive unidimensionnelle non dispersive sinusoïdale :</u>**

On considère l'onde exprimée par $s(x,t)=5\sin(2{,}4.10^3\pi t-7{,}0\pi x+0{,}7\pi)$ où x et t sont exprimés respectivement en mètres et en secondes.

1. Évaluer la période T, la fréquence f, la pulsation ω, la longueur d'onde λ, le nombre d'onde k et la vitesse de propagation ?

Une onde sinusoïdale se propage dans la direction de l'axe (Ox) dans le sens de x croissant avec la célérité c. En x = 0, on nous donne $s(0,t)=A\cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right)$.

2. Déterminer l'expression de s(x, t) et représenter s(x, 0).

Une onde sinusoïdale se propage dans la direction de l'axe (Ox) dans le sens de x décroissant avec la célérité c. À t = 0, on nous donne $s(x,0)=B\sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right)$.

3. Déterminer l'expression de s(x, t). Représenter sur un même graphique les variations en fonction du temps t de $s(0,t)$ ; $s\left(-\lambda/4,t\right)$ et $s\left(-\lambda/2,t\right)$. Comment caractérise-t-on le déphasage temporel entre ces signaux ?

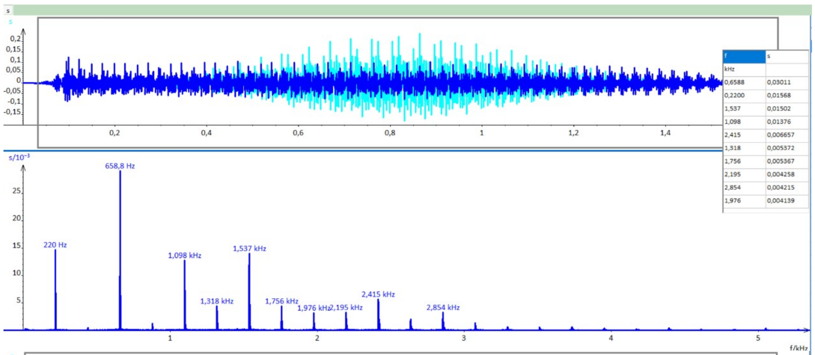
### *2.4. Déphasage introduit par la propagation d'une onde progressive sinusoïdale entre deux points. (prise de notes).*

## 3. Exemples de signaux.

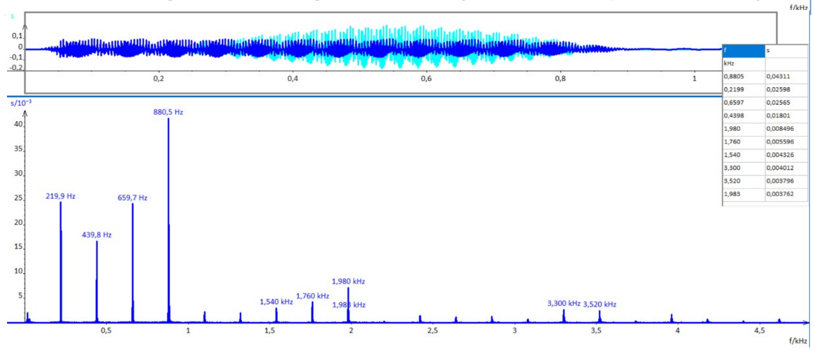
### 3.1. Les signaux acoustiques.

Les figures suivantes présentent l'allure du signal sonore enregistré avec Audacity pour les instruments suivants :

Clarinette jouant un La (220Hz)




Cor anglais jouant un La (220Hz)




- Pour un signal acoustique, quelles sont les grandeurs physiques mesurables couplées support de l'onde ? Quelles sont les unités associées à ces grandeurs ? Quelle échelle de volume sonore est utilisée usuellement ? Connaissez-vous des ordres de grandeur de ces amplitudes et le lien avec les grandeurs physiques couplées dans la propagation ?
- Quel est le domaine de variation des fréquences dans le domaine acoustique ?
- Pour les sons de note (hauteur) connue, comment détermine-t-on à l'aide du spectre la note jouée ?
- Comment peut-on alors exprimer les autres fréquences dans le spectre en fonction de la fréquence de la note jouée ? Quel vocabulaire désigne alors ces autres composantes du son enregistré ?

Quelques compléments, en fonction de votre culture musicale :

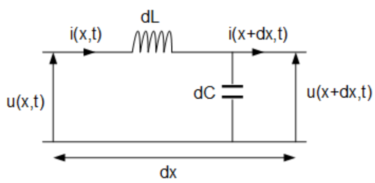
- Quel vocabulaire désigne les différences entre les sons émis par les différents instruments jouant pourtant une même note ? Comment ces différences de sensations sonores se traduisent-elles dans le spectre ?
- Rappeler un ordre de grandeur de la vitesse du son dans l'air. L'air est-il un milieu dispersif ? Absorbant ?

### 3.2. Les signaux électriques et électro-magnétiques.

#### a. <u>Exemple de signaux électriques dans un câble coaxial.</u>

Dans un câble coaxial, les grandeurs physiques support de l'onde électrique sont la tension U(t,x) entre le cœur et la gaine du câble et l'intensité électrique I(t) qui circulent dans ce câble.

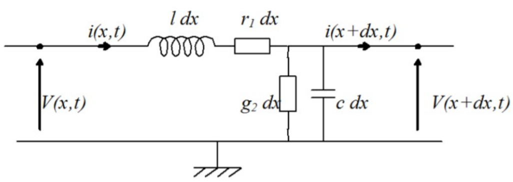
Dans une modélisation simple, où le câble est vu comme un ensemble de réseau LC, l'onde se propage à la vitesse de la lumière quelle que soit sa fréquence. Dans cette modélisation, le câble coaxial n'est pas dispersif.




Dans une modélisation tenant compte du caractère non idéal du câble, on introduit les pertes par effet Joule lors de la propagation du courant dans l'âme et la gaine et les pertes par fuite entre le conducteur et la gaine.

Dans cette modélisation :

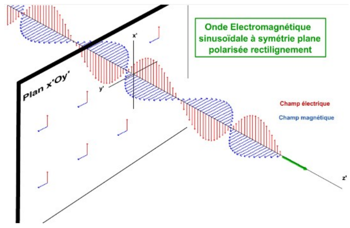
➢ la vitesse d'une onde sinusoïdale de pulsation ω s'exprime $v_\varphi(\omega)=\frac{c}{\sqrt{\omega^2-\omega_P^2}}$ le câble coaxial est alors un milieu dispersif.



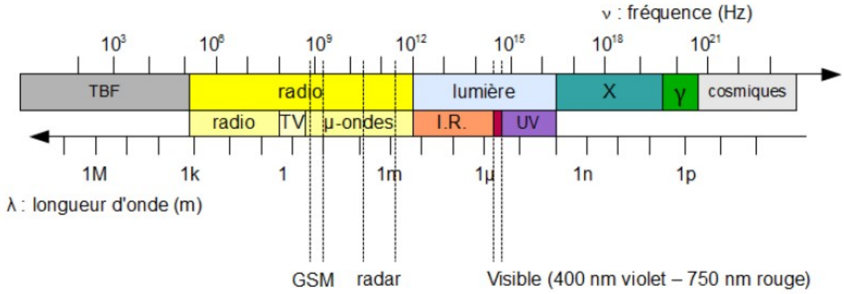
- L'onde est atténuée par absorption d'énergie, son amplitude évolue selon la loi $a(x)=a_O epx\left(-\frac{x}{L}\right)$ où L la distance caractéristique diminue lorsque les pertes énergétiques augmentent.

**b. <u>Exemple de signaux électromagnétiques (rappel).</u>**

Pour les ondes électromagnétiques, les propriétés physiques qui évoluent périodiquement dans le temps et l'espace lors de la propagation sont les champs électrique  et magnétique $\vec{B}$
Elles se propagent dans le vide à la vitesse de la lumière dans le vide notée $c=3{,}00.10^8\, m\cdot s^{-1}$.




Les ondes électromagnétiques sont regroupées en différentes sous-familles qui ont été nommées au fur et à mesure de leur découverte. On peut les visualiser sous la forme d'un graphique donnant le nom du domaine ondulatoire en fonction de la longueur d'onde (dans le vide) $\lambda_O$ de l'onde concernée.




**<u>Exemple de milieu non dispersif dans lesquels les ondes électromagnétiques présentent une vitesse constante quelle que soit la longueur d'onde :</u>** le vide pour lequel la vitesse est égale) $c=3.10^{8} m.s^{-1}$, l'air dans les couches basses de l'atmosphère, l'indice optique est quasi constant et présente un écart de l'ordre de $10^{-4}$ par rapport à une valeur unitaire.
**<u>Exemple de milieu dispersif dans lesquels les ondes électromagnétiques sinusoïdales présentent une vitesse dépendant de la longueur d'onde :</u>** les plasma dilués (par exemple l'ionosphère pour laquelle certaines fréquences ne peuvent tout simplement pas se propager), les guides d'ondes (comme les fibres optiques multimodales par exemple, là encore en dessous d'une certaine fréquence aucun mode de propagation n'est possible).

## <u>Capacités exigibles</u>

- Prévoir, dans le cas d'une OPUND, l'évolution temporelle en un point donné.
- Prévoir, dans le cas d'une OPUND, l'état ondulatoire à un instant donné.
- Écrire les formes mathématiques décrivant une **onde progressive** (en précisant le sens de propagation : sens des x croissants ou décroissants)
- Écrire les formes mathématiques décrivant une **onde progressive sinusoïdale**.
- Pour une onde progressive sinusoïdale, établir la relation entre la fréquence, la longueur d'onde et la célérité.
- Relier le déphasage entre les signaux perçus en deux points distincts au retard dû à la propagation.
- Identifier les grandeurs physiques correspondant a des signaux acoustiques, électriques, électromagnétiques.

# Phénomène d'interférences à deux ondes

## 1. Interférence entre deux ondes acoustiques ou mécaniques.

### *1.1. Cadre de l'étude. (prise de notes).*

### *1.2. Superposition des deux ondes sinusoïdales synchrones. (prise de notes)*

**Conclusion :** L'amplitude du signal résultant de la superposition de deux ondes mécaniques ou sonores sinusoïdales synchrones s'exprime en fonction des amplitudes $a_1$ et $a_2$ des deux ondes et du déphasage $\varphi_{2/1}$ de la seconde onde par rapport à la première par la relation : $a_T=\sqrt{a_1^2+a_2^2+2a_1a_2\cos(\varphi_{2/1})}$

### *1.3. Condition d'interférences parfaitement constructives et parfaitement destructives. (prise de notes)*

**AD 1 : interférence entre deux ondes sonores.**

Deux sources sonores $S_1$ et $S_2$ en phase génèrent des ondes sinusoïdales de longueur d'onde $\lambda$ = 50 cm et de même amplitude A. $S_1$ est placée à l'origine de l'axe x et $S_2$ est placée en $x_2$ sur le demi-axe (Ox)

1. Déterminer à quel(s) endroit(s) placer $S_2$ pour qu'il y ait interférences constructives en $x_1$= 10 cm.
2. Même question avec des interférences destructives en $x_1$ = 10 cm.
3. On suppose que la seconde source est en $x_2$ = +70 cm. Déterminer l'interfrange, c'est-à-dire la distance entre deux points successifs dans le même état interférentiel.

## 2. Interférence entre deux ondes lumineuses.

### *2.1. Cadre de l'étude. Introduction de la différence de marche. (prise de notes)*

**Définition** : On définit le chemin optique comme la distance qu'aurait parcouru la lumière dans le vide pendant le temps qu'elle a mis à parcourir le trajet de $S_1$ en M, on le note $(S_1M)$.

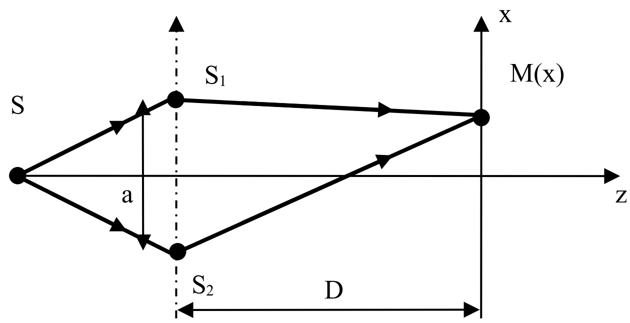
**Définition** : On définit la différence de marche entre les deux ondes par : $\delta_{1/2}(M)=(S_1M)-(S_2M)$ et on la relie au déphasage entre les deux ondes en un point par : $\varphi_{2/1}=\frac{2\pi}{\lambda_O}\delta_{1/2}+\varphi_{2/1,sources}$

### *2.2. Intensité lumineuse produite lors d'une expérience d'interférence. (prise de notes)*

### *2.3. Exemple du dispositif des trous d'Young.*

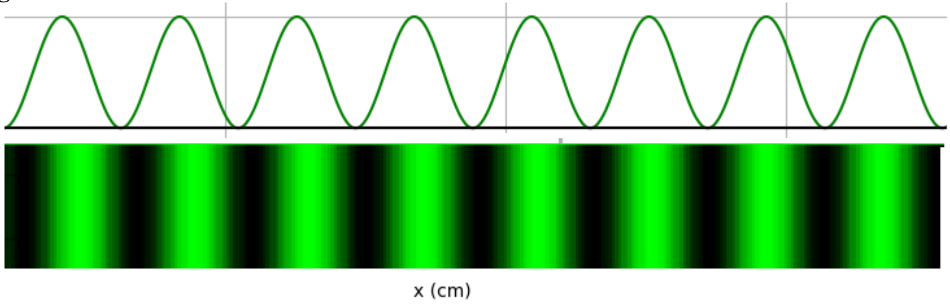
**a. Présentation du dispositif.**

On considère un point source primaire S qui éclaire avec une lumière monochromatique un écran percé de deux trous.
Un phénomène de diffraction permet alors à la lumière d'aller éclairer les points M situés sur un écran de projection à une distance D derrière le plan contenant les deux trous qui jouent donc le rôle de sources secondaires $S_1$ et $S_2$.




**b. Détermination de la différence de marche**

**c. Figure d'interférence.**



## 3. Ondes stationnaires.

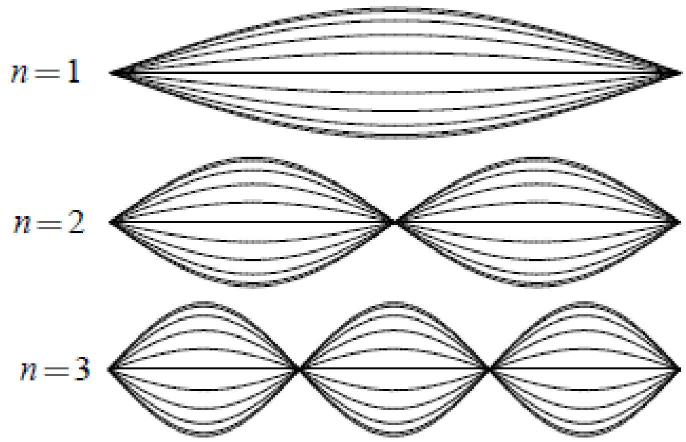
### 3.1. Introduction sur le système de la corde de Melde.

On tend une corde de masse linéique μ connue à l'horizontale sur une longueur L entre la lame d'un vibreur et une poulie. La tension de la corde est déterminée par la masse *m* que l'on accroche à l'extrémité pendante.


Le vibreur est alimenté par un générateur de basses fréquences (GBF) et il impose à l'extrémité de la corde un mouvement sinusoïdal d'amplitude de l'ordre de quelques millimètres et dont la fréquence *f* se règle sur le GBF.Lorsqu'on augmente progressivement *f* , on constate que la corde prend, pour certaines fréquences particulières, un mouvement d'amplitude très supérieure à l'amplitude du vibreur, pouvant valoir une dizaine de centimètres.

- Quel est le phénomène observé sur le mouvement de la corde pour ces fréquences particulières ?
- Quel lien apparait entre les fréquences $f_n$ des résonnances successives ?
- A la fréquence de résonnance $f_n$, quelle est la forme observée en lumière naturelle ? A quelles positions le long de la corde attribueriez-vous les noms de « nœuds de vibration » et « ventres de vibration »
- Comment pourrait-on procéder pour observer la forme prise en instantané par la corde ? En utilisant le procédé en question, quelle forme prend la corde instantanément ? Quelle est alors le lien entre la période spatiale $\lambda_n$ de la forme prise par la corde et la longueur de cette dernière ?

Fuseaux observés en lumière naturelle et formes instantanées de la corde en éclairage stroboscopique.

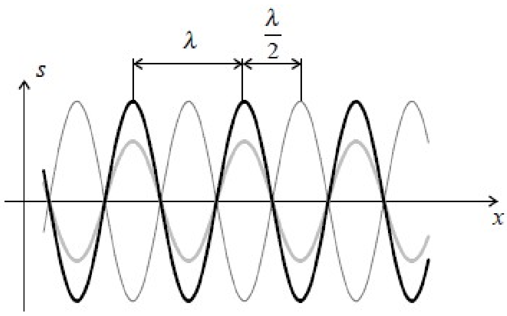



### 3.2. Définition et propriétés d'une onde stationnaire.

**<u>Définition</u>** :On appelle onde stationnaire unidimensionnelle une onde de la forme $s(x,t)=A\cos(2\pi ft+\varphi)\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x+\psi\right)$

pour laquelle $\lambda=\frac{c}{f}$ où c la célérité des ondes progressives dans le milieu étudié.

Elle est nommée ainsi car elle ne se propage pas dans le milieu mais génère des mouvements périodiques selon un schéma spatial bien défini et immobile dans le milieu étudié décrit par les nœuds et les ventres.




Onde stationnaire représentée à $t_1$ (en noir), $t_2$ (en gris épais), $t_3=t_1+T/2$

**<u>Propriétés</u>** :

- On appelle nœuds de vibration les points pour lesquels l'amplitude des oscillations est nulle ou minimal.
- On appelle ventre de vibration les points pour lesquels l'amplitude des oscillations est maximale.

Les nœuds vérifient $\left|\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x+\psi\right)\right|=0$ et les ventres vérifient $\left|\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x+\psi\right)\right|=1$

- Entre deux nœuds successifs, on mesure une demi longueur d'onde.
- Entre deux ventres successifs, on mesure une demi longueur d'onde.
- Entre un ventre et un nœud consécutif, on mesure un quart de longueur d'onde.

### 3.3. Modes propres de vibration d'une corde attachée en deux points. (prise de notes)

**<u>Définition</u>** : On appelle modes propres de vibration d'un système à une dimension pour lequel on a imposé deux conditions aux limites indépendantes (par exemple une corde attachée en deux points) les ondes stationnaires sélectionnées par ces conditions aux limites.

- Pour l'exemple de la corde, on obtient des ondes de la forme : $s_n(x,t)=A_n\cos\left(n\frac{\pi.c}{L}t+\varphi\right)\sin\left(n\frac{\pi}{L}x\right)$
- c est la célérité des ondes progressives unidimensionnelles dans le milieu.
- Les fréquences propres de vibration s'expriment : $f_n=n\frac{c}{2L}$
- Les longueurs d'onde de vibration s'expriment : $\lambda_n=\frac{2L}{n}$

### 3.4. Exemple de spectres produits par un instrument à cordes.

La guitare fait partie des instruments à cordes. Chaque corde de la guitare est attachée en deux points et reproduit donc la situation étudiée précédemment. Chaque corde présente une masse linéique µ (kg.m$^{-1}$) et la tension est réglée pour que le fondamental de la corde correspondent à la note de base de la corde.
Pour une guitare classique à 6 cordes numérotée de 1 la plus fine en bas à 6 la plus grosse en haut, les notes de base et les fréquences associées sont les suivantes :

| Numéro | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Note de base | Mi3(aigu) | Si2 | Sol2 | Ré2 | La1 | Mi1(grave) |
| Fréquence (Hz) | 329,6 | 246,9 | 196,0 | 146,8 | 110,0 | 82,4 |
| Célérité (en m.s$^{-1}$) pour L=65cm | 429 | 321 | 255 | 191 | 143 | 107 |

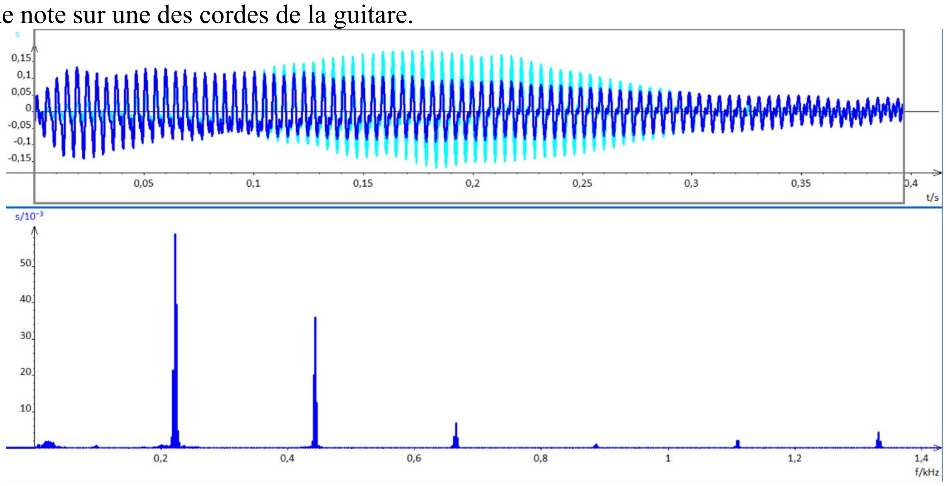
➢ De combien d'octaves la hauteur de la note de base monte lorsqu'on passe de la corde 6 à la corde 1 ?

On donne dans le tableau suivant les fréquences associées aux notes classiquement listées dans l'octave 3 :

| Note | Do3 | Do# | Ré3 | Ré# | Mi3 | Fa3 | Fa# | Sol3 | Sol# | La3 | La# | Si3 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| F(Hz) | 262 | 277 | 294 | 311 | 330 | 349 | 370 | 392 | 415 | 440 | 466 | 494 |

➢ Comment peut-on faire pour jouer un Do2 sur la guitare ?

On donne dans le graphique suivant l'allure du signal enregistré à l'aide d'un micro et du spectre correspondant en jouant une note sur une des cordes de la guitare.




Le tableau des composantes harmoniques d'intérêt recensées par le logiciel de traitement est le suivant :

| Fréquence (Hz) | 220 | 440 | 660 | 880 | 1100 |
|---|---|---|---|---|---|
| Amplitude (mV) | 60 | 35 | 7 | 1 | 2 |

➢ Quel lien apparait entre les fréquences dans le spectre ? Quelle est la note jouée ? Comment peut-on la jouer sur la guitare ?

## Capacités exigibles

- Exprimer les conditions d'interférences constructives ou destructives.
- Déterminer l'amplitude de l'onde résultante de la superposition de deux ondes synchrones en un point en fonction du déphasage.
- Relier le déphasage entre les deux ondes a la différence de chemin optique.
- Etablir l'expression littérale de la différence de chemin optique entre les deux ondes.
- Exploiter la formule de Fresnel fournie pour décrire la répartition d'intensité lumineuse.
- Caractériser une onde stationnaire par l'existence de nœuds et de ventres
- Exprimer les fréquences des modes propres connaissant la célérité et la longueur de la corde.
- Savoir qu'une vibration quelconque d'une corde accrochée entre deux extrémités fixes se décompose en modes propres.
- Relier les notions sur les ondes stationnaires avec celles utilisées en musique.
- Expérimentalement : Décrire une onde stationnaire observée par stroboscopie sur la corde de Melde.
- Expérimentalement : Mettre en œuvre un dispositif expérimental permettant d'analyser le spectre du signal acoustique produit par une corde vibrante.