

ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE DE LYON

Concours d'admission session 2026

Filière universitaire : Second concours

COMPOSITION DE PHYSIQUE

Durée : 3 heures

L'utilisation des calculatrices n'est pas autorisée pour cette épreuve.

★ ★ ★

1 Questionnaire

Les réponses seront données de façon très concise, sans justifications et sans redéfinir les grandeurs introduites. Exemple : Loi d'Ohm : $U = RI$.

1. Représenter le schéma d'un interféromètre de Michelson.
2. Dessiner l'allure de la figure d'interférence en coin d'air.
3. Donner l'équation de Navier-Stokes.
4. Donner l'impédance complexe d'un condensateur.
5. Donner la définition du vecteur de Poynting.
6. Enoncer les conditions de Gauss.
7. Donner l'équation de Schrödinger.
8. Expliquer le principe du pompage optique.
9. Définir l'enthalpie massique de vaporisation de l'eau.
10. Définir le moment cinétique d'un solide en rotation autour d'un axe fixe.

2 Propagation d'ondes transverses dans une corde pesante

Nous allons étudier la propagation d'une perturbation de faible amplitude a et d'extension spatiale caractéristique λ , dans une corde pesante (voir Figure 1) de longueur $L = 1\text{m}$ et de masse $m = 50\text{g}$. Nous négligerons toute rigidité et extensibilité de la corde ainsi que tout effet dissipatif.

A une altitude donnée, la partie supérieure de la corde ($[z, L]$) exerce sur la partie inférieure ($[0, z]$) une force de tension notée $\vec{T}(z)$. Cette force est partout tangente à la corde, et l'on notera $\vec{t}(z)$, le vecteur unitaire localement tangent à la corde. Dans le cas de la corde au repos, ce vecteur se confond avec le vecteur unitaire $\vec{e}_z$, mais il possède une composante selon la direction y dans le cas général. La force de tension s'exprime alors en fonction de la tension scalaire $T(z) > 0$:

$$\vec{T}(z) = T(z)\vec{t}(z)$$

Considérons tout d'abord le cas d'un unique brin de corde suspendue verticalement au repos depuis le point B. On notera z l'altitude d'un point M le long de la corde, mesurée depuis le bas.

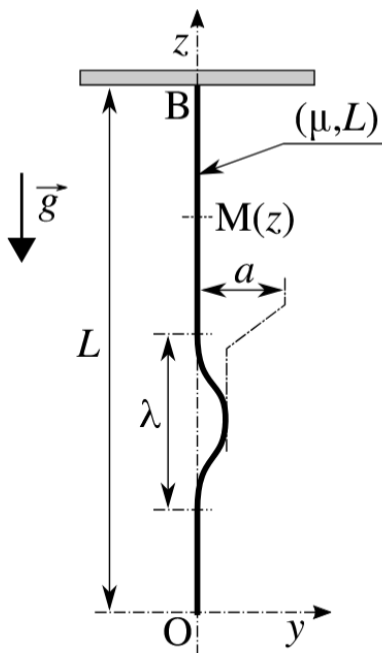


FIGURE 1 – Schéma d'une corde pesante et d'une perturbation qui s'y propage.

1. Définir la masse linéique, notée μ , de la corde.
2. Donner la valeur de la tension au sommet de la corde ($z = L$) ainsi qu'à son extrémité ($z = 0$).
3. Considérons un élément infinitésimal de longueur dz autour du point $M(z)$.
Lister les forces qui s'exercent sur cet élément et les représenter sur un schéma.
4. En faisant un bilan des forces au repos montrer que la dérivée de la tension en fonction de z est constante. En déduire que la tension s'écrit $T(z) = \alpha z$, où α est une constante dont on donnera l'expression.

N.B. : Dans la suite supposera que ce profil de tension reste inchangé en présence de perturbations de faible amplitude.

On note désormais $y(z, t)$ la déformation de la corde (qui n'est plus au repos mais parcourue par une perturbation).

5. A nouveau, lister les forces qui s'exercent sur un élément infinitésimal entre les altitudes z et $z + dz$, choisi au niveau de la perturbation et les représenter sur un schéma. On y représentera les vecteurs $\vec{t}(z)$ et $\vec{t}(z + dz)$.
6. On admettra que le mouvement de cet élément infinitésimal est uniquement transverse. Lui appliquer alors le principe fondamental de la dynamique, que l'on projettera selon l'axe (Oy) .
7. Donner le lien entre la composante transverse du vecteur tangent $\vec{t}(z)$ et le profil de la corde $y(z)$, dans l'approximation des petites déformations.
8. Montrer alors que l'équation suivante régit la propagation dans la corde :

$$\mu \frac{\partial^2 y(z, t)}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial z} \left(T(z) \frac{\partial y(z, t)}{\partial z} \right)$$

9. Développer la dérivée et remplacer, dans l'expression obtenue, la tension par son expression.
10. En raisonnant sur les ordres de grandeurs, à quelle condition peut-on considérer que l'équation d'onde se réduit à :

$$\mu \frac{\partial^2 y(z, t)}{\partial t^2} = T(z) \frac{\partial^2 y(z, t)}{\partial z^2}$$

NB : On se placera dans la suite dans le cadre de cette approximation.

11. Le mouvement est alors régi par une équation aux dérivées partielles à coefficients non-constant. On propose le changement de variable suivant : $Z = \sqrt{z/L}$.

Déterminer à quelle condition l'équation différentielle devient alors :

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = c_0^2 \frac{\partial^2 y}{\partial Z^2}$$

où c_0 est une constante dont on donnera l'expression.

NB : On se placera dans la suite dans le cadre de cette approximation.

12. Justifier alors que la propagation d'une perturbation s'effectue à une pseudo-célérité constante (dans l'espace des Z) c_0 .
13. Calculer la valeur numérique de c_0 .
14. Justifier que les solutions de cette équation s'écrivent sous la forme de deux ondes progressives.
15. Que se passe-t-il lorsqu'une onde arrive au point d'attache de la corde ?
16. On initie à une altitude donnée z_0 une perturbation initiale de la forme $y(z_0, t) = a \exp(-t^2/\tau^2)$. Donner alors les expressions $y(z, t)$ des deux ondes créées dans la corde.

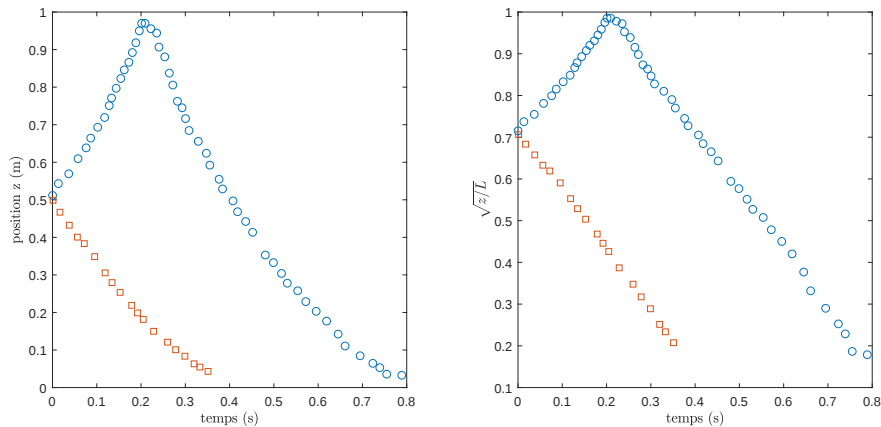


FIGURE 2 – A gauche : positions des maxima de déplacement de la corde, au cours du temps. A droite : les mêmes données exprimées avec la variable réduite $Z = \sqrt{z/L}$.

17. La figure 2 (gauche) montre des mesures expérimentales de la position $z(t)$ des maxima de déformation d'une corde soumise à une telle perturbation initiale. Commenter cette figure.
18. La figure 2 (droite) représente la coordonnée réduite $Z = \sqrt{z/L}$. Commenter cette figure.
19. En déduire une estimation de la pseudo-célérité c_0 définie à la question 11 et comparer à la valeur théorique.

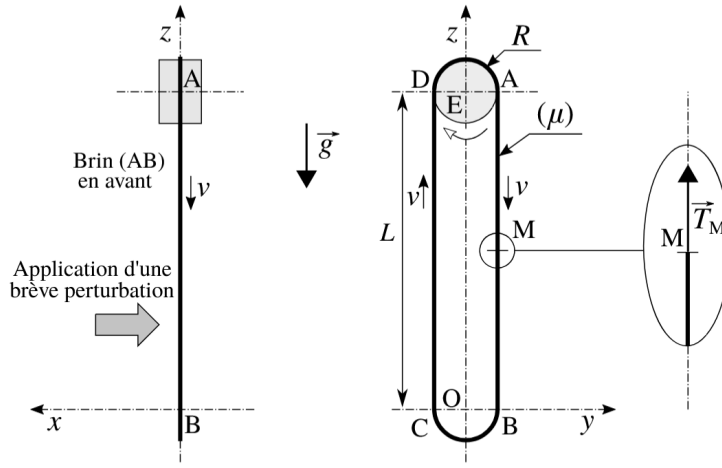


FIGURE 3 – Corde, bouclée sur elle-même, entraînée par une roue (de centre E) à la vitesse linéaire $v = 10\text{m/s}$ constante. La corde quitte la roue au point A et la retrouve au point D.

On étudie enfin le cas d'une boucle de corde entraînée par une roue en rotation uniforme, qui lui impose une vitesse linéaire $v = 10\text{m/s}$ (figure 3). Si le diamètre de la roue est faible devant la longueur de la corde, le profil de la corde s'apparente alors à deux brins verticaux AB (descendant) et CD (ascendant) reliés par un arc de cercle (passant par le point O le plus bas) de diamètre donc identique à celui de la roue. La longueur totale de la corde est telle que la longueur des brins verticaux est de 1m. La masse linéique de la corde est identique à celle définie au début de l'énoncé.

On admettra que dans toute la partie circulaire basse (entre B et C), la tension s'écrit : $T_O = \mu v^2$.

20. Donner alors le profil de tension le long des deux brins verticaux.
21. Tracer le profil de tension le long de l'ensemble de la corde, en faisant apparaître les points caractéristiques A, B, C et D.
22. Comme précédemment, au premier ordre, la célérité (locale) c des ondes est donnée par $c(z)^2 = T(z)/\mu$.

Tracer l'allure de la célérité le long de la corde. On fera figurer sur le graphique la vitesse v de la corde (imposée par la roue).

Cette expression de la célérité a été établie dans le référentiel lié à la corde. Pour obtenir la vitesse des ondes dans le référentiel du laboratoire, notée v_l , il faut alors appliquer la composition des vitesses en tenant compte de l'entraînement de la corde par le moteur à la vitesse v .

23. Tracer alors l'allure de la vitesse v_l en fonction de z sur le brin descendant (à une altitude z_0). On distinguera les deux cas d'ondes progressives mentionnées à la question 14.
24. On crée sur cette corde entraînée, une perturbation locale sur le brin descendant. Décrire (sans calcul) les trajectoires des ondes qui devraient y être engendrées.
25. La figure 4 montre une série d'images (prises à intervalles réguliers et juxtaposées de gauche à droite) d'une telle expérience (la flèche indique la position de la perturbation initiale). Les courbes pointillées soulignent les trajectoires de ondes ainsi créées.

Pourquoi observe-t-on deux ondes ?

26. Commenter la trajectoire des ondes observées.

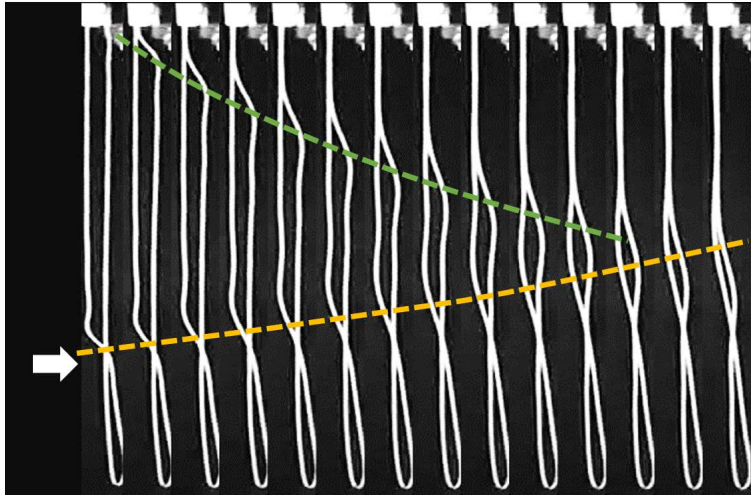


FIGURE 4 – Chronophotographie de la corde en défilement ayant subi une brève perturbation. La perturbation a été créée sur le brin descendant AB (flèche).