



# ACOUSTIQUE 1 : **PRODUCTION D'UN SON PAR UN INSTRUMENT DE MUSIQUE**

## Matériel :

- Bêcher de 250 ml
- Eau
- Elastique large
- Tige en fer ou agitateur en verre
- Diapason + caisse de résonance
- Guitare
- Ordinateur + synchronie (+ carte d'acquisition)
- Amplificateur + micro
- Un stroboscope
- Un GBF
- Un ampèremètre
- Un aimant en U + petits aimants rectangulaires
- Des tuyaux ouverts aux deux extrémités de tailles différentes
- Un oscilloscope
- Une alimentation +15/-15V

## Connaissances et savoir-faire exigibles :

- (1) Savoir que pour qu'un instrument de musique produise un son il doit remplir deux fonctions - vibrer et émettre - et que dans de nombreux cas d'instruments réels ces fonctions sont indissociables.
- (2) Connaître l'existence des modes propres de vibration.
- (3) Savoir qu'il y a quantification des fréquences des modes de vibration : rapport entre les fréquences des harmoniques et celles du fondamental.
- (4) Savoir ce que sont un ventre et un nœud de vibration.
- (5) Savoir qu'une corde pincée ou frappée émet un son composé de fréquences qui sont celles des modes propres de la corde.
- (6) Savoir qu'une colonne d'air possède des modes de vibrations dont les fréquences sont liées à sa longueur.

## Savoir-faire expérimentaux :

- (7) Mesurer une période et déterminer ainsi une fréquence.
- (8) Décrire et réaliser une expérience permettant de mesurer la fréquence de vibration d'une corde par stroboscopie et celle du son émis par la corde.
- (9) Avec le matériel disponible au laboratoire, savoir mettre en évidence les modes propres de vibration d'une corde et d'une colonne d'air.

## I Production d'un son :

### 1) Expériences :

- a. Placez un bracelet élastique de caoutchouc autour d'un bēcher en plastique, de sorte qu'il passe au-dessus de l'ouverture de celui-ci et qu'il soit bien tendu (on appellera partie libre du bracelet la partie qui passe au-dessus de l'ouverture).
- b. En tenant le récipient à la main, tirez légèrement sur le bracelet de caoutchouc dans sa partie libre, puis lâchez-le (on dit qu'on le "pince"). Observez et écoutez :  
*L'élastique, en vibrant produit un son assimilable à une note de musique.*
- c. Renouvelez l'expérience après avoir posé le récipient sur la table :  
*On entend le son plus distinctement.*
- d. Comment est modifié le son si on immobilise à l'aide d'une baguette la partie libre, obtenant ainsi deux parties libres plus courtes ? Faites varier la longueur des parties libres :  
*On obtient des notes différentes : plus la partie libre de l'élastique est courte, plus le son est aigu.*
- e. Comment est modifié le son si on change la tension du bracelet élastique ?  
*Le son est également plus aigu.*

## 2) Conclusion :

Dans un système acoustique, on distingue deux parties :

- Un système mécanique vibrant (l'excitateur) qui est à l'origine de la **production** d'un son par **vibration**.

Exemples :

- ✓ Pour les instruments à corde l'oscillateur mécanique est une **corde tendue** (dans un piano des **marteaux** viennent frapper la corde, pour une guitare les cordes sont **pincées** et pour un violon elles sont **frottées**).
- ✓ Pour les instruments à vent il existe plusieurs types de système mécanique (c'est un **biseau** dans les tuyaux d'orgues qui permet de créer l'oscillation, une **hanche** sur un saxophone, ou simplement le **bord** du tuyau dans une flute de pan)

- Un système assurant le couplage avec l'air (le résonateur) : l'amplitude d'un son est bien trop faible pour être perçu si nous n'ajoutons pas au système mécanique un système assurant le couplage avec l'air.

Exemples :

- ✓ **Caisse de résonance** d'une guitare ou d'un diapason
- ✓ **Colonne d'air** pour une flûte ou une clarinette.

## II Vibration d'une corde entre deux points fixes :

### 1) Description et fonctionnement de la guitare :

Le pincement de la corde provoque sa mise en vibration entraînant la vibration de la caisse et de l'air qu'elle contient. **Le son émis par la guitare a la même fréquence que les vibrations de la corde.**

- a. Une guitare classique possède six cordes tendues entre le sillet (à l'extrémité du manche) et le chevalet (sur la table d'harmonie). Quel paramètre physique fait-on varier pour accorder une des cordes ?

Comment s'y prend-on ?

*Il faut faire varier la tension de la corde, on utilise un son de référence pour accorder la corde en question. Généralement, on accorde la deuxième plus grosse corde de la guitare (le La) puis par en liaison avec celle-ci, on accorde les autres cordes (Mi, La, Ré, Sol, Si, Mi)*

- b. Un certain nombre de barrettes (ou "frettes") sont disposées sur le manche : quel est leur rôle ?

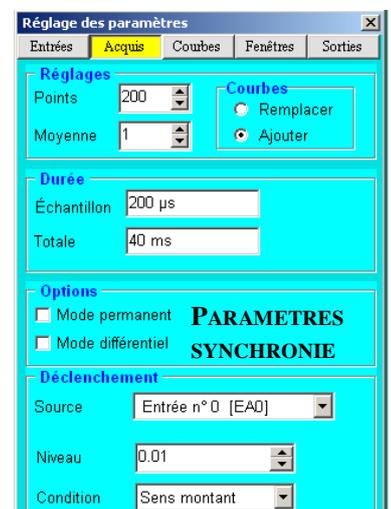
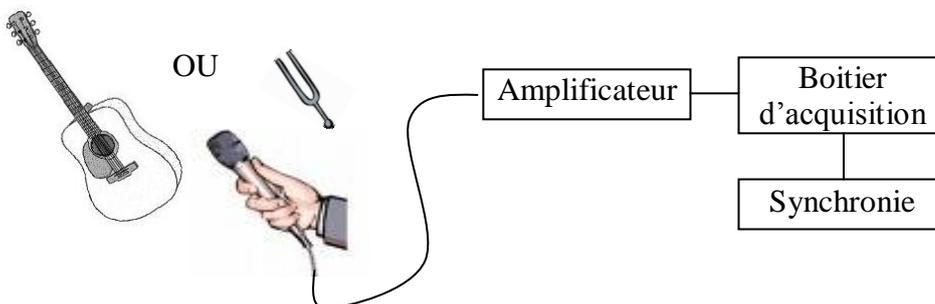
*En appuyant sur une frette, on modifie la longueur de la corde donc la note émise. A chaque frette correspond une note.*

- c. Ainsi, quels sont les deux paramètres que l'on peut faire varier pour modifier la fréquence de vibration de la corde donc la note donnée par celle-ci ?

*On peut faire varier la longueur de la corde et sa tension.*

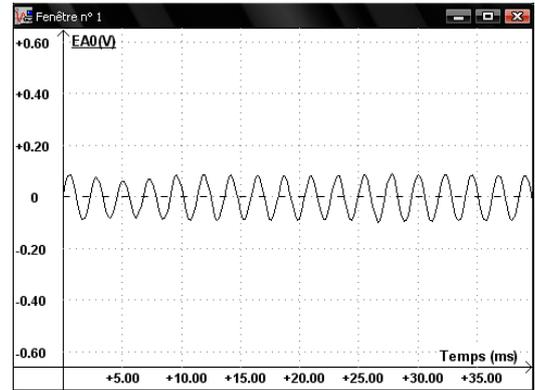
### 2) Oscillations libres d'une corde pincée et comparaison avec un diapason :

Nous allons réaliser les enregistrements des sons produits par une corde de guitare (la corde La, la deuxième plus grosse) et un diapason. Pour cela, nous allons réaliser le montage suivant et régler les paramètres de synchronie comme ci-contre :



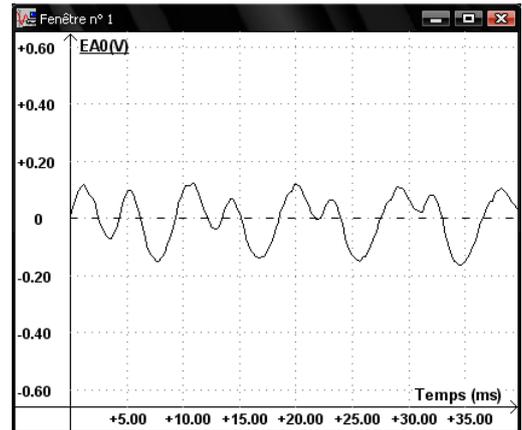
A. Analyse du son émis par le diapason :

- Dessinez l'oscillogramme obtenu :
- Comment appelle-t-on ce type de signal ?  
*Signal sinusoïdal.*
- Déterminez la période et la fréquence de ce signal et comparez cette dernière avec la fréquence de la note émise par ce diapason :  
*Entre 39.1 ms et 0.510 ms, on a 17 périodes :*  
 $T = 2.27 \text{ ms}$  d'où  $f = 440.5 \text{ Hz}$   
*Le diapason indique 440 Hz.*



B. Analyse du son émis par la corde de guitare :

- Dessinez l'oscillogramme obtenu :
- Comment peut-on caractériser le signal obtenu ?  
*Signal périodique non sinusoïdal.*
- Déterminez la période puis la fréquence de ce signal par le calcul. Comparez cette dernière avec la fréquence obtenue à l'aide d'un stroboscope :  
*Entre 1.17 ms et 38.1 ms on a 4 périodes :*  
 $T = 9.23 \text{ ms}$  d'où  $f = 108.3 \text{ Hz}$ .  
*Le stroboscope nous donne une fréquence de 110 Hz.*



C. Spectres en fréquence :

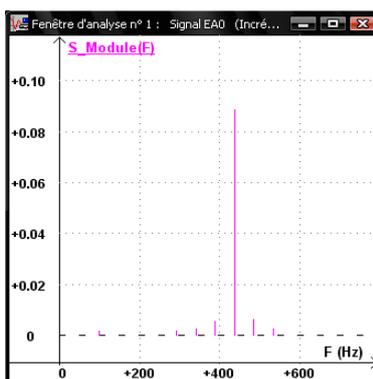
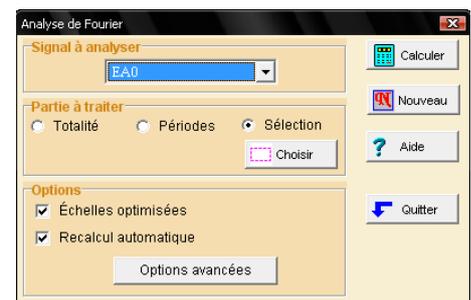
Tout signal périodique non sinusoïdal correspond en fait à la somme de signaux sinusoïdaux de fréquence déterminée.

Donc le signal correspondant à la vibration de la corde de guitare est en fait une somme de fonctions sinusoïdales de fréquences  $f_1, f_2, f_3, \dots$

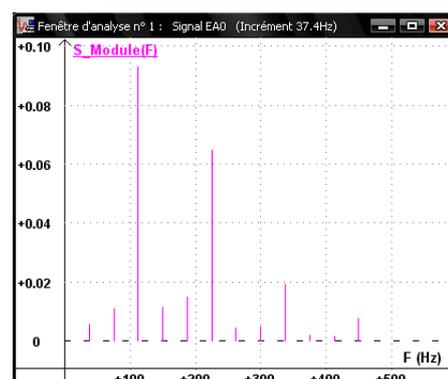
Pour déterminer la fréquence de ces signaux sinusoïdaux on peut utiliser une opération mathématique appelé transformé de fourrier, on obtient alors un spectre en fréquence : il s'agit d'une courbe montrant la variation de l'amplitude des signaux sinusoïdaux en fonction de leur fréquence.

- Effectuez cette opération sur les deux signaux précédemment enregistré :

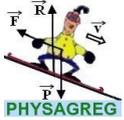
Pour que le logiciel travaille dans de bonnes conditions, il faut lui demander de faire ce travail sur la partie de la courbe la plus périodique possible. Pour cela, on choisira la partie de la courbe à traiter :



Cas du diapason



Cas de la corde de guitare



- b. Ainsi pour le diapason, on ne retrouve **qu'un seul signal sinusoïdal significatif**, de fréquence **440Hz**.
- c. Pour la guitare, on a **plusieurs signaux significatifs**, de fréquence :  
 $f_1 = 113 \text{ Hz}$  ;  $f_2 = 225 \text{ Hz}$  ;  $f_3 = 337 \text{ Hz}$  ;  $f_4 = 449 \text{ Hz}$
- d. Comparez la valeur de la fréquence obtenue par calcul ou stroboscopie (question B.c.) et celle de  $f_1$  trouvée précédemment :  
*La première fréquence correspond à celle obtenue par calcul sur le signal ou par stroboscopie.*
- e. Effectuez les rapports :

$$\frac{f_2}{f_1} = 2 \qquad \frac{f_3}{f_1} = 3 \qquad \frac{f_4}{f_1} = 4$$

D. Conclusion :

- Le diapason, dont le spectre en fréquence ne montre **qu'un seul** signal significatif, émet un son **pur**.
- Pour la corde La de la guitare, on observe **plusieurs** signaux significatifs dans le spectre en fréquence, le son émis est donc un son **complexe**.

La corde est immobilisée à ses deux extrémités : ces conditions ne lui permettent pas de vibrer n'importe comment, elle vibre selon ses **modes propres** :

- Mode propre de vibration :  
**Toute vibration de la corde pour laquelle chaque point vibre sinusoïdalement à la même fréquence est un mode propre de vibration. La fréquence de cette vibration est une fréquence propre.**

- Mode fondamental :  
**Le mode propre qui a la plus petite fréquence propre est appelé mode fondamental.**

Pour la corde La de la guitare que nous avons étudié, il s'agit de  $f_1 = 113 \text{ Hz}$ , plus petite fréquence du spectre en fréquence. On a aussi obtenue celle-ci en mesurant la période sur l'oscillogramme ou bien en éclairant la corde avec le stroboscope.

- Mode harmonique :  
**Les autres modes propres de vibration sont appelés modes harmoniques. Ils sont caractérisés par un nombre entier  $n$  : la fréquence  $f_n$  de l'harmonique  $n$  est égal à :  $f_n = n \times f_1$**

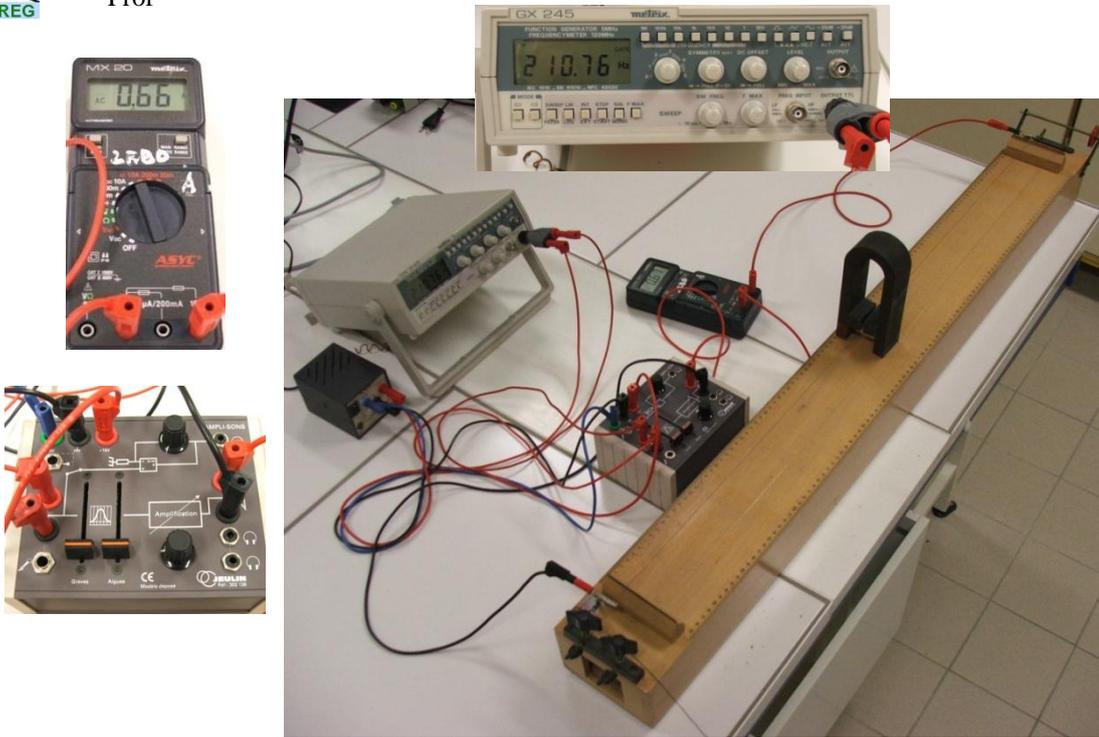
Pour la corde La de la guitare, on a donc visualisé 3 harmoniques sur le spectre en fréquence : harmonique 2 ( $f_2$ ), harmonique 3 ( $f_3$ ) et harmonique 4 ( $f_4$ ).

- Quantification :  
**Les fréquences de vibration de la corde ne pouvant pas prendre n'importe quelles valeurs, on dit que les fréquences des modes propres de vibration sont quantifiées.**

**Une corde pincée ou frappée émet un son (complexe) composé de fréquences qui sont celles des modes propres de la corde (mode fondamental additionné de quelques uns de ses harmoniques).**

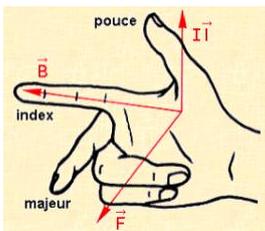
3) Oscillations forcées d'une corde :

A. Montage :

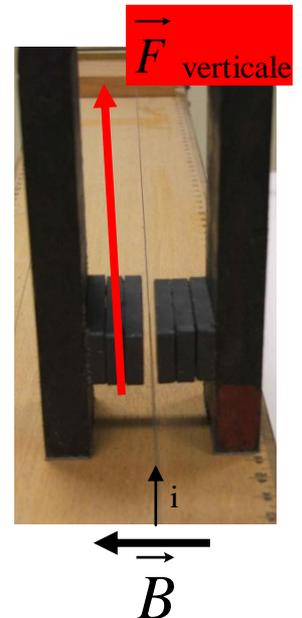
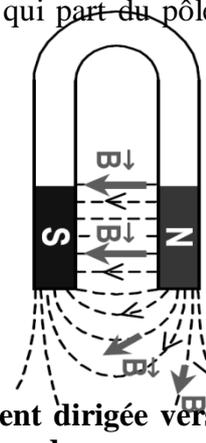


**B. Principe utilisé pour mettre en vibration la corde :**

L'aimant en U admet un champ magnétique entre ses branches qui part du pôle N pour aller sur le pôle S.



Or, le fil parcouru par un courant  $i$ , soumis à un champ magnétique subit la force de Laplace dont la direction est donnée par la règle de la main droite :



**La force de Laplace subit par la corde est verticale. Et comme le courant est alternatif, la force est alternativement dirigée vers le haut puis vers le bas ce qui provoque la vibration forcée de la corde**

**C. Manipulations :**

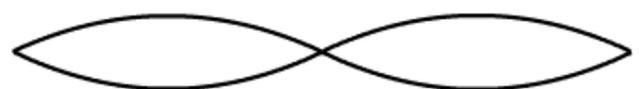
- On part d'une fréquence nulle et on augmente progressivement celle-ci tout en observant la corde.
- Que se passe t-il à une fréquence faible, quelconque ?  
*Rien : on ne voit pas la corde vibrer.*
- Lorsque l'on continue d'augmenter la fréquence, on arrive alors a une valeur qui provoque un mouvement particulier de la corde :

- ✓ Quel est ce mouvement ?  
*Mouvement d'oscillations verticales.*
- ✓ Quelle la fréquence correspondante ( $f_1$ ) ?  
 $f_1 = 108 \text{ Hz}$
- ✓ A cette fréquence, quelle forme a la corde ?
- ✓ Notez la longueur de la corde :  $L = 1 \text{ m}$



- Continuons d'augmenter la fréquence : on trouve alors une nouvelle fréquence d'excitation qui donne une forme particulière à la corde :

- ✓ Quelle est cette fréquence ( $f_2$ ) ?  
 $f_2 = 215 \text{ Hz}$



- ✓ Comparez-la à  $f_1$  ?

$$f_2 = 2 \times f_1$$

- ✓ A cette fréquence, quelle forme a la corde ?
- ✓ Mesurez la longueur de chaque morceau de la forme prise par la corde ?  
*Chaque morceau fait 50 cm de long.*

- e. De nouveau on augmente la fréquence d'excitation, d'après vous, que va-t-on trouver par la suite (nouvelle fréquence particulière, comparaison avec  $f_1$ , forme de la corde ?  
*On trouvera une nouvelle fréquence particulière de valeur  $3 \times f_1 = 324 \text{ Hz}$ . La corde montrera alors trois fuseaux de longueur égale (33 cm).*

#### D. Conclusion :

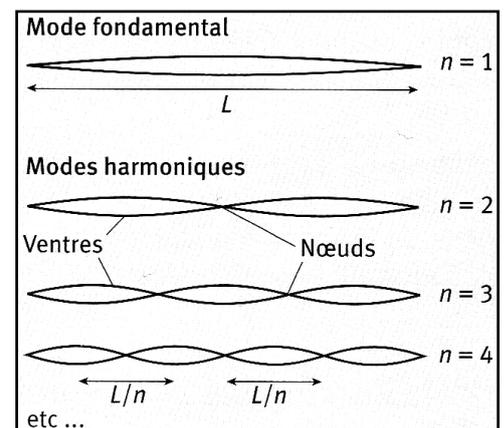
Lorsque l'on excite sinusoïdalement une corde tendue entre ses deux extrémités, on n'observe effectivement un mouvement de la corde uniquement pour des fréquences particulières :

- Ces fréquences sont les fréquences des modes propres de vibrations de la corde lorsqu'elle oscille librement. La première fréquence correspond donc au mode fondamental, la deuxième à la deuxième harmonique...

Comme la corde est mise en mouvement par un phénomène de résonance, on dit que la corde est un résonnateur à fréquence multiple.

- De plus, on observe que la corde fait des figures particulières lors de ses vibrations aux différents modes :

- ✓ On observe des fuseaux :  $n$  fuseau pour l'harmonique de rang  $n$ .
- ✓ Le milieu d'un fuseau est appelé ventre de vibration.
- ✓ L'extrémité d'un fuseau est appelé nœud de vibration.
- ✓ Chaque fuseau a une longueur égale à  $L/n$  pour l'harmonique de rang  $n$ .



#### E. Expérience complémentaire :

- Nous avons dit que les fréquences de vibration lors des oscillations forcées de la corde étaient les fréquences de ses modes propres (observées lors de ses oscillations libres). Vérifions-le sur la corde utilisée ci-dessus.
  - Enlevez le GBF du circuit, reliez la corde à l'entrée de l'amplificateur et la sortie de l'amplificateur à la console d'acquisition de l'ordinateur.
  - Réglez les paramètres de synchronie comme ceux que l'on a utilisé pour l'enregistrement du son de la corde de guitare. Lancez l'acquisition puis faites vibrer manuellement la corde.
  - On enregistre un signal sur synchronie : comment expliquer l'obtention d'un enregistrement, que s'est-il passé ?
  - Mesurez la période puis calculez la fréquence ( $f_1$ ) du signal électrique obtenu.
  - Après avoir sélectionnez quelques « belles périodes » de la courbe, traitez-la de façon à la décomposer en série de Fourier. Notez les fréquences significatives obtenues ( $f_1, f_2, \dots, f_n$ )
  - Comparez ces fréquences à celles obtenues dans le paragraphe précédent et concluez.
- On peut aussi montrer aux élèves comment, sur la guitare, on peut favoriser les harmoniques de la corde La. Il suffit de poser son index (sans appuyer) sur la corde à l'endroit où l'on observerait des nœuds de vibrations si la corde était mises en oscillations forcées.

Par exemple pour l'harmonique 2, il faut placer le doigt à la moitié de la corde. On peut vérifier par une acquisition que c'est bien la fréquence de l'harmonique 2 qui est favorisée (pic sur le spectre en fréquence).

### III Vibration d'une colonne d'air :

#### 1) Préambule :

- Nous allons réaliser un parallèle avec notre étude de la corde fixée à ses deux extrémités : Ici, nous nous intéresserons à une colonne d'air ouverte à ses deux extrémités.
- Pour exciter cette colonne d'air, nous allons utiliser un haut parleur relié à un GBF, ce qui nous permettra d'envoyer un son pur d'une fréquence voulue.
- Pour détecter ce qu'il se passe dans la colonne, nous utiliserons un microphone, en rappelant que celui-ci est sensible aux différences de pression de l'air, et convertit celles-ci en signaux électriques.

#### 2) Modes propres de vibrations de la colonne d'air :

Nous allons réaliser le montage ci-contre :

- : un GBF est relié à un haut parleur, ceci constitue notre exciteur.
- : la colonne d'air est placée au dessus du haut-parleur.
- : un micro est relié, par l'intermédiaire d'un amplificateur à un oscilloscope sur lequel on recueille le signal reçu.

#### A. Manipulation :

- a. Réglez le GBF sur un signal sinusoïdal de fréquence quelconque, réglez le bouton « level » pour avoir une bonne intensité sonore.
- b. Réglez alors l'oscilloscope pour visualiser le signal reçu par le micro.
- c. Placez-vous à une fréquence nulle du GBF.
- d. Augmentez alors progressivement celle-ci et notez les fréquences favorisées, c'est-à-dire celles pour lesquelles le signal reçu est intense.

Notez ces fréquences (en Hz) :  $f_1 = 147.40$  ;  $f_2 = 297.64$  ;  $f_3 = 450.21$  ;  $f_4 = 605.5$  ;  $f_5 = 762$

- e. Effectuez les rapports :

$$\frac{f_2}{f_1} = 2.02$$

$$\frac{f_3}{f_1} = 3.05$$

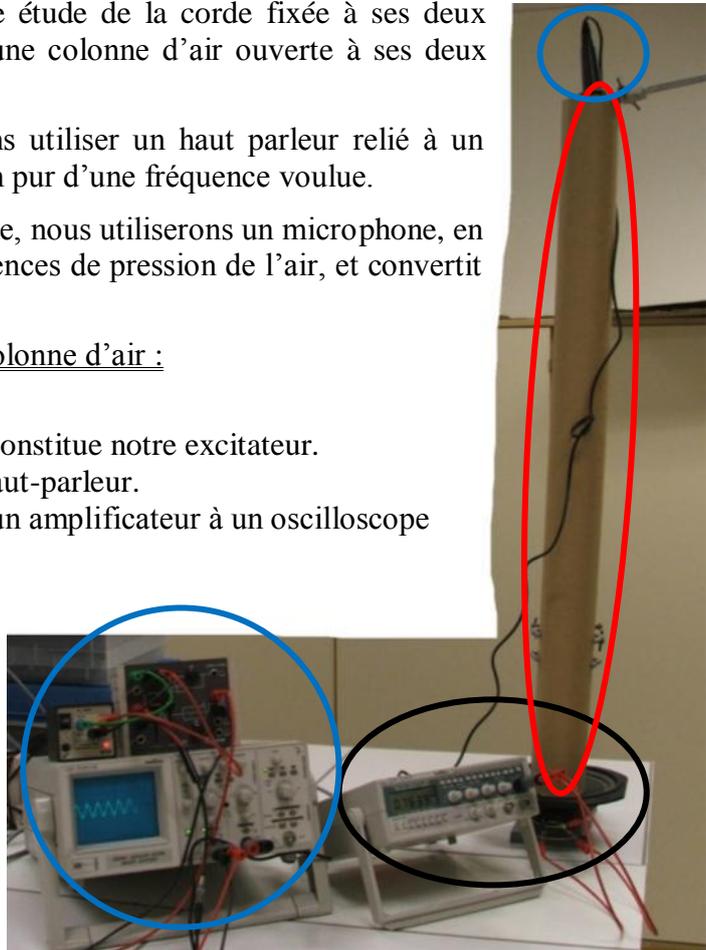
$$\frac{f_4}{f_1} = 4.1$$

$$\frac{f_5}{f_1} = 5.2$$

- f. Recommencez ces mesures avec un tuyau de longueur différente et comparez.

#### B. Conclusion :

- Comme pour la corde tendue, une colonne d'air ne vibre de façon significative que pour certaines fréquences qui sont ses modes propres de vibrations.
- La plus petite fréquence  $f_1$  est la fréquence du mode fondamentale, les autres fréquences vérifiant la relation  $f_n = n \times f_1$  sont les fréquences des modes harmoniques.
- Les modes de vibration de la colonne d'air sont donc quantifiés.
- Ces fréquences dépendent de la longueur de la colonne d'air, plus cette longueur est petite, plus la fréquence du fondamental est élevée.

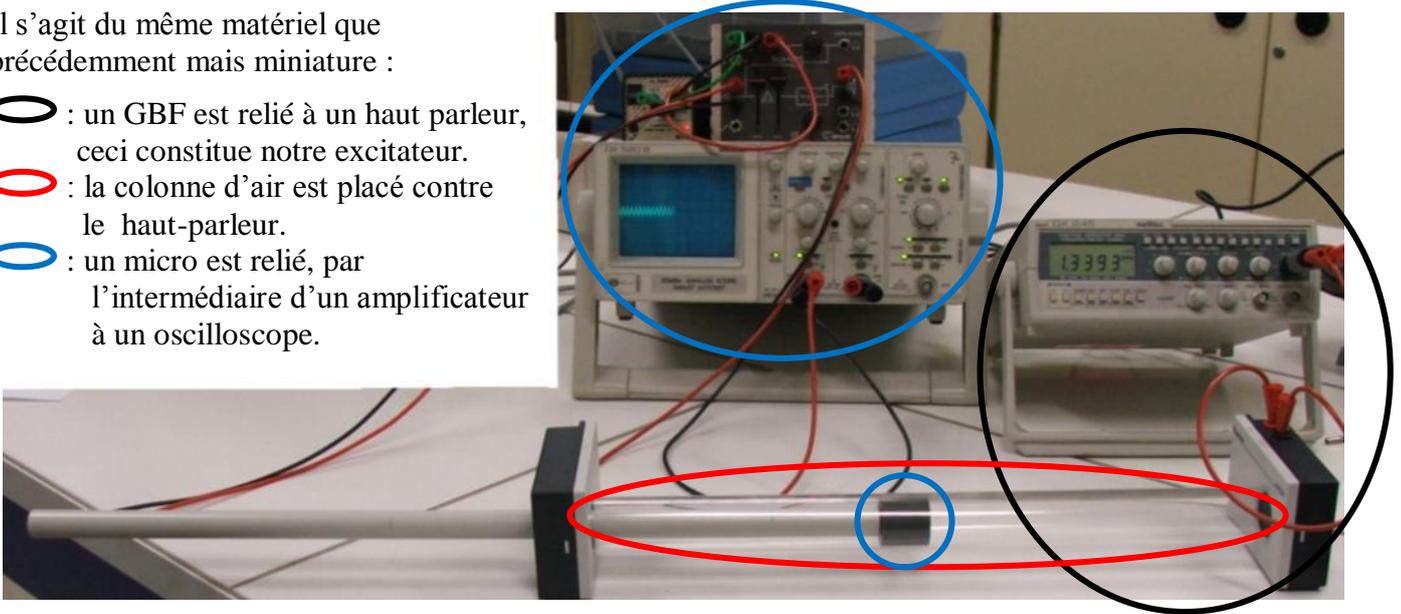


### 3) Nœuds et ventres de pression :

Nous allons utiliser pour cette manipulation le matériel pédagogique décrit ci-dessous :

Il s'agit du même matériel que précédemment mais miniature :

- : un GBF est relié à un haut parleur, ceci constitue notre excitateur.
- : la colonne d'air est placée contre le haut-parleur.
- : un micro est relié, par l'intermédiaire d'un amplificateur à un oscilloscope.

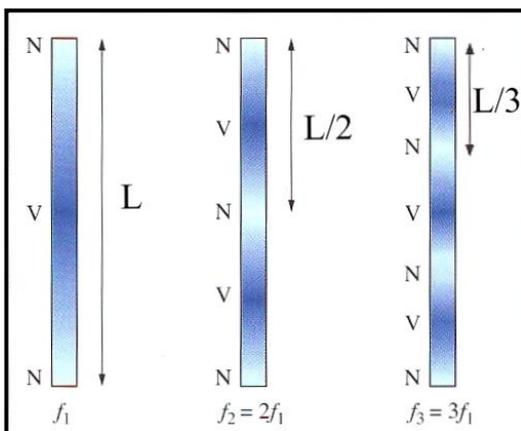


#### A. Manipulation :

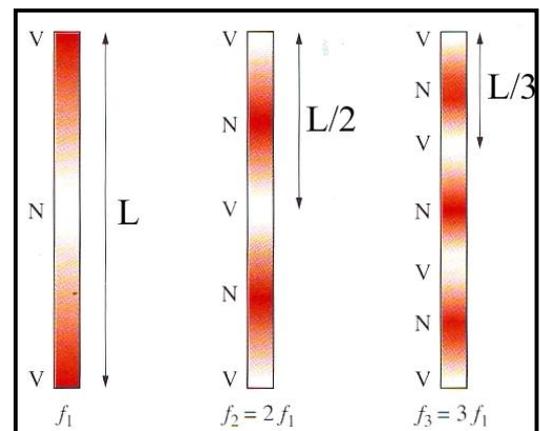
- a. Mettez le micro au milieu du tube.
- b. Réglez le GBF sur un signal sinusoïdal de fréquence quelconque, réglez le bouton « level » pour avoir un son juste audible.
- c. Réglez alors l'oscilloscope pour visualiser le signal reçu par le micro.
- d. En partant d'une fréquence nulle, cherchez la sixième fréquence favorisée.
- e. Déplacez alors le micro à l'intérieur du tube et noter les positions pour lesquelles on observe des minimas de pression nœuds.
- f. Faites un schéma de la colonne en précisant les positions des ventres de pression et des nœuds de pression. Remarquez leur position en mesurant l'écart entre deux nœuds ou deux ventres.

#### B. Conclusion :

Comme pour la corde tendue, il y a existence de nœuds et de ventres : les nœuds et ventres de pression de la colonne d'air ouverte à ses deux extrémités « correspondent » (sont positionnés de la même manière) aux nœuds et ventres de vibrations pour une corde tendue.



Nœuds et ventres de pression



Nœuds et ventres de vibration

Complément prof :

Un nœud de pression est un ventre de vitesse ; un ventre de pression est un nœud de vitesse.

Aux extrémités du tube, deux cas se présentent :

- si le tube est fermé, alors la vitesse de l'air y est nécessairement nulle ; on a un nœud de vitesse ; c'est le cas de la flûte de pan et des tuyaux d'orgue à résonateur fermé ;
- si le tube est ouvert, alors la pression de l'air est constante, égale à la pression extérieure ; on a un nœud de pression.

Si le tube présente un trou à un endroit, alors cela impose un nœud de pression. C'est le principe du perçage des bois.

Le dispositif qui crée les vibrations est un ventre de vitesse :

- soit il s'agit d'une membrane vibrante (haut-parleur, lèvres, anche), c'est la vibration de la membrane qui pousse l'air ;
- soit il s'agit d'un obstacle : il y a un trou au niveau de l'obstacle, il s'agit donc d'un nœud de pression, c'est-à-dire d'un ventre de vitesse.

*Pour simplifier :*

Pour un tuyau ouvert à ses deux extrémités, les extrémités du tube sont des nœuds de pression.

Pour un tuyau fermé à une de ses extrémités, celle-ci constitue alors un ventre de pression.

Paramètre	Tuyau ouvert	Tuyau fermé
Pression		
Vitesse		