

Instruments à cordes

I Propagation d'une onde le long d'une corde

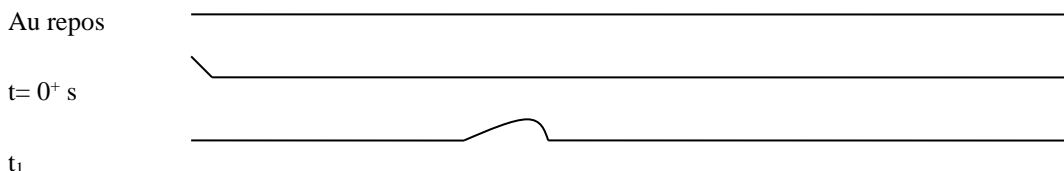
Dans l'introduction de cette partie, on a vu que le son pouvait se propager dans l'air à partir d'une source qui fait varier localement la avec une certaine

Dans les instruments à corde, c'est la corde qui, quand elle vibre, permet l'émission du son. Comment vibre donc un corde physiquement ?

1) Onde solitaire progressive le long d'une corde

a) Première expérience

Poser la corde sur le sol ou sur la table en fixant une de ses extrémités. La tendre très légèrement et imprimer un bref mouvement de haut en bas à l'autre extrémité.

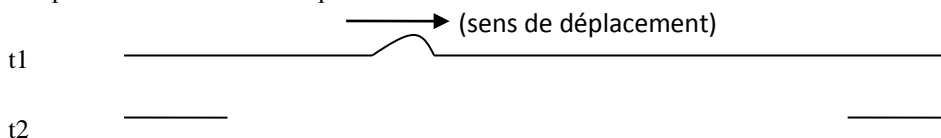


Le milieu de propagation est ici la corde. Comment qualifier son état de repos ?

Comment modifie-t-on un point du bout de la corde lorsqu'on imprime le mouvement bref ?

Quelle est la perturbation ici qui se propage ensuite le long des points de la corde ?

Dessiner l'aspect de la corde à un temps $t_2 > t_1$.



Dans quelle direction s'est faite la propagation ? Et dans quel sens ?

Y a-t-il déplacement des « morceaux » de corde ? Y a-t-il transport de morceaux de corde ?

b) Visualisation avec un logiciel

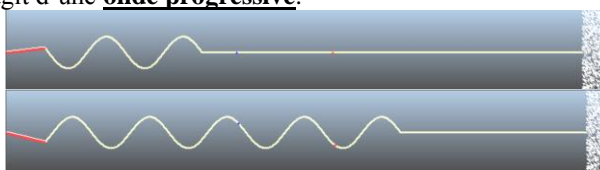
Visualisation à partir d'un logiciel de simulation : suivre les instructions et répondre aux questions qui vous sont posées.

Ouvrir le logiciel de simulation de la façon suivante : programmes/Microméga Hatier/Physique chimie Tale. Si on vous demande d'adapter la taille de l'écran, refuser en cliquant sur fermer. Ouvrir « simulateurs physique » puis « Ondes : propagation et réflexion... ». Les paramètres des expériences sont à spécifier dans les trois onglets de la moitié inférieure gauche de la fenêtre.

- Dans « onde », sélectionner onde solitaire. Vous pouvez modifier l'amplitude de la perturbation (laisser 20 cm) et la durée de déformation (laisser 500 ms). Dans « corde », choisir extrémité liée à un amortisseur. Déclencher l'animation. Visualiser la déformation qui se propage le long de la corde. Y a-t-il une réflexion dans ce cas ?
- Changer l'extrémité en extrémité fixe. Quel changement observez-vous ?

2) Onde sinusoïdale progressive le long d'une corde

- Revenir à une extrémité liée à un amortisseur et choisir, dans « onde », une onde sinusoïdale. Visualiser l'onde sinusoïdale qui se déplace. Il s'agit d'une onde progressive.

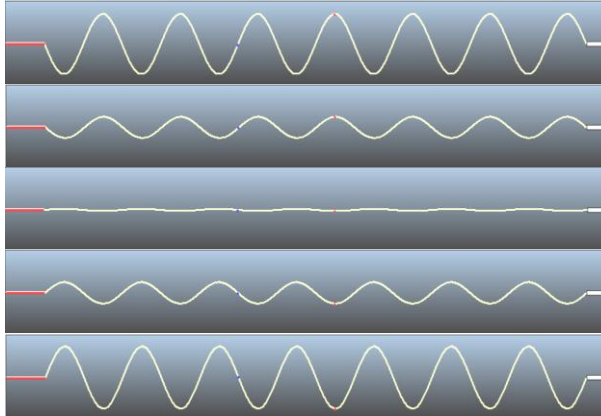


- Appuyer sur pause et visualiser la longueur d'onde $\lambda_{\text{onde,corde}}$. La longueur d'onde correspond à
- Quelle est la période de l'onde ? Comment voir cette période sur les animations ?

- Pendant une période $T_{\text{onde,corde}}$, de combien s'est propagée l'onde ? Pendant $2 T_{\text{onde,corde}}$? Pendant $3 T_{\text{onde,corde}}$?
- En déduire une relation entre la célérité de l'onde sur la corde $c_{\text{onde,corde}}$, la longueur d'onde de l'onde sinusoïdale sur la corde $\lambda_{\text{onde,corde}}$ et la période $T_{\text{onde,corde}}$ de cette même onde.

3) Onde stationnaire sur une corde

- Changer l'extrémité en extrémité fixe et attendre le retour de l'onde. Peut-on encore qualifier l'onde de « progressive » ? pourquoi ? On dit que **l'onde est stationnaire**. Justifier ce terme. :



- Vous visualisez un des **modes propres** de la corde : tous les points de la corde vibrent avec un rapport d'élongation, à tout instant, qui est égal pour deux points pris au hasard. Certains points sont immobiles comme le point rouge/bleu (rayer la mention inutile) : ce sont les **nœuds du mode propre**. Certains points ont au contraire une élongation maximale comme le point rouge/bleu (rayer la mention inutile) : ce sont les **ventres du mode propre**. Entre chaque ventre apparaît **un fuseau**.
- Faire un unique dessin correspondant à ce mode propre représentant la corde à différents instants en utilisant de la couleur, y placer les nœuds, les ventres, les compter et compter les fuseaux :
- En nommant $\lambda_{\text{onde corde}}$ la longueur d'onde de l'onde correspondant à ce mode propre et en notant l_{fuseau} la longueur d'un fuseau, quelle relation trouvez-vous entre $\lambda_{\text{onde corde}}$ et l_{fuseau} ? (relation à (ré)apprendre par cœur) :

Il existe d'autres modes propres de la corde, suivant le nombre de fuseaux.

Mode propre n° « i »	dessin	Nombre de fuseaux	Nombre de noeuds	Nombre de ventres	Lien entre longueur de la corde L_{corde} et $l_{\text{fuseau},i}$ puis entre L_{corde} et $\lambda_{\text{onde corde},i}$	Lien entre longueur de la corde, célérité c et fréquence $f_{\text{corde},i}$ du mode propre i
1 ^{er} mode propre						

Est-ce que n'importe quelle fréquence de corde permet d'obtenir un mode propre de la corde ?

Connaissant la longueur L d'une corde et la célérité $c_{\text{son corde}}$, indiquer les différentes fréquences des modes propres.

Ces fréquences sont appelées « fréquences propres » de ma corde étudiée. Il faut savoir retrouver leur expression.

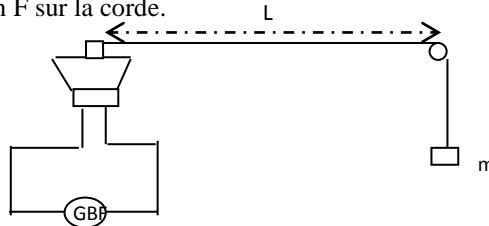
Comment visualiser un mode propre d'une corde expérimentalement ?

On utilise à une des extrémités de la corde tendue (dispositif appelé « corde de Melde ») un vibreur dont on peut faire varier la fréquence.

La corde se met alors à vibrer à la fréquence du vibreur. Si cette fréquence correspond à celle d'un mode propre, on visualise de fins fuseaux sur la corde. **On dit alors que la corde « entre en résonance » (se rappeler de ce terme).** Si la fréquence ne correspond pas à celle d'une mode propre, aucun fuseau n'est visible.

Vous utiliserez le montage à votre disposition qui comprend :

- un GBF (Générateur de tension électrique à Basse Fréquence) délivrant une **tension sinusoïdale** choisie dans la gamme **0-200 Hz**,
- un haut-parleur dont la membrane est en contact avec la corde par l'intermédiaire d'un petit bloc de polystyrène expansé servant de vibreur à une des extrémités,
- une corde tendue entre **deux points fixes** dont l'un est une poulie permettant de fixer une masse marquée à l'extrémité de la corde de manière à en modifier la tension F sur la corde.



Pour cette première série d'expérience, choisir $m = 200$ g. Mesurer précisément la longueur L de la corde (Il faudrait que L soit typiquement compris entre 1,1 m et 1,5 m) $L = \dots\dots\dots$

Régler l'amplitude du GBF vers le maximum (80% du maximum environ) et choisir un signal sinusoïdal.

Vous commencerez vos mesures avec une fréquence d'environ 10 Hz pour le vibreur. Utiliser la notice du GBF à votre disposition pour régler les fréquences en utilisant les bons calibres.

Vous éviterez de laisser le système en résonance dès que la mesure est terminée (baisser l'amplitude ou modifier légèrement la fréquence).

Coups de pouce pour le premier TP de l'année :

- Augmenter progressivement la fréquence du vibreur jusqu'à voir l'apparition du premier mode propre.
- Continuer pour voir un autre mode propre.
- Continuer encore de même et cesser au niveau du 4^{ème} mode propre.
- Pour voir à quel harmonique cela correspondrait, organiser correctement les résultats par exemple avec un tableau regroupant pour chaque mode propre rencontré : fréquence mesurée, dessin de l'allure de la corde avec ses fuseaux, nombre de fuseaux, longueur d'onde $\lambda_{\text{onde corde}}$ en fonction de la longueur L de la corde, $f_{\text{son émis}}$ en fonction de L et $c_{\text{onde corde}}$ et qui vaut la fréquence du vibreur à chaque fois. Vérifier alors que $c_{\text{onde corde}}$ ne dépend pas de la fréquence.

Mode propre n°	Fréquence excitatrice	Allure de la corde avec nœuds et ventres et fuseaux	Nbre de fuseaux	$\lambda_{\text{onde corde}}$ en fonction de L	$f_{\text{onde corde}}$	Calcul de $c_{\text{onde corde}}$

Retrouve-t-on la relation simple entre les fréquences du premier mode propre et des modes propres supérieurs ?

4) Célérité le long d'une corde

Document 1 : célérité d'une onde le long d'une corde

La célérité des ondes le long d'une corde est donnée par la formule suivante :

$$c_{\text{onde corde}} = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

où F (une force) est la **tension de la corde** et μ la **masse linéique** de la corde (c'est-à-dire la « masse par unité de longueur »). Dans le SI, les célérités s'expriment en m.s^{-1} , les forces en N et les masses linéiques en $\dots\dots\dots$

Ainsi, plus une corde est tendue et plus l'onde se propage vite/lentement (rayer la mention inutile)
 plus une corde est massique par unité de longueur, et plus $\dots\dots\dots$

Problème posé :

Déterminer la masse linéique μ de la corde utilisée en effectuant la mesure de la fréquence du 1^{er} mode propre plusieurs fois avec des masses différentes m s'échelonnant entre 100 et 300 g. On donne la valeur de g à Versailles : $g = 9,8 \text{ N.kg}^{-1}$.

Matériel : dispositif de la corde de Melde, regressi

1) Rédiger un protocole complet permettant de répondre au problème posé.

Coups de pince (: visualiser à quoi peut correspondre la « masse linéique » de la corde (penser à la « masse volumique ») et trouver son unité dans le SI. Vous n'avez pas de balance à votre disposition, on ne peut donc mesurer μ directement à partir de la masse de la corde... Exprimer la fréquence f du 1^{er} mode propre en fonction de L , m , g et μ . Pour cela, on *expliquera* notamment le lien entre la tension de la corde et la masse m suspendue. Penser alors, à partir des mesures expérimentales, à faire un graphique sous regressi ont l'exploitation permettra de trouver l'inconnue...

2) Après vérification du professeur, mettre en place ce protocole afin de trouver l'inconnue cherchée.

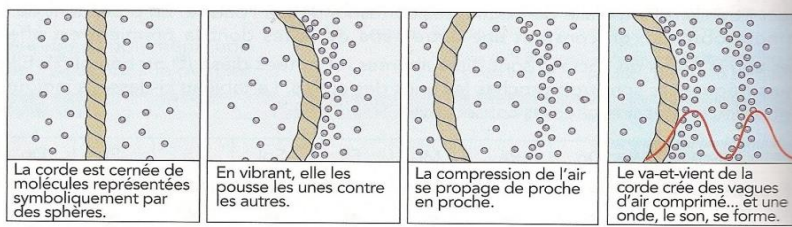
II Son émis par la corde

Document 2 : la note naît du mouvement d'une corde

■ 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

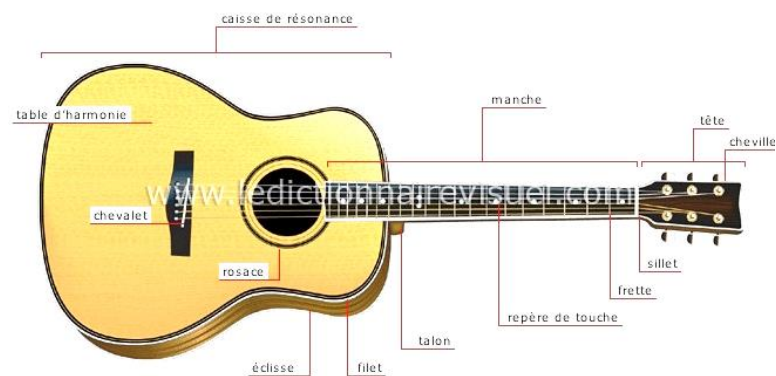
des vagues dans la pièce : le son naît. Et le nouveau prend la forme d'une onde, dont les pics correspondent à chaque battement de la corde. Il vibre donc au même rythme. Aussi, la **vitesse de vibration** de la corde – autrement dit, le nombre de battements par seconde – détermine la fréquence du son, qui s'exprime en hertz (Hz).

D'après F. MARTIN, « Silence », Sciences & Vie Junior, n° 9, nov. 1989.



Document 3 : le son est amplifié par la caisse de résonance ou la table d'harmonie

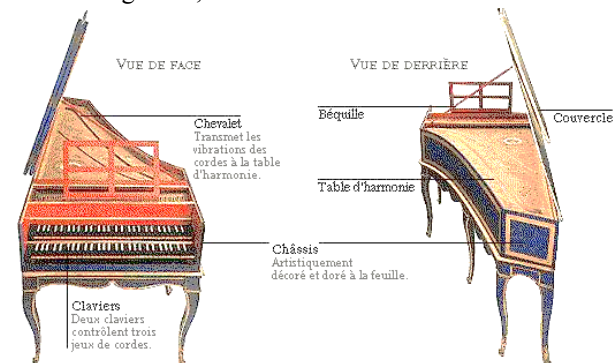
Le son issu de la vibration d'une simple corde n'est pas suffisant pour être perçu par un auditoire situé à plusieurs mètres de l'instrumentiste. Ce son du à la vibration de la corde est amplifié par la mise en vibration d'une caisse de résonance (instruments avec un manche type guitare, violon, mandoline etc.) et/ou une table d'harmonie (instruments type clavecin ou piano) en bois précieux à laquelle elle est couplée, via un chevalet, pour toutes les cordes.



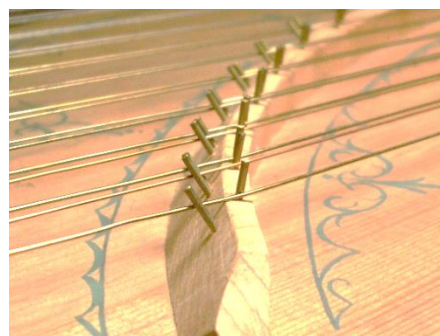
Cas d'une guitare, vision de la caisse de résonance et du chevalet



chevalet ouvragé d'un violon



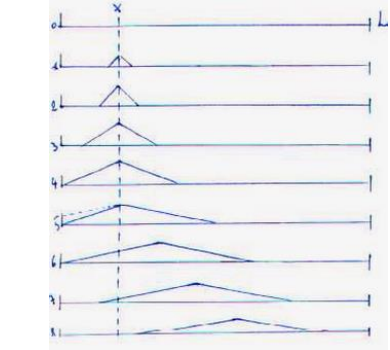
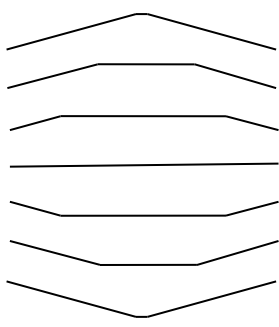
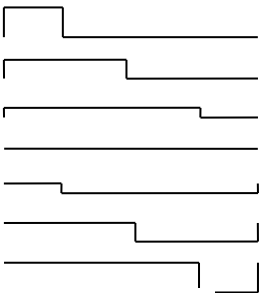
Cas d'un clavecin, vision de la table d'harmonie et du chevalet



chevalet en gros plan du clavecin

Document 4 : le mode de mise en vibration de la corde

La corde peut être mise en vibration de trois façons différentes :

Mise en vibration	Corde frottée	Corde pincée	Corde frappée
Instruments concernés	Instruments à archers	Guitare, clavecin, « pizzicati »	Piano
Profils (allure) de la corde à différents instant successifs	Corde frottée proche d'une des extrémités  (http://lutherie.pagesperso-orange.fr/acoucrd.htm)	Corde pincée vers le haut en son centre  etc	corde frappée vers le haut à l'extrémité gauche  etc

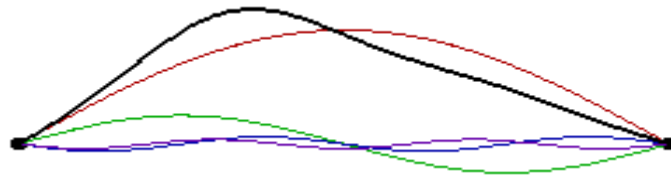
Exemples de profils pour la guitare (profil vu au ralenti pour différentes cordes pincées) : voir la vidéo intéressante suivante (et amusez-vous éventuellement à en faire autant si vous le souhaitez quand vous aurez le temps un jour dans votre vie) :

<http://www.koreus.com/video/guitare-corde-oscillation-iphone.html>

Document 5 : Le profil de la corde vibrante peut être décomposé en vibrations plus simples qui correspondent aux modes propres de la corde

Exemple de décomposition d'un profil en les différents modes propres correspondants :

Le profil correspondant suivant est celui d'une corde pincée pas tout à fait en son centre. La décomposition de Fourier indique les différents modes propres qui permettent d'obtenir ce profil (le profil est en trait épais et les modes propres qui sont toujours des sinusoides sont en traits plus fins : si on fait la somme des 5 sinusoides, on retrouve le profil) :



La corde ainsi mise en vibration va osciller comme si les différents modes propres ainsi figurés étaient superposés.

En changeant de profil oscillant, on ne change pas la nature des modes propres mais on change leur nombre et/ou leur amplitude dans la décomposition du profil en ses différents modes propres. Pour une simulation très bien faite, en fonction du temps, de la corde d'un clavecin ou d'une guitare, voir le site suivant : http://web.cortial.net/bibliohtml/clav_a.html puis choisir l'icône java (mettre à jour et accepter java éventuellement sur votre ordinateur) ou directement http://web.cortial.net/bibliohtml/clav_a_j.html. Visualiser notamment que quand on pince au milieu de la corde, les modes propres impaires apparaissent dans la décomposition mais pas les modes paires (leurs amplitudes sont nulles)

Questions

1) Une corde vibrante permet d'émettre un son. Pourquoi les instruments à corde ne sont-ils pas uniquement composés de cordes ?

2) a) Chaque mode propre apparaissant dans la décomposition du profil de la corde possède une fréquence correspondant à une des fréquences propres de la corde. Rappeler les expressions de ces fréquences. Quel est le lien simple entre la fréquence f_n corde du $n^{\text{ème}}$ mode propre de la corde et la fréquence f_1 du premier mode propre de la corde ?

b) **Chaque fréquence propre f_i corde de la corde est à l'origine d'une fréquence f_i son émise dans le son émis et entendu par l'auditoire avec la même valeur.** Toutes ces fréquences sont émises en même temps. La $1^{\text{ère}}$ fréquence propre de la corde, si le 1^{er} mode propre est présent dans la décomposition du profil de la corde, correspond toujours à la fréquence du fondamental du son émis. La $2^{\text{ème}}$ fréquence propre va correspondre à quelle fréquence pour le son émis ? Justifier. La $n^{\text{ème}}$ fréquence propre va correspondre à quelle fréquence pour le son émis ? Justifier. Mettre ces résultats sous la forme d'un tableau récapitulatif.

c) En déduire pourquoi le son émis par une corde n'est pas un bruit.

d) Suivant la façon dont est jouée une corde (frottée, pincée, frappée, à un endroit ou à un autre), on peut entendre des sons différents ayant pourtant la même hauteur, la même intensité et la même durée. Qu'est ce qui les différencie ? Expliquer d'où provient cette différence.