

CONCOURS GÉNÉRAL DES LYCÉES

—

SESSION 2020

—

**PHYSIQUE-CHIMIE**

(Classes de terminale S)

Durée : 5 heures

—

*L'usage de la calculatrice avec mode examen actif est autorisé.  
L'usage de la calculatrice sans mémoire « type collège » est autorisé.*

*Le sujet couvre les pages numérotées de 1 à 21.*

**Consignes aux candidats**

- Ne pas utiliser d'encre claire
- N'utiliser ni colle, ni agrafe
- Numéroté chaque page en bas à droite (numéro de page / nombre total de pages)
- Sur chaque copie, renseigner l'en-tête + l'identification du concours :

Concours / Examen : CGL

Epreuve : 101

Matière : PHCH

Session : 2020



## Autour du violon



Le candidat est invité à se référer régulièrement à l'annexe qui contient les données nécessaires à la résolution du problème et un formulaire. Cette annexe se trouve au début du sujet. Les différents documents présents dans le sujet contiennent aussi des données nécessaires à la résolution des questions posées.

Les réponses aux questions ne sauraient être de simples affirmations et devront être accompagnées d'une justification.

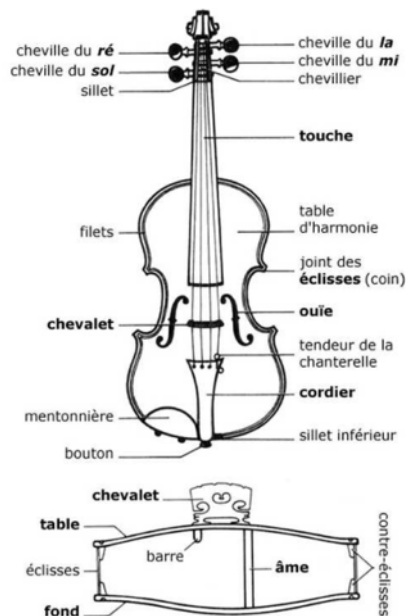
Le sujet est constitué de deux parties largement indépendantes.

Certaines questions, repérées par une barre en marge, ne sont pas guidées et demandent de l'initiative de la part du candidat. Les pistes de recherche doivent être consignées par le candidat sur sa copie ; si elles sont pertinentes, elles seront valorisées.

**Tournez la page S.V.P.**

## Annexe

### Description d'un violon



Les notes fondamentales jouées par chacune des cordes sont le  $mi_4$  (corde du mi), le  $la_3$  (corde du la), le  $ré_3$  (corde du ré), et le  $sol_2$  (corde du sol). La longueur commune de ces cordes est égale à 33 cm.

Note	$mi_4$	$la_3$	$ré_3$	$sol_2$
Fréquence (Hz)	659	440	294	196

### Données physiques

Nombre d'Avogadro  
Constante de Planck  
Célérité de la lumière dans le vide  
Permittivité diélectrique du vide  
Charge élémentaire  
Masse de l'électron  
Électronvolt  
Intensité de la pesanteur terrestre

$N_A = 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$   
 $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$   
 $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$   
 $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$   
 $e = 1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$   
 $m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$   
 $1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$   
 $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

## Tableau périodique des éléments

**Tournez la page S.V.P.**



## TRICHLOROMÉTHANE

### Danger

H302 - Nocif en cas d'ingestion

H315 - Provoque une irritation cutanée

H319 - Provoque une sévère irritation des yeux

H331 - Toxique par inhalation

H351 - Susceptible de provoquer le cancer

H361d - Susceptible de nuire au fœtus

H372 - Risque avéré d'effets graves pour les organes à la suite d'expositions répétées ou d'une exposition prolongée

Nota : Les conseils de prudence P sont sélectionnés selon les critères de l'annexe 1 du règlement CE n° 1272/2008.

200-663-8

Source : <http://www.inrs.fr/>

## Formulaire

### Force électrique

Toute particule de charge  $q$  plongée dans un champ électrique  $\vec{E}$  est soumise à la force électrique  $\vec{F}_{el}$  telle que :

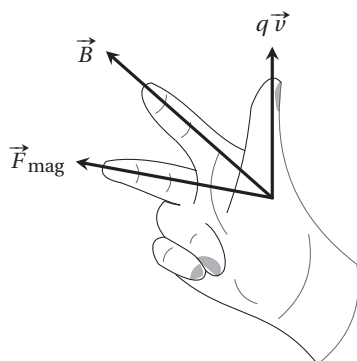
$$\vec{F}_{el} = q \vec{E}.$$

### Force magnétique

Une particule de charge  $q$  animée d'une vitesse  $\vec{v}$  plongée dans un champ magnétique  $\vec{B}$  est soumise à la force  $\vec{F}_{mag}$  telle que :

$$\vec{F}_{mag} = q \vec{v} \wedge \vec{B}.$$

Le symbole  $\wedge$  se lit « vectoriel ». Il désigne l'opérateur produit vectoriel. Les caractéristiques de cette force sont décrites ci-après.



La force magnétique  $\vec{F}_{mag}$  est à la fois orthogonale au vecteur vitesse  $\vec{v}$  et au vecteur champ magnétique  $\vec{B}$ . Pour déterminer la direction et le sens de la force magnétique, il est possible d'utiliser la *règle de la main droite* : lorsque  $q \vec{v}$  est porté par le pouce de la main droite (attention au signe de  $q$ !),  $\vec{B}$  par l'index de la main droite, alors la force  $\vec{F}_{mag}$  est portée par le majeur de la main droite, comme sur la figure ci-contre (dessinée pour  $q > 0$ ).

Lorsque les vecteurs  $q \vec{v}$  et  $\vec{B}$  sont orthogonaux, la norme de la force magnétique  $\|\vec{F}_{mag}\|$  est donnée par la relation suivante :

$$\|\vec{F}_{mag}\| = |q| \|\vec{v}\| \|\vec{B}\|.$$

### Énergie cinétique d'une particule relativiste

L'énergie cinétique d'une particule de masse  $m$  se déplaçant à une vitesse de norme  $v$ , strictement inférieure à la célérité de la lumière dans le vide  $c$ , s'exprime comme suit :

$$E_c = (\gamma - 1)mc^2,$$

où  $\gamma$  est le facteur de Lorentz :

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

### Formulaire mathématique

- *Dérivation d'une fonction composée* : la dérivée de la fonction  $t \mapsto f(at + b)$  où  $f$  est une fonction dérivable et  $a$  et  $b$  deux nombres réels est donnée par la relation suivante :

$$[f(at + b)]' = af'(at + b).$$

- *Valeur moyenne d'une grandeur périodique* : la valeur moyenne  $s_{\text{moy}}$  d'une grandeur  $s$  périodique de période  $T$  est définie par :

$$s_{\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^T s(t) dt.$$

- Soient  $a$ ,  $b$  et  $c$  trois nombres réels et soit  $f$  une fonction définie et continue sur  $\mathbb{R}$ . On peut alors établir l'égalité suivante :

$$\int_a^b f(t) dt = \int_a^c f(t) dt + \int_c^b f(t) dt.$$

- *Équation d'un cercle* : l'équation, en coordonnées cartésiennes, du cercle de centre  $C(x_0, y_0)$  et de rayon  $R_0$  s'écrit :

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R_0^2.$$

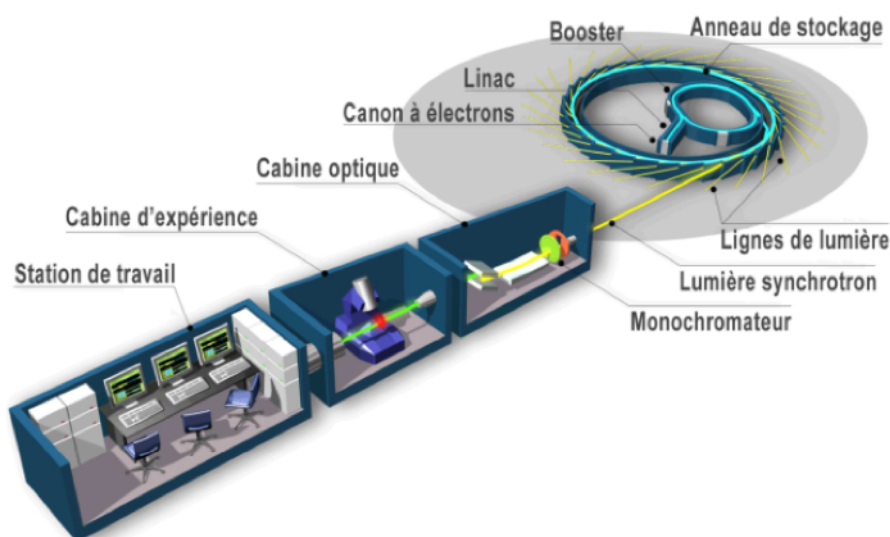
# I. Le vernis des violons

## 1) La lumière sur le vernis des Stradivarius

Félix Savart, dans « Mémoire sur la construction des instruments à cordes et à archets », procède à une étude du fonctionnement d'un violon. En collaboration avec le célèbre luthier français Jean-Baptiste Villaume, il essaie de percer les secrets de fabrication des violons d'Antonio Stradivari, légendaire luthier italien. Le vernis utilisé par Antonio Stradivari pour revêtir ses prestigieux instruments fait depuis plus de deux siècles l'objet de multiples hypothèses et controverses. Une formulation secrète aurait ainsi pu être à l'origine de la sonorité, réputée et tant admirée, de ses instruments. Plusieurs expériences ont été récemment mises en œuvre afin de percer ce mystère. L'une d'entre elles, menée au synchrotron SOLEIL à Saclay, a permis d'examiner un échantillon de vernis prélevé sur un violon, « le Provigny », réalisé par Antonio Stradivari.

### Document n°1 : à propos du synchrotron SOLEIL

Source : <http://www.synchrotron-soleil.fr/>



Lorsqu'une particule chargée est accélérée, elle perd de l'énergie mécanique sous forme de rayonnement électromagnétique. Dans le cas d'une particule chargée relativiste, ce rayonnement, qui possède une large étendue spectrale, est appelé lumière synchrotron et peut être utilisé pour sonder la matière.

Dans le synchrotron SOLEIL, les particules utilisées sont des électrons. Ce synchrotron peut être décrit de manière simplifiée en quatre parties (voir figure ci-dessus) :

- Un accélérateur linéaire d'électrons (canons à électrons + LINAC) : les électrons sont produits par un canon à électrons. Dans l'accélérateur linéaire (LINAC), de 16 mètres de long, ils sont accélérés sous l'action d'un champ électrique uniforme tout en étant regroupés par paquets, ce qui permet d'obtenir un faisceau pulsé d'électrons. À la sortie du LINAC, chaque électron possède une énergie cinétique moyenne de 100 MeV.
- Le booster : après la première accélération, le faisceau d'électrons est dirigé vers un deuxième accélérateur, circulaire, appelé booster qui porte leur énergie cinétique moyenne à la valeur de fonctionnement nominale de SOLEIL, soit 2,75 GeV.
- Un anneau de stockage : il y règne un vide poussé. Les électrons y circulent en suivant une trajectoire circulaire, dont le rayon  $R_0$  vaut 56 m, sous l'action d'un champ magnétique  $\vec{B}$ .
- Les lignes de lumière : une partie du rayonnement synchrotron produit par les électrons en mouvement circulaire est utilisée dans des laboratoires afin de mener à bien l'expérience prévue.

À l'exception des questions 6 et 11, l'étude est menée dans le cadre de la physique classique. Les pertes d'énergie par rayonnement sont négligées sauf dans les questions 10 et 11.



On modélise l'accélérateur linéaire d'électrons par deux électrodes en forme de grilles métalliques planes entre lesquelles règne un champ électrique  $\vec{E}$  uniforme. Les électrons sont émis par une électrode (cathode) située à l'abscisse  $x = 0$  avec une vitesse considérée comme nulle. Sous l'effet du champ électrique, ils se déplacent rectilignement vers l'électrode (anode) située à l'abscisse  $x = D$  (voir figure 1). On fait l'hypothèse que les électrons dans le LINAC sont indépendants et que chaque électron est seulement soumis à la force électrique exercée par le champ électrique  $\vec{E}$ . L'influence du poids de l'électron est négligée dans toute cette partie.

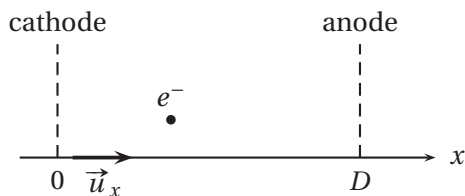


FIGURE 1 – Schématisation de l'accélérateur linéaire LINAC.

**1** – Reproduire le schéma de la figure 1 et y représenter la force électrique qui s'exerce sur un électron (repéré par le symbole  $e^-$ ) ainsi que le vecteur champ électrique  $\vec{E} = E\vec{u}_x$  nécessaire à son accélération depuis la cathode vers l'anode. En déduire le signe de la valeur algébrique  $E$  du champ électrique, puis de la différence de potentiel électrique (auss appelé tension)  $U = -ED$  appliquée entre les deux plaques.

**2** – Montrer que l'expression du travail  $W$  de la force électrique entre la cathode et l'anode est  $W = eU$ . En utilisant le théorème de l'énergie cinétique, établir le lien entre  $E_c$ , l'énergie cinétique de l'électron au niveau de l'anode à la sortie de l'accélérateur LINAC, et le travail  $W$  de la force électrique.

**3** – En déduire les valeurs de la tension accélératrice  $U$  et de la norme  $|E|$  du champ électrique qui interviennent dans ce modèle du LINAC. Commenter ces résultats sachant que l'air sec à pression atmosphérique devient conducteur (formation d'arcs électriques) lorsque le champ électrique y dépasse la valeur de  $3,6 \times 10^6 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ .

**4** – Justifier, en se basant sur des estimations numériques, qu'il est bien légitime de négliger l'influence du poids de l'électron pendant cette première phase d'accélération.

**5** – Déterminer l'expression de la vitesse de l'électron en sortie du LINAC en fonction de  $U$ ,  $e$  et  $m_e$ . Calculer la valeur de cette vitesse et la comparer à  $c$ . Que pensez-vous de la validité de l'étude menée dans le cadre de la physique classique?

Après la seconde phase d'accélération, en sortie du booster, l'énergie cinétique de l'électron est égale à 2,75 GeV. Sa vitesse est proche de celle de la lumière dans le vide. Il convient donc d'apporter des corrections relativistes aux expressions déterminées dans le cadre de la physique classique.

**6** – Déterminer la valeur du facteur de Lorentz  $\gamma$  de l'électron à la sortie du booster. En déduire ensuite une valeur approchée de la norme  $v_1$  du vecteur vitesse de l'électron en sortie du booster.

À la sortie du booster, l'électron entre dans l'anneau de stockage circulaire à la vitesse  $v_1$  précédemment calculée. Il y suit une trajectoire circulaire de rayon  $R_0 = 56 \text{ m}$  sous l'effet d'un champ magnétique  $\vec{B}$  uniforme, orienté selon une direction orthogonale au plan de la trajectoire, qui est représentée, ainsi que son sens de parcours, sur la figure 2.

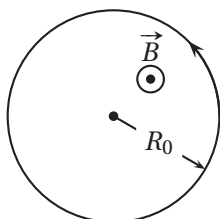


FIGURE 2 – Représentation de la trajectoire circulaire d'un électron dans l'anneau de stockage. Le sens de parcours est indiqué par une flèche sur la trajectoire circulaire. Le champ magnétique est orienté orthogonalement au plan de la figure et pointe vers le lecteur.

**Tournez la page S.V.P.**

7 – Reproduire le schéma de la figure 2 et le compléter en y représentant, en un point de la trajectoire, le vecteur vitesse de l'électron, la force magnétique subie par ce dernier et le vecteur accélération de l'électron. La réponse devra être justifiée.

8 – Justifier que le travail de la force magnétique sur une portion quelconque de la trajectoire circulaire est nul. Que peut-on en déduire en ce qui concerne la norme de la vitesse de l'électron ?

9 – Justifier que la norme de l'accélération de l'électron s'écrit  $a = \omega_c v_1$  où  $\omega_c = eB/m_e$  est une constante.

La puissance  $P$  rayonnée par un électron d'accélération  $a$  est donnée par la formule de Larmor :

$$P = \frac{e^2}{6\pi\epsilon_0 c^3} a^2,$$

où  $\epsilon_0$  est une constante, appelée *permittivité diélectrique du vide*. Pour le mouvement circulaire considéré, on précise que  $a = \frac{v_1^2}{R_0}$ .

10 – En considérant que la vitesse de l'électron reste quasiment constante, montrer que l'énergie perdue sur un tour vaut :

$$E_{\text{perdue}} = \frac{e^2 v_1^3}{3\epsilon_0 R_0 c^3}.$$

En tenant compte des effets relativistes, la relation précédente devient :

$$E_{\text{perdue}} = \gamma^4 \frac{e^2 v_1^3}{3\epsilon_0 R_0 c^3}.$$

11 – Dans l'anneau, se trouvent des cavités accélératrices qui permettent de compenser la perte d'énergie due au rayonnement. Déterminer la valeur de l'énergie, en keV, à fournir par électron et par tour.

12 – Pour quelle raison règne-t-il un vide poussé dans l'anneau de stockage ?

Une des propriétés du rayonnement synchrotron est sa large étendue spectrale. L'examen du vernis du violon doit se faire en utilisant un rayonnement infrarouge intense.

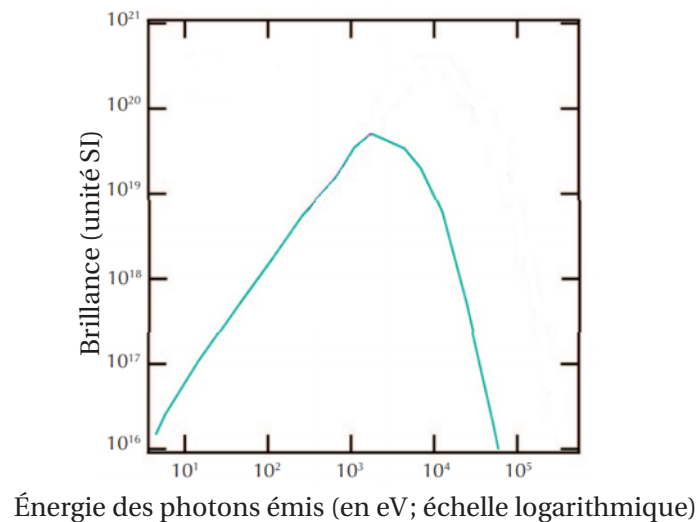


FIGURE 3 – Brillance spectrale du synchrotron SOLEIL. Cette grandeur est proportionnelle au flux de photons disponible sur l'échantillon, c'est-à-dire au nombre de photons reçus par unité de temps sur la surface exposée de l'échantillon.

13 – Vérifier que le synchrotron SOLEIL produit, entre autres, un rayonnement infrarouge.

14 – Quel est le rôle du monochromateur représenté dans le document n°1 à la sortie de l'anneau de stockage et à l'entrée de la ligne de lumière ?

## Document n°2 : Stradivarius, le secret du vernis dévoilé

D'après R. Bekhou et al., « Microscopies synchrotron à SOLEIL », Photoniques, 72, 2014.



« Le Provnigny » fait partie des instruments d'Antonio Stradivari les mieux conservés. Cet instrument, datant de 1716, est aujourd'hui exposé dans la collection permanente du musée de la musique à Paris. Grâce, en particulier, aux analyses effectuées en microscopie infrarouge sur la ligne SMIS du synchrotron SOLEIL, il a été possible de montrer que, sur « le Provnigny », Stradivari a appliqué un vernis constitué de deux très fines couches (voir figure 4). La première couche, simplement à base d'huile, similaire à celle utilisée par les artistes-peintres, offre une légère pénétration du bois de l'instrument. La seconde couche est un mélange d'huile et de résine de pin. Stradivari y a incorporé différents pigments utilisés en peinture, tels que l'hématite (qui est un oxyde de fer) et dont la courbe de réflectance est donnée en figure 5.

Ces recherches ont eu un écho dans la presse, comme en témoigne l'extrait de l'article « Un des secrets des stradivarius dévoilé » paru dans Le Monde (Nathaniel Herzberg, 4 décembre 2009) :

« Les échantillons ont alors pris le chemin de Saclay, dans l'Essonne, pour être analysés en lumière infrarouge dans le synchrotron Soleil. Cet immense accélérateur d'électrons permet de disposer d'une source suffisamment intense pour dresser la cartographie chimique d'un matériau. Et c'est là que l'information essentielle est tombée : le maître utilisait un simple vernis à l'huile. Pas de sous-couche dopée aux extraits de peau, d'os, ou d'esturgeon, comme le voulaient certaines légendes. »

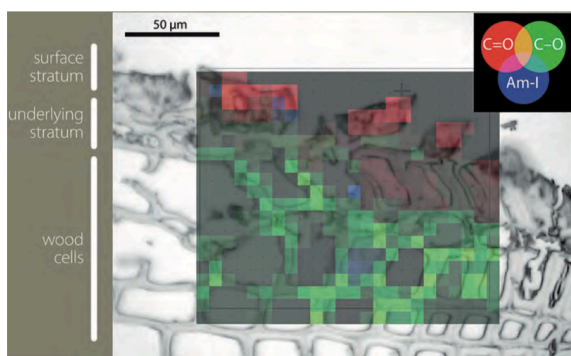


FIGURE 4 – Image de microscopie infrarouge obtenue sur la ligne SMIS du synchrotron SOLEIL sur la coupe du violon « le Provnigny ». D'après : J.P. Échard et al., Angewandte Chemie International Edition, 2010, 49(1) : 197-201.

L'image obtenue permet d'identifier et localiser la présence des composés organiques (huile, résine) à l'échelle des cellules du bois. En vert : liaisons simples C — O; en rouge : groupes caractéristiques C=O; en bleu : amides, indiquant la présence de protéines.

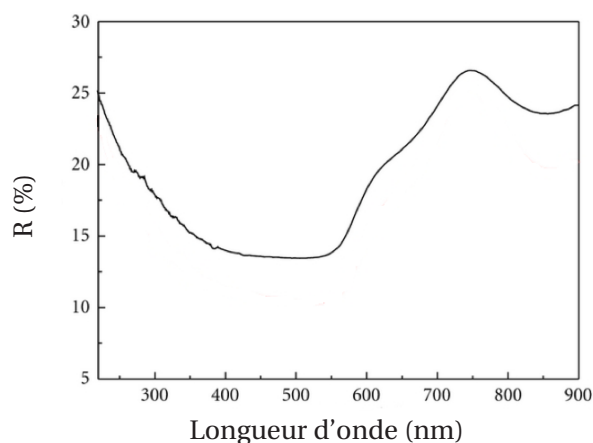


FIGURE 5 – Courbe de réflectance de l'hématite extraite de la référence suivante : S. Hu et al., International Journal of Photoenergy, vol. 2012, article ID 598713, 2012.

La réflectance, exprimée par un pourcentage, est la proportion de lumière réfléchiée par la surface d'un matériau.

15 – Justifier les conclusions obtenues sur la composition du vernis présentées dans l'article de presse « Un des secrets des stradivarius dévoilé ». Quelle pouvait être l'intention d'Antonio Stradivari en appliquant ce vernis?

**Tournez la page S.V.P.**

Une réponse argumentée est attendue.

## 2) L'huile de lin

Le vernissage d'un instrument entraîne une modification de son timbre. Il est aussi fréquemment admis que la sonorité des instruments à cordes évolue pendant plusieurs années après leur fabrication, particulièrement pendant le processus de séchage ou de polymérisation du vernis. Chaque luthier cherche à optimiser sa recette de vernis afin de garantir au violon une protection durable, de lui donner un bel aspect brillant, mais aussi de préserver sa sonorité sur le long terme. La couche de vernis doit être « souple » afin de permettre aux fibres de bois de vibrer correctement. La majorité des vernis sont des vernis à l'huile. L'huile utilisée doit être siccative, c'est-à-dire qu'elle doit avoir une bonne capacité à sécher. À cette huile, selon la recette du luthier, sont ajoutés divers ingrédients : pigments, essence de térébenthine, colophane, etc.

D'un point de vue chimique, une huile est un mélange de triglycérides d'acides gras (triesters obtenus à partir de glycérol et d'acides gras, acides carboxyliques à longues chaînes carbonées).

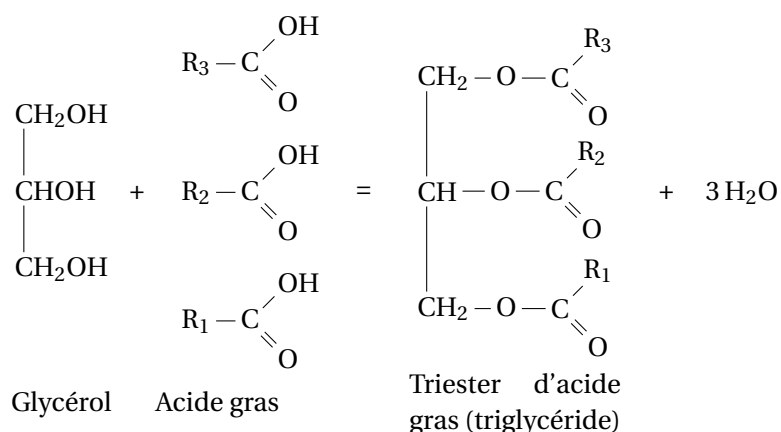


FIGURE 6 – Obtention d'un triester d'acide gras à partir de glycérol et d'acide gras.  $R_1$ ,  $R_2$  et  $R_3$  représentent des chaînes carbonées.

Ces acides gras peuvent être insaturés si leurs chaînes carbonées comportent des doubles liaisons carbone-carbone ou, à l'inverse, ils peuvent être saturés. Plus une huile comporte d'acides gras insaturés, plus elle est siccative.

La composition (pourcentage massique) de quelques huiles végétales, ainsi que les formules des acides gras qu'elles contiennent sont données dans les deux tables 1 et 2.

Huiles	C <sub>18:3</sub> Ln (%)	C <sub>18:2</sub> L (%)	C <sub>18:1</sub> O (%)	C <sub>18:0</sub> S (%)	C <sub>16:0</sub> P (%)
Huile de lin	45-58	13-18	17-22	4-7	5-7
Huile de soja	6-12	46-56	20-30	2-7	7-10
Huile de carthame	1	62-80	10-20	2-7	6-8
Huile d'œillette	0	65-78	16-25	2-5	4-8

TABLE 1 – Composition de quelques huiles végétales.

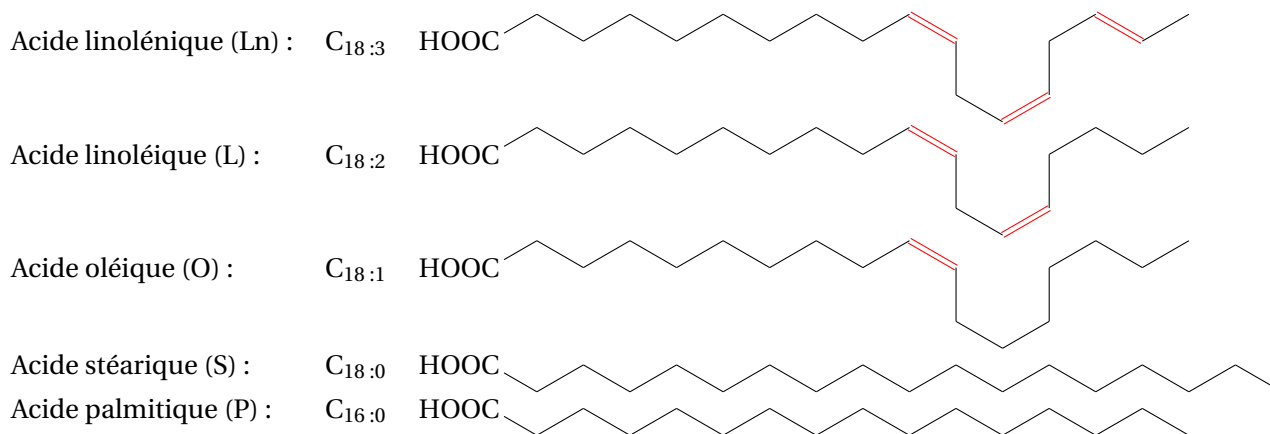


TABLE 2 – Quelques acides gras.

**16 – Justifier l'emploi de l'huile de lin dans la majorité des vernis à l'huile utilisés par les luthiers.**

Les propriétés siccatives d'une huile peuvent être quantifiées par la détermination de son indice d'iode. En effet, l'indice d'iode d'un corps gras est un nombre sans unité correspondant à la masse de diiode,  $I_2$ , capable de se fixer sur les doubles liaisons des acides gras contenus dans 100 g de corps gras, une molécule de diiode s'additionnant sur une double liaison. Cet indice permet donc de connaître le nombre de doubles liaisons présentes dans ce corps gras.

Sur l'étiquette d'un flacon d'huile de lin de 100 mL utilisé par un luthier, on peut lire :

Composition massique en acides gras (en %)

Acide linolénique	Acide linoléique	Acide oléique	Acides saturés
53	13	22	12

Masse volumique à 20°C :  $0,93 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$ .

### 2.1) Détermination de l'indice d'iode théorique de l'huile de lin

**17 – Déterminer la quantité de matière de chacun des acides gras insaturés présents dans ce flacon d'huile de lin.**

**18 – Écrire l'équation de la réaction du diiode sur une double liaison  $C=C$ .**

**19 – En déduire l'indice d'iode théorique de cette huile de lin.**

### 2.2) Détermination expérimentale de l'indice d'iode de l'huile de lin

La détermination expérimentale de cet indice d'iode repose sur la méthode de Wijs.

• Le protocole mis en œuvre au laboratoire pour mesurer l'indice d'iode d'une huile est le suivant :

- **Étape 1 :** dans un premier erlenmeyer de 250 mL à col rodé noté A, on pèse précisément une masse d'huile de lin voisine de 250 mg. On ajoute 15 mL de chloroforme, puis 25,0 mL de réactif de Wijs. On bouche et on agite.

Dans un second erlenmeyer de 250 mL à col rodé noté B, on introduit 15 mL de chloroforme, puis 25,0 mL de réactif de Wijs. On bouche et on agite.

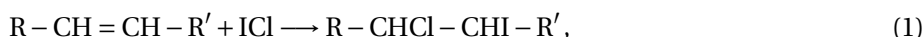
On place les deux erlenmeyers à l'obscurité pendant une heure.

- **Étape 2 :** on ajoute ensuite 1 g d'iodure de potassium de formule KI (s) et 50 mL d'eau distillée dans chacun des deux erlenmeyers qui sont agités pendant 5 minutes.
- **Étape 3 :** on titre le contenu de chacun des deux erlenmeyers avec une solution de thiosulfate de sodium ( $2Na^+(aq) + S_2O_3^{2-}(aq)$ ) de concentration apportée en thiosulfate de sodium  $C = 0,20 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ .

**Tournez la page S.V.P.**

### ➤ Mesures expérimentales :

- masse d'huile de lin mesurée :  $m_{\text{huile}} = 252 \text{ mg}$ ;
- volumes de thiosulfate de sodium versés :
  - dans l'erenmeyer A :  $V_{\text{eq},A} = 4,00 \text{ mL}$ ;
  - dans l'erenmeyer B :  $V_{\text{eq},B} = 22,40 \text{ mL}$ .
- Le principe de la méthode de Wijs est le suivant :
  - **Étape 1** : le réactif de Wijs, chlorure d'iode  $\text{ICl}$  en solution dans de l'acide acétique pur, est ajouté en excès à une masse de corps gras mesurée avec précision. L'équation de la réaction entre le chlorure d'iode et une double liaison  $\text{C}=\text{C}$  est la suivante :



où  $R$  et  $R'$  sont des chaînes carbonées.

- **Étape 2** : le chlorure d'iode restant est transformé sous forme de diiode,  $\text{I}_2$ , par ajout d'une solution d'iodure de potassium ( $\text{K}^+(\text{aq}) + \text{I}^-(\text{aq})$ ) en large excès.
- **Étape 3** : pour chacun des mélanges réactionnels, on titre le diiode formé lors de l'étape 2 par une solution de thiosulfate de sodium. L'exploitation des titrages permet de déterminer l'indice d'iode du corps gras étudié.

### 2.3) À propos de l'étape 1

- 20 – Écrire l'équation de la réaction entre le chlorure d'iode et l'acide linoléique. On pourra utiliser la formule topologique, semi-développée ou brute de l'acide linoléique.
- 21 – À quel type de réaction appartient la réaction (1) ?
- 22 – Cette étape du protocole pourrait-elle être aisément mise en œuvre dans un laboratoire de lycée ?
- 23 – Expliquer le rôle de chacun des deux erlenmeyers dans la méthode de Wijs.

### 2.4) À propos de l'étape 2

- 24 – Déterminer l'équation de la réaction modélisant la deuxième étape du protocole.
- 25 – Proposer une explication quant aux cinq minutes d'agitation avant le titrage.

### 2.5) À propos de l'étape 3

- 26 – Les couples oxydant-réducteur mis en jeu lors du titrage sont  $\text{I}_2(\text{aq})/\text{I}^-(\text{aq})$  et  $\text{S}_4\text{O}_6^{2-}(\text{aq})/\text{S}_2\text{O}_3^{2-}(\text{aq})$ . En déduire l'équation de la réaction support du titrage.
- 27 – Soit  $n(\text{I}_2)_A$  et  $n(\text{I}_2)_B$ , les quantités de matière de diiode se trouvant respectivement dans les erlenmeyers A et B à l'issue de l'étape 2, avant les titrages. Exprimer chacune d'entre elles en fonction de  $C$ ,  $V_{\text{eq},A}$  ou  $V_{\text{eq},B}$ .
- 28 – En déduire l'expression des quantités de matière restantes  $n_{\text{restant}}(\text{ICl})$  dans les erlenmeyers à l'issue de l'étape 1 en fonction de  $C$ ,  $V_{\text{eq},A}$  ou  $V_{\text{eq},B}$ .
- 29 – En déduire l'expression de la quantité de matière de chlorure d'iode  $n_{\text{réagi}}(\text{ICl})$  ayant réagi, au cours de l'étape 1, avec les doubles liaisons des acides gras présents dans l'huile de lin en fonction de  $C$ ,  $V_{\text{eq},A}$  et  $V_{\text{eq},B}$ .
- 30 – En déduire la valeur de l'indice d'iode expérimental de cette huile de lin. Commenter.

### 2.6) Polymérisation du vernis

Certains vernis contiennent de la standolie de lin. La standolisation est une réaction de polymérisation thermique de l'huile, à très haute température (supérieure à  $270^\circ\text{C}$ ) en l'absence de dioxygène, au cours de laquelle une conversion des doubles liaisons présentes sur les chaînes insaturées des molécules de triglycérides se produit. La standolisation est d'autant plus efficace que la polymérisation est importante, et donc que la conversion des doubles liaisons a lieu. Le mécanisme de la réaction de standolisation est décrit ci-après dans la figure 7.

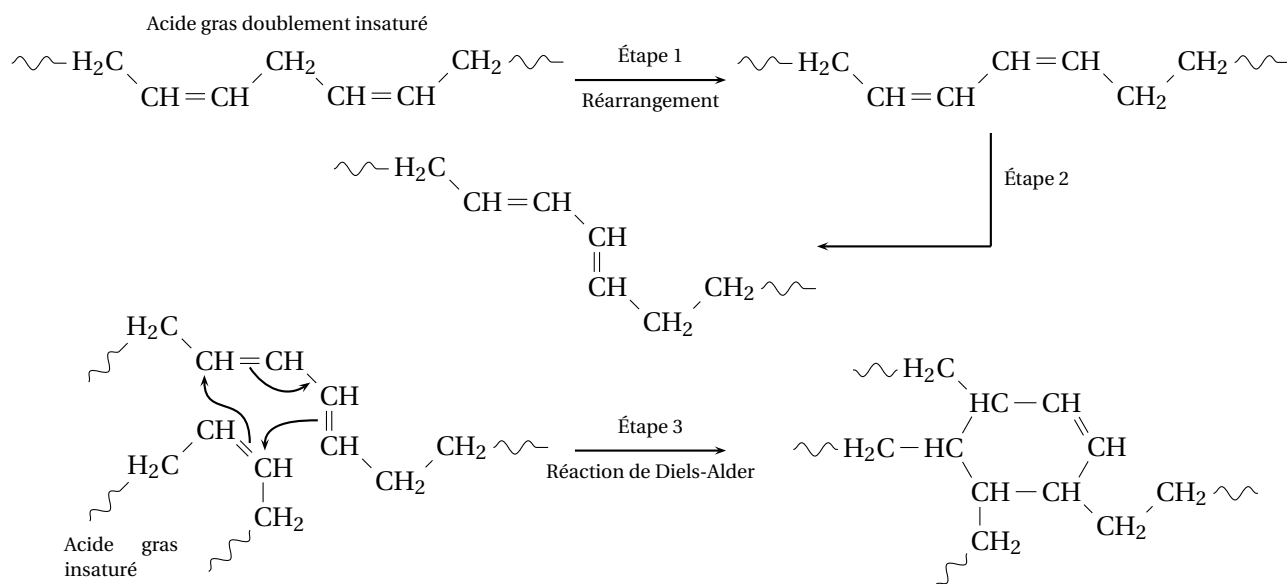


FIGURE 7 – Mécanisme de la réaction de standolisation.

**31** – Décrire les évolutions des acides gras au cours des étapes 1 et 2 du mécanisme.

**32** – Que représentent les flèches courbes dans l'étape 3?

**33** – Pourquoi la standolie de lin est-elle plus visqueuse que l'huile de lin?

Une étude de la cinétique de la standolisation de différentes huiles a été menée par Ornella Zovi lors de sa thèse<sup>1</sup> intitulée « Fonctionnalisation et photopolymérisation de l'huile de lin en vue de l'élaboration de nouveaux matériaux sans émissions de composés organiques volatils ».

Type d'huiles étudiées		Lin	Colza	Coton	Soja	Palme
Concentration massique (en %)	Acide linoléique	49	9	8	0	0
	Acide linoléique	13	28	39	47	10
	Acide oléique	21	49	27	19	35
	Acides saturés	17	14	26	34	55
Nombre de doubles liaisons par molécules de triglycérides		5,8	4,0	3,9	3,3	1,6
Indice d'iode		170	115	113	98	47
Siccativité		siccative	semi-siccative	non siccative		

Chaque huile a été placée dans un réacteur à 330°C sous atmosphère de diazote et sous agitation magnétique pendant 8h30. À intervalles de temps réguliers, une partie du mélange réactionnel a été analysée par spectrométrie RMN, la diminution du pic à 5,35 ppm, relatif aux protons éthyléniques (-CH=CH-) étant liée au taux de conversion des doubles liaisons. Le massif à 4,2 ppm qui correspond aux protons des deux CH<sub>2</sub>, provenant du glycérol et présents dans tous les triglycérides d'acides gras, sert de pic de référence car la hauteur de ce pic reste constante pour chaque huile. Quelques résultats expérimentaux figurent ci-après (figures 8 et 9).

1. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00560888>

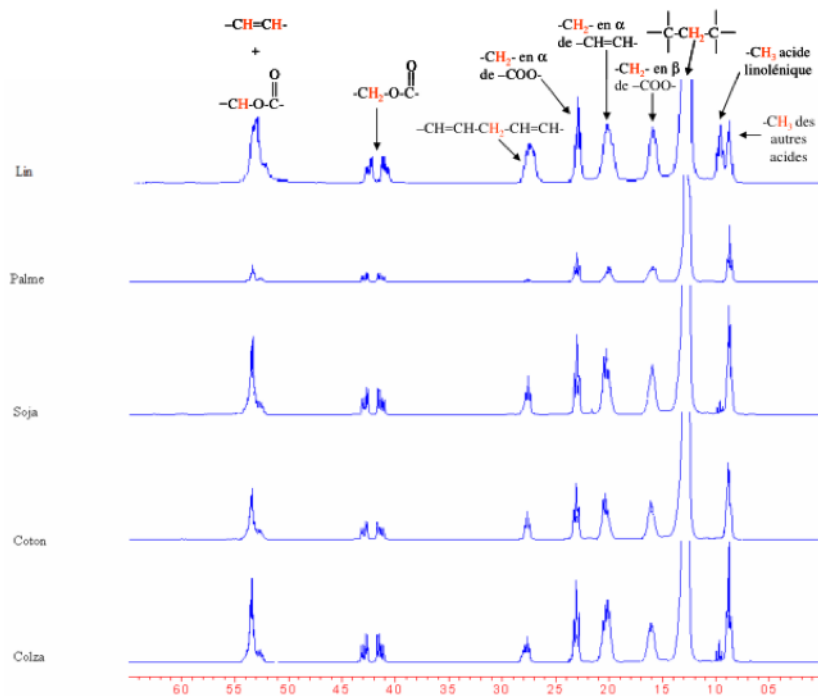


FIGURE 8 – Spectres RMN des différentes huiles.

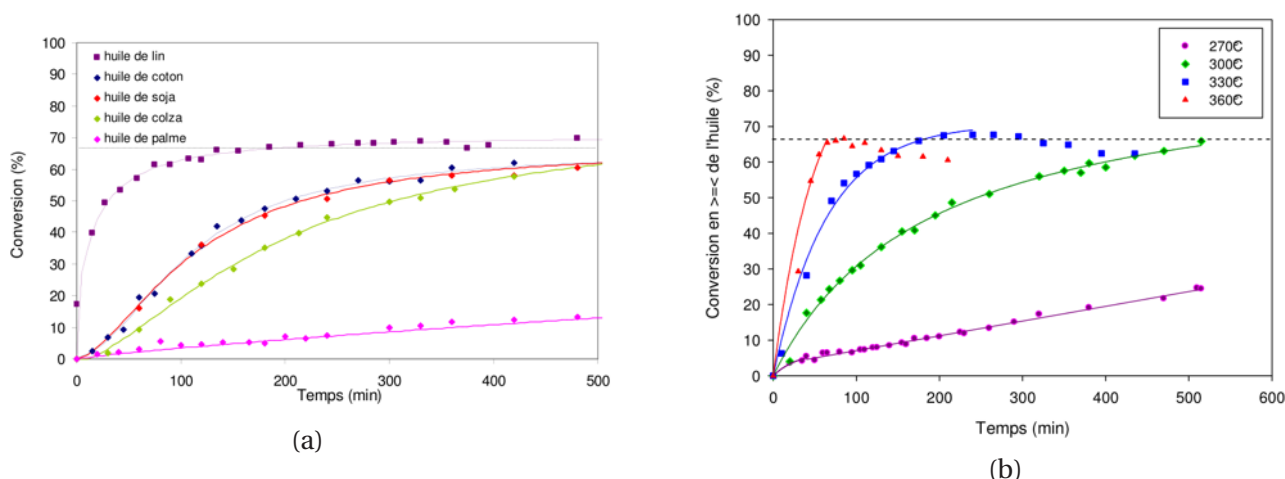


FIGURE 9 – (a) : évolution temporelle du taux de conversion des doubles liaisons des différentes huiles; (b) : évolution temporelle du taux de conversion des doubles liaisons de l'huile de lin en fonction de la température du réacteur.

34 – Dans le spectre RMN des huiles, justifier que le pic de référence soit un doublet et que sa hauteur reste constante.

35 – Justifier le choix de l'huile de lin pour fabriquer des standolies.

36 – Interpréter le comportement singulier de l'huile de palme lors de la standolisation.

37 – Discuter du choix des conditions expérimentales pour réaliser la standolisation.

## II. Jouer du violon

### 1) Le mouvement de Helmholtz

Dans l'ouvrage « Théorie physiologique de la musique » (1868), Hermann Ludwig von Helmholtz a observé et décrit le mouvement d'une corde de violon frottée par un archet. Ce mouvement, appelé *mouvement de Helmholtz* (noté par la suite mdH), est celui que le violoniste doit chercher à produire pour obtenir un son de qualité.



Considérons une corde de longueur  $L$ , sans épaisseur, tendue entre deux extrémités fixes. Le contact entre l'archet et la corde est supposé ponctuel et se fait en un point  $M$  de la corde situé à l'abscisse  $\beta L$  ( $0 \leq \beta \leq 1$ ) comptée depuis l'extrémité de la corde fixée au chevalet. L'archet se déplace perpendiculairement à la corde à la vitesse  $v_a$  par rapport au corps du violon (le sens de cette vitesse est indiqué sur la figure 10). La vitesse  $v_a$  est constante. Helmholtz a observé que la corde peut être décomposée en deux segments de droite reliés en un point  $P$  appelé *coin de Helmholtz* (voir figure 10). Cette déformation particulière est apparente sur la photographie de la figure 11.

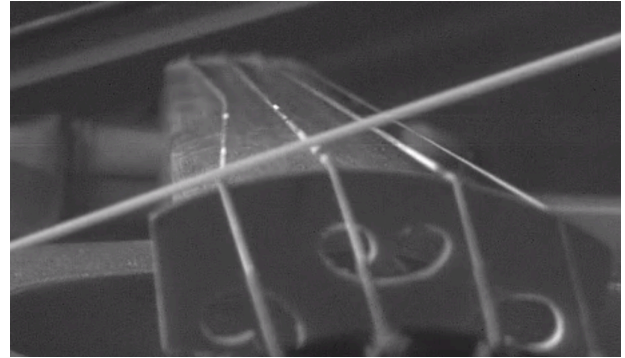
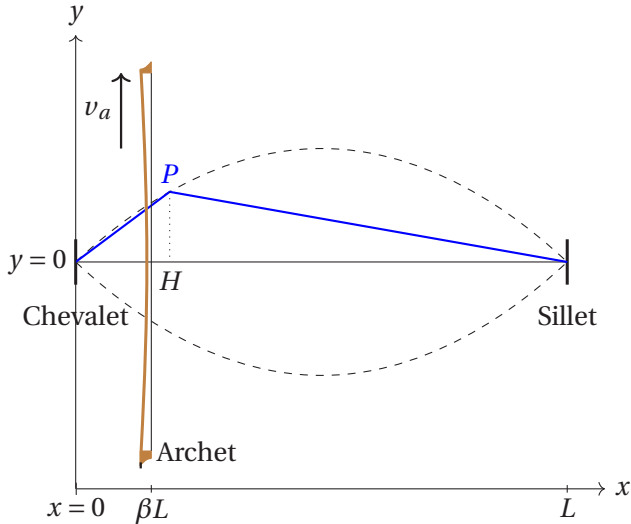
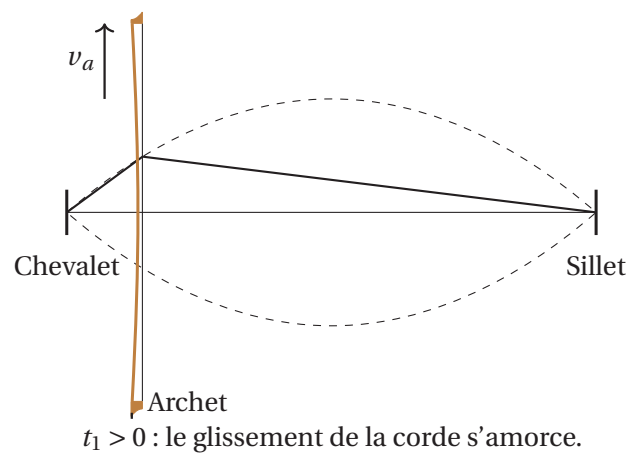
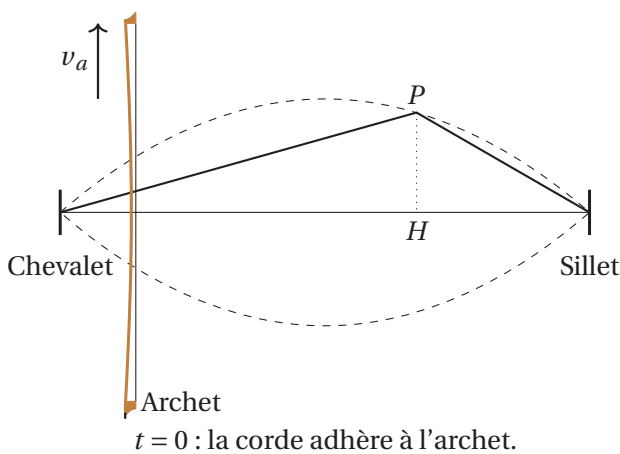


FIGURE 11 – Photographie d'une corde de violon frottée. Source : <https://www.youtube.com/watch?v=9oSP6EJpGvM>

FIGURE 10 – Déformation d'une corde de violon frottée.

D'un point de vue cinématique, la projection du coin  $P$  sur l'axe de la corde au repos, notée  $H$ , fait des allers-retours à la vitesse  $c_0$  entre les extrémités de la corde. Ce mouvement est périodique, de période  $T = \frac{2L}{c_0}$ . On peut montrer que la trajectoire du coin de Helmholtz  $P$  est constituée de deux arcs de parabole représentés en tirets sur la figure 10.

Lorsque l'archet frotte la corde, cette dernière adhère à l'archet pendant la durée où le point  $H$  est situé entre l'archet et le sillet. Lorsque le point  $H$  est situé entre le chevalet et l'archet, la corde glisse sur l'archet. La figure 12 représente quelques états successifs de la corde au cours d'une période du mouvement de Helmholtz.



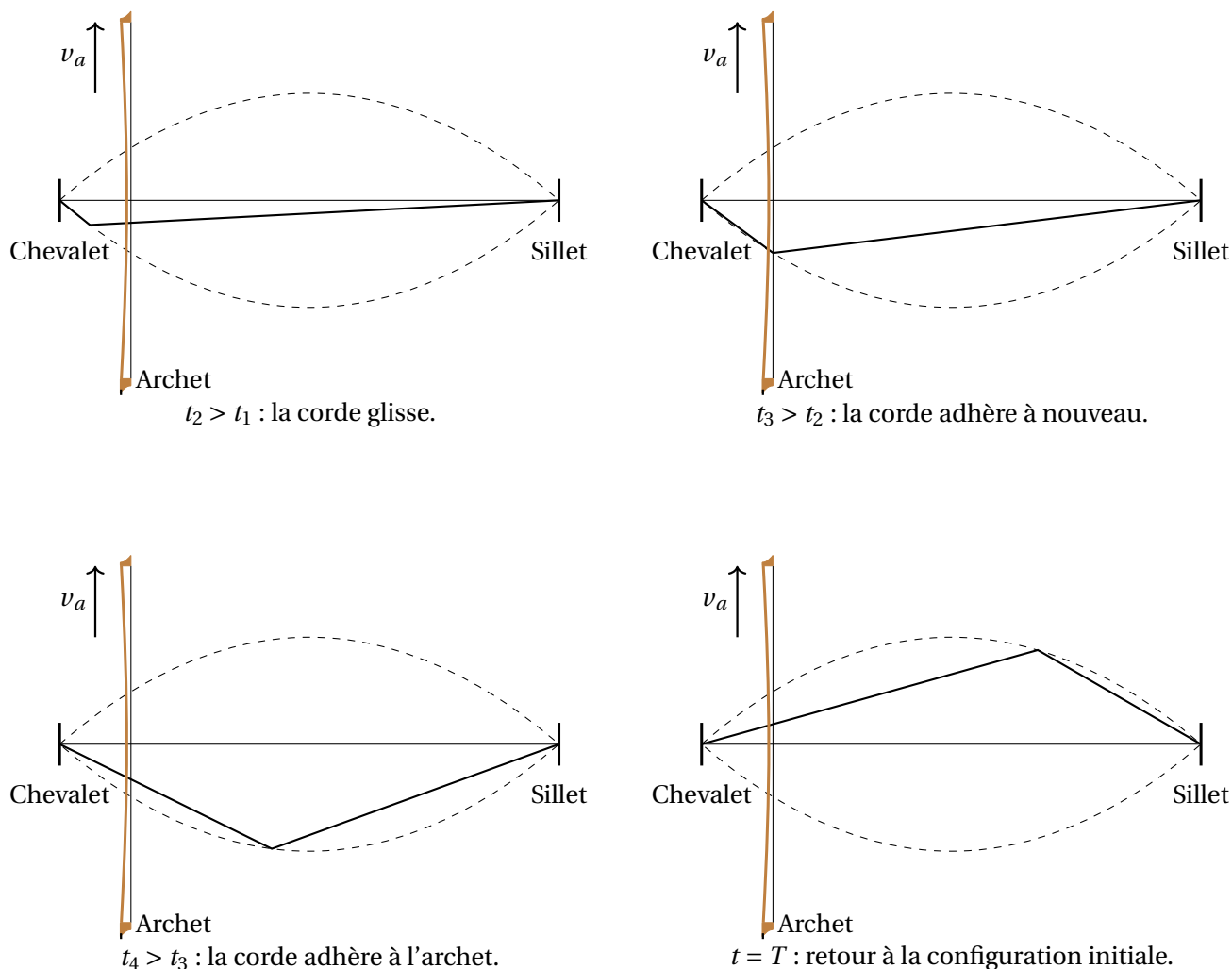


FIGURE 12 – Mouvement de Helmholtz décrit par une corde de violon. La déformation de la corde est représentée à différents instants successifs (de  $t = 0$  à  $t = T$ ).

Dans le mouvement de Helmholtz, un point de la corde retrouve sa position initiale après une période : sa vitesse moyenne sur une période est donc nulle.

**38** – Les ondes de déformation de la corde peuvent-elles être qualifiées de longitudinales ou transversales?

**39** – Quelle hypothèse permet de négliger tout phénomène de torsion de la corde?

**40** – Déterminer les valeurs de la période de vibration  $T$  et de la vitesse  $c_0$  correspondant à la vibration fondamentale de la corde du ré. Peut-on suivre la déformation de la corde à l'œil nu? Justifier la réponse.

On s'intéresse au mouvement du point  $M$  de la corde, d'abscisse  $x = \beta L$ , en contact avec l'archet.

**41** – Déterminer, en fonction de  $\beta$  et  $T$ , les expressions de  $T_a$  et  $T_g$ , durées respectives de la phase d'adhérence et de la phase de glissement.

**42** – Pendant la phase d'adhérence, le point  $M$  se déplace à la vitesse constante  $v_a$  par rapport au corps du violon. En utilisant la notion de valeur moyenne d'une grandeur périodique, justifier que la vitesse, supposée constante, du point  $M$  par rapport au corps du violon pendant la phase de glissement est donnée par la relation :  $v_g = -v_a \frac{1-\beta}{\beta}$ .

**43** – En déduire les expressions de la position du point  $M$ , notée  $y(t)$ , durant les phases de glissement et d'adhérence en considérant que le mouvement commence à la date  $t = 0$  par une phase de glissement avec  $y(t = 0) = 0$ .

**44** – Montrer que l'amplitude de déformation maximale  $y_m$  de la corde à l'abscisse du point  $M$  s'écrit :

$$y_m = \frac{1}{2} v_a T (1 - \beta).$$

**45** – Calculer la valeur de  $y_m$  pour la corde de ré d'un violon, pour une vitesse d'archet  $v_a = 0,20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  et  $\beta = 0,10$ . Commenter.

La figure 13 représente une mesure expérimentale de l'élongation  $y(t)$  d'une corde de violon pour différentes valeurs de la vitesse  $v_a$ .

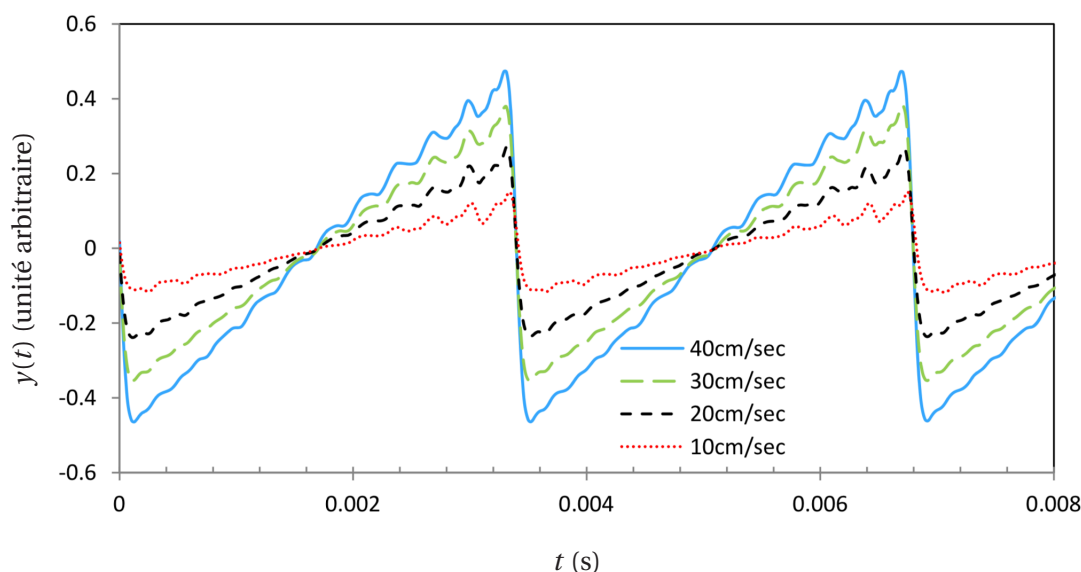


FIGURE 13 – Mesure de l'élongation d'une corde de violon pour différentes valeurs de la vitesse de l'archet. Source : <https://www.mne.psu.edu/lamancusa/bow/paper.pdf>

**46** – Commenter l'allure expérimentale de l'élongation de la corde  $y(t)$ , telle qu'elle apparaît dans la figure 13, en relation avec le modèle du mouvement de Helmholtz. Commenter l'influence de la vitesse  $v_a$  de l'archet sur cette élongation en relation avec le modèle théorique.

## 2) Un modèle d'oscillation entretenue

Afin d'interpréter l'alternance des phases d'adhérence et de glissement de la corde sur l'archet, on propose le modèle suivant. Un objet, de masse  $m$ , repose sur un tapis roulant. Cet objet est relié à un point fixe par l'intermédiaire d'un ressort de constante de raideur  $k$  (voir figure 14).

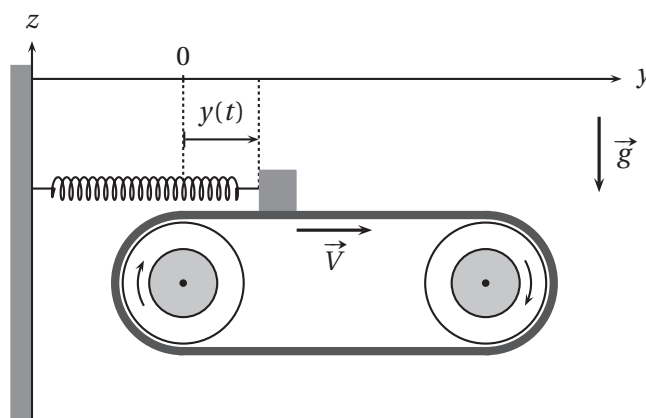


FIGURE 14 – Modèle d'un oscillateur analogue à la corde frottée par un archet.

La position de l'objet, modélisé par un point matériel, est repérée par son abscisse  $y(t)$ . Lorsque l'objet se trouve en  $y = 0$ , le ressort n'est ni tendu ni comprimé : sa longueur est égale à sa longueur à vide. On se donne pour objectif de montrer que le mouvement de l'objet est périodique et de calculer la période correspondante. Pour ce faire, on propose de construire un *portrait de phase*. Afin de découvrir cette notion, on commence par un cas simplifié, celui de l'oscillateur harmonique.

**Tournez la page S.V.P.**

## 2.1) Portrait de phase de l'oscillateur harmonique

Dans les questions 47 à 50, on fait l'hypothèse que le tapis est immobile ( $V = 0$ ) et que l'objet se déplace sans frottement sur le tapis. Compte tenu de ces hypothèses, on montre que la position de l'objet  $y(t)$  s'exprime sous la forme suivante (le calcul n'est pas demandé) :

$$y(t) = y_0 \cos(\omega_0 t),$$

où  $y_0$  et  $\omega_0$  sont deux constantes.

**47** – La *pulsation propre*  $\omega_0$  s'exprime en fonction de la masse  $m$  et de la raideur  $k$  sous la forme suivante :  $\omega_0 = k^{\alpha_1} m^{\alpha_2}$ , où  $\alpha_1$  et  $\alpha_2$  sont deux nombres réels. On précise que la constante de raideur  $k$  s'exprime en  $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ . Quelle est l'unité de la pulsation propre  $\omega_0$  dans le système international? Déterminer les valeurs numériques de  $\alpha_1$  et  $\alpha_2$  pour que l'expression de  $\omega_0$  en fonction de  $k$  et  $m$  corresponde bien à cette unité.

**48** – Déterminer l'expression de la vitesse de l'objet  $v(t) = \frac{dy}{dt}$  en utilisant la formule de dérivation d'une fonction composée donnée dans le formulaire.

On convient de représenter l'état de l'objet par un point  $N$  dans un plan muni d'un repère orthonormé. L'abscisse du point  $N$  est égale à  $\omega_0 y(t)$  et son ordonnée à  $v(t) = \frac{dy}{dt}$ . La courbe décrite par ce point  $N$  lorsque le temps évolue est appelée *portrait de phase* du système étudié.

**49** – Justifier que le portrait de phase de l'objet est un cercle, centré sur l'origine, et de rayon  $\omega_0 y_0$ . Préciser dans quel sens ce cercle est parcouru par le point  $N$  et quelle est la position initiale du point  $N$ .

**50** – Comment se traduit sur le portrait de phase le caractère périodique du mouvement de l'objet? Donner l'expression de la période  $T_0$  correspondante en fonction de  $\omega_0$ .

## 2.2) Portrait de phase de l'objet entraîné par le tapis

On considère maintenant que la partie supérieure du tapis se déplace, par rapport au sol, à la vitesse  $\vec{V} = V \vec{u}_y$ , avec  $V > 0$ . On tient aussi compte des forces de frottement qui s'exercent sur l'objet. L'action mécanique du tapis sur l'objet est modélisée par une force  $\vec{R} = R_t \vec{u}_y + R_n \vec{u}_z$  qui suit les lois de Coulomb du frottement de glissement :

- l'objet adhère au tapis tant que  $|R_t| \leq \mu_s |R_n|$  où  $\mu_s$  est le coefficient de frottement statique.
- lorsque l'objet glisse sur le tapis, alors  $|R_t| = \mu_d |R_n|$  où  $\mu_d$  est le coefficient de frottement dynamique ( $\mu_d < \mu_s$ ).

On admet que la force de rappel élastique que le ressort exerce sur l'objet s'écrit :  $\vec{F}_{\text{élastique}} = -ky(t) \vec{u}_y$ .

On choisit les conditions initiales suivantes :  $y(t=0) = 0$  et  $\frac{dy}{dt}(t=0) = V$ . Le mouvement de l'objet débute par une phase d'adhérence sur le tapis.

**51** – Déterminer l'expression de la vitesse par rapport au sol  $v(t)$  de l'objet durant la phase d'adhérence.

**52** – En appliquant la deuxième loi de Newton, montrer que la phase d'adhérence se maintient tant que  $|y| \leq \frac{\mu_s mg}{k}$ .

Le portrait de phase est représenté sur la figure 15, avec les mêmes conventions que précédemment : l'abscisse d'un point représentatif de l'état de l'objet est  $\omega_0 y(t)$  et son ordonnée est la vitesse  $v(t)$ . La phase de glissement correspond à une portion de cercle, centré sur le point  $C$  de coordonnées  $(\omega_0 \frac{\mu_d mg}{k}, 0)$ . Le cercle complet est parcouru, avec une vitesse angulaire constante, en une durée égale à la période  $T_0$  déterminée à la question 50.

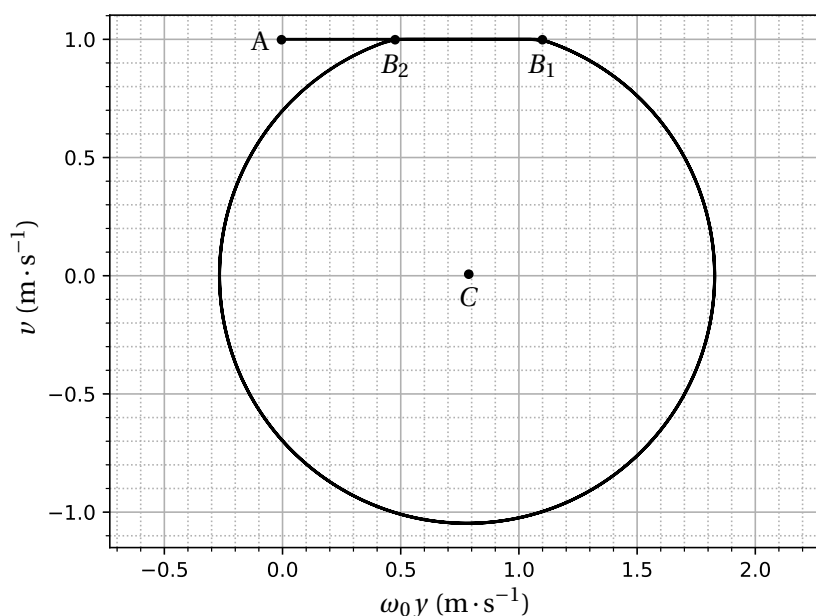


FIGURE 15 – Portrait de phase.

- 53** – Donner la valeur de la vitesse  $V$  utilisée pour tracer ce portrait de phase.
- 54** – Que représente le point  $A$ ? À quelle partie du portrait de phase correspond la phase d'adhérence?
- 55** – En exploitant la figure 15, justifier que le mouvement devient périodique, une fois le point  $B_2$  dépassé pour la première fois. Décrire ce mouvement périodique (on ne manquera pas d'indiquer ce qui se produit aux points  $B_1$  et  $B_2$ ). Préciser dans quel sens est parcouru le portrait de phase.
- 56** – En exploitant le portrait de phase, donner, pour le mouvement périodique, les valeurs des durées de la phase d'adhérence, de la phase de glissement et enfin de la période du mouvement sachant que  $T_0 = 1,0$  s.
- 57** – En quoi le modèle d'oscillation de l'objet entraîné par le tapis est-il pertinent pour décrire l'action de l'archet sur la corde? Quelles sont les grandeurs caractéristiques de la corde de violon analogues à la masse  $m$ , à la constante de raideur  $k$ , à la vitesse  $V$  et aux coefficients de frottement  $\mu_s$  et  $\mu_d$ ?
- 58** – En quoi ce modèle vous paraît-il critiquable pour décrire le mouvement d'une corde de violon frottée?

### 3) Mise en mouvement de la table d'harmonie

Dans le cas d'instruments à cordes comme le violon, une partie de l'énergie de la corde est transmise à la table d'harmonie via le chevalet, pour que la table d'harmonie puisse rayonner une onde acoustique. Le chevalet est mis en mouvement sous l'effet de la projection  $F_y$  selon  $\vec{u}_y$  (voir figure 10) de la tension de la corde, de norme  $F_0$ . Le chevalet met à son tour la table d'harmonie en mouvement. Plus les déformations de la table d'harmonie sont importantes et plus le son émis par le violon est puissant.

On propose d'estimer l'ordre de grandeur de la force  $F_y$  que la corde exerce sur le chevalet. À cette fin, on considère la déformation de la corde obtenue lorsque le coin de Helmholtz  $P$  se trouve sous l'archet, ce qui correspond à la configuration représentée sur la figure 10.

On précise que pour un angle  $\theta \ll 1$ , on peut faire l'approximation  $\sin \theta \simeq \theta$  et  $\tan \theta \simeq \theta$  (l'angle  $\theta$  étant exprimé en radians).

**59** – Établir la relation :  $F_y \simeq F_0 \frac{v_a T}{2L} \frac{1-\beta}{\beta}$ .

**60** – Pour une corde de ré métallique de la marque *d'Addario Heliocore*, la tension est  $F_0 = 51,2$  N. Calculer une valeur approchée de  $F_y$  pour une vitesse d'archet  $v_a = 0,20$  m·s<sup>-1</sup> et  $\beta = 0,10$ . Commenter l'ordre de grandeur obtenu.

**61** – Comment le violoniste peut-il parvenir à produire un son plus puissant?

Le digramme de Schelleng (force appliquée en ordonnée et distance archet-chevalet en abscisse) indique pour une vitesse d'archet donnée, la zone à l'intérieur de laquelle le mouvement de Helmholtz est atteint (voir figure 16).

**Tournez la page S.V.P.**

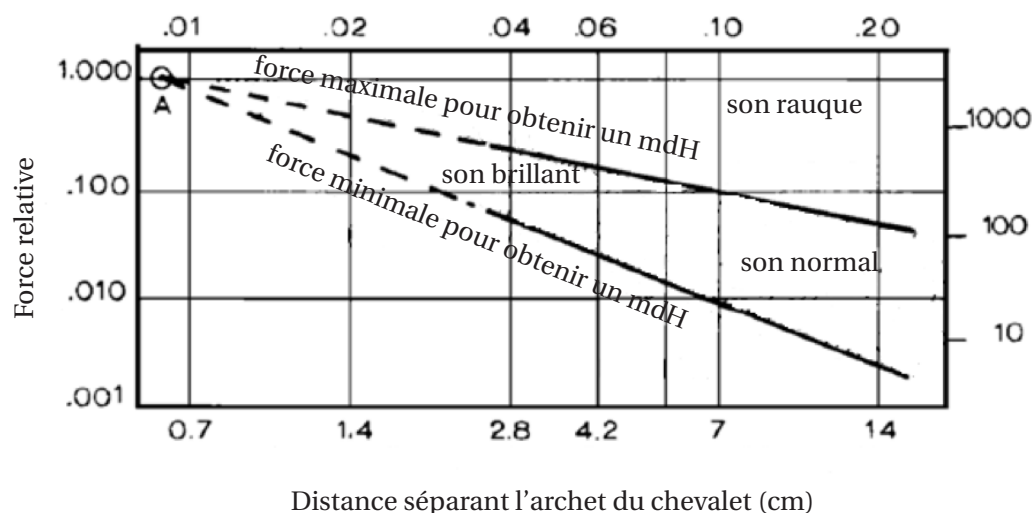


FIGURE 16 – Diagramme de Schelleng. Le force relative correspond au rapport de la force appliquée par le violoniste sur l'archet à la force la plus grande qu'on puisse appliquer à la vitesse d'archet donnée.

**62** – Expliquer pourquoi seuls les violonistes aguerris jouent du violon en frottant l'archet à proximité du chevalet.

La vibration de la table d'harmonie détermine la richesse du son produit. Des techniques modernes, bien que très coûteuses, peuvent aider le luthier dans son travail d'optimisation de la table d'harmonie pour rechercher le plus beau son possible. Parmi elles, se trouve la vibrométrie laser.

Le vibromètre laser est constitué d'une source lumineuse monochromatique (typiquement un laser hélium-néon), d'un interféromètre et d'un détecteur. Le faisceau émis par le laser est séparé dans l'interféromètre en un faisceau de référence (dirigé vers le détecteur) et un faisceau de mesure (dirigé vers un point de la table d'harmonie). Ce dernier est réfléchi par la table d'harmonie. Une partie de la lumière réfléchie revient alors dans l'interféromètre où elle interfère avec le faisceau de référence. Grâce à ce type de dispositif, on parvient à mesurer des vitesses qui s'échelonnent de  $0,01 \mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  à quelques dizaines de mètres par seconde.

On modélise le faisceau de référence par une onde lumineuse à laquelle on associe un signal sinusoïdal de fréquence  $f_0$ . Du fait du mouvement local de la table d'harmonie à une vitesse  $v$ , l'onde lumineuse réfléchie est associée à un signal sinusoïdal de fréquence  $f_r$  différente de  $f_0$  :  $f_r = f_0 + \delta f$ , avec  $\delta f = 2f_0 v/c$ .

L'analyse de l'état d'interférence de ces deux signaux conduit à une mesure de la vitesse locale  $v$  de vibration de la table d'harmonie. Le balayage de toute la surface du violon renseigne alors sur le mode de vibration de la table d'harmonie.

**63** – Dans le laser hélium-néon, la radiation amplifiée correspond à une transition électronique entre deux niveaux d'énergie de l'atome de néon. La longueur d'onde de cette radiation est  $\lambda_0 = 633 \text{ nm}$ . En déduire la valeur numérique de la différence d'énergie (en eV) entre les deux niveaux d'énergie concernés. Quelle est la couleur de la lumière émise par ce laser? Quelles propriétés du rayonnement laser sont mises à profit dans la technique de vibrométrie laser?

**64** – Nommer l'effet à l'origine du décalage de fréquence  $\delta f$ . Citer d'autres situations où cet effet intervient.

La figure 17 donne l'évolution temporelle du signal lumineux de référence  $s_0(t)$ , du signal lumineux réfléchi  $s_r(t)$  et du signal résultant de leur interférence  $s(t) = s_0(t) + s_r(t)$ . On constate que périodiquement, l'interférence des deux signaux est constructive et conduit à un signal résultant d'amplitude maximale.

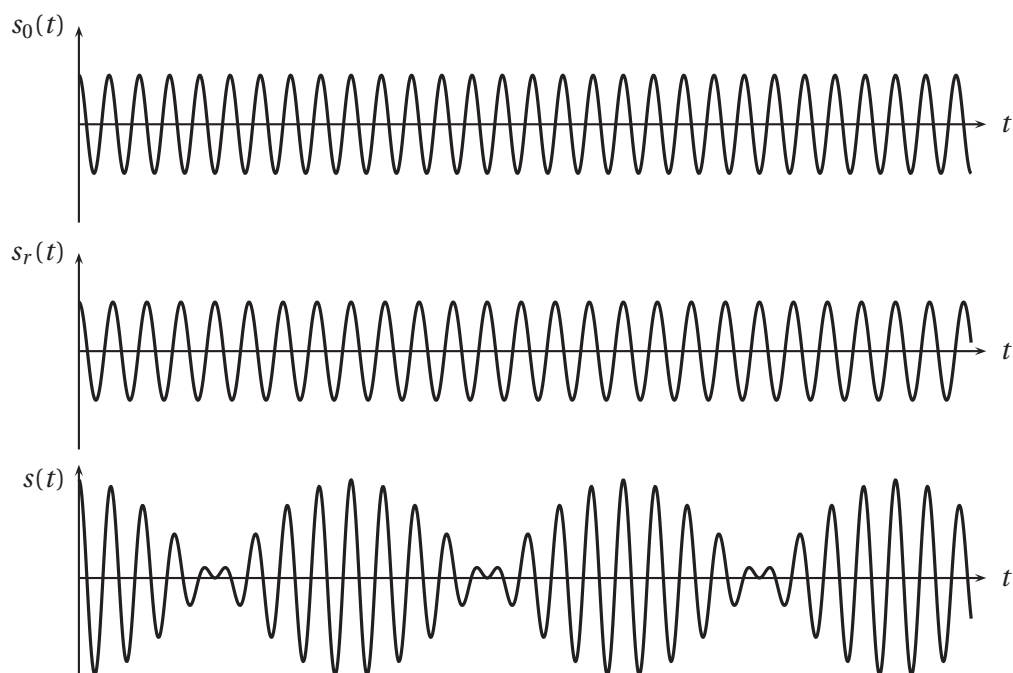


FIGURE 17 – Représentation des différents signaux.

**65** – Expérimentalement, on détermine que les interférences constructives se répètent avec une période égale à  $97,25 \mu\text{s}$ . En déduire la valeur de la vitesse de vibration locale  $v$  de la table d'harmonie.

On pourra, par souci de simplicité, considérer que les deux signaux ont la même amplitude  $s_m$  et utiliser les expressions suivantes :  $s_0(t) = s_m \cos(2\pi f_0 t)$  et  $s_r(t) = s_m \cos(2\pi f_r t)$ .

