DS1 : Ondes

Durée 2h, calculatrices autorisées. Le DS est probablement trop long pour que vous puissiez tout faire, c'est normal, faites-en le maximum.

Problème 1 : Mirages acoustiques (CCP 2016)

Ce problème s'attache à expliquer le phénomène de mirages acoustiques. Les citations (en italique dans le texte) sont extraites du chapitre «Mirages acoustiques» de l'ouvrage Les Lois du monde de R. Lehoucq, J.-M. Courty et É. Kierlik, Éditions Belin, 2003.

"En choisissant leur profondeur de plongée, les baleines parviennent à se faire entendre à des milliers de kilomètres et les sous-mariniers à se dissimuler des sonars. Les cétacés, comme les sous-marins, exploitent pour cela l'équivalent acoustique des mirages lumineux. Pour expliquer comment, nous allons d'abord décrire la propagation du son, puis nous montrerons que les mirages acoustiques sont une des multiples manifestations d'un même phénomène : la déviation des ondes sonores vers les zones où leur vitesse de propagation est la plus faible."

Les parties 1 à 3 sont indépendantes et peuvent être traitées séparément.

1 La propagation du son

"Lorsque nous parlons, nos cordes vocales mettent en mouvement l'air qui les entoure. L'air étant élastique, chaque couche d'air se comporte comme un ressort. La couche d'air comprimé se détend, et ce faisant comprime la couche qui la suit dans le sens de propagation du son, etc."

1. Définir une onde ; expliquer en quoi la propagation d'une onde est un phénomène à la fois spatial et temporel. Quelle(s) grandeur(s) physique(s) peut-on associer à une onde acoustique ?
2. Le son est une onde mécanique. Que peut-on alors dire de son milieu de propagation ? Donner deux autres exemples d'ondes mécaniques (mais non acoustiques).
3. À quel intervalle de fréquences correspond le domaine des ondes sonores audibles par l'homme ? Qu'appelle-t-on *ultrasons* ? Expliquer un des usages *autres que dans les sonars* que l'homme peut faire des ultrasons.
4. Pendant un orage, on peut grossièrement évaluer la distance à laquelle est tombée la foudre. Si on divise par trois la durée (en secondes) entre l'éclair et le tonnerre, on obtient la distance cherchée (en kilomètres).
   À partir de cette observation, estimer approximativement la valeur numérique de la vitesse c_{air} du son dans l'air, par temps orageux. La réponse sera justifiée.

2 Principe du sonar

Un sonar (*SOund NAvigation and Ranging*) est un dispositif de détection utilisant les ondes acoustiques comme signal détectant. Il permet aux marins de naviguer correctement (mesure de la profondeur) ou aux sous-mariniers de repérer les obstacles et les autres navires. Certains animaux (chauve-souris, dauphins...) utilisent des systèmes similaires au sonar pour repérer leurs proies ou des obstacles.

On suppose dans cette partie que la mer est un milieu homogène dans lequel le son se propage rectilignement. À 20 °C, la vitesse du son dans l'eau de mer est $c_{\text{mer}} = 1{,}50\,\text{km}\,\text{s}^{-1}$.

L'avant d'un sous-marin est équipé d'un sonar lui permettant d'éviter d'entrer en collision avec un autre sous-marin. Le sonar est constitué d'un émetteur d'ondes sonores et d'un récepteur capable d'identifier l'écho de l'onde précédemment émise.

On note O l'avant du sous-marin équipé du sonar et (Ox) l'axe du sous-marin, correspondant à l'axe de propagation de l'onde sonore. Un second sous-marin est à la distance L du premier, dans la configuration représentée sur la figure 1.

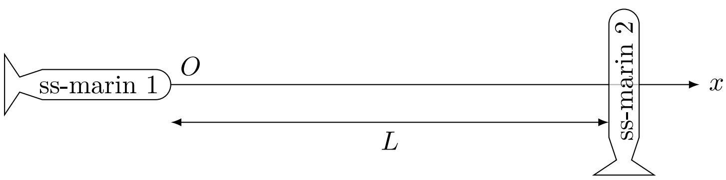


Figure 1 – Les sous-marins, vus de dessus

5. Expliquer le principe de fonctionnement d'un sonar.

6. L'émetteur produit une très brève impulsion sonore. Le récepteur en reçoit l'écho au bout d'une durée $\Delta t_e = 38{,}8\,\text{ms}$. En déduire la distance L à laquelle se situe le second sous-marin ; faire l'application numérique.
   À partir de l'instant $t = 0$, le sonar émet l'impulsion sonore sinusoïdale de la figure 2, pendant une durée $\Delta t_i = 800\,\mu\text{s}$.

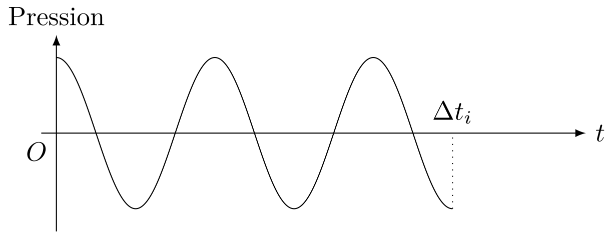


FIGURE 2 – Impulsion sinusoïdale correspondant au signal envoyé par le sonar

7. Déterminer, en justifiant, la valeur numérique de la fréquence f de l'onde émise par le sonar
   On s'intéresse à la propagation spatiale de l'impulsion sonore : on la représente alors dans le système d'axes de la figure 3.

FIGURE 3 – Propagation spatiale

8. Exprimer et calculer numériquement la longueur spatiale Δx de l'impulsion.
9. Reproduire sur la copie le système d'axes de la figure 3 et y représenter l'impulsion sonore à l'instant $t = 12{,}0\,\text{ms}$; calculer numériquement, en justifiant précisément, les positions du début (ou front) de l'impulsion et de sa fin.
   Un détecteur d'ondes sonores est placé sur le second sous-marin, sur l'axe (Ox).
10. Représenter sur la copie l'évolution de l'amplitude enregistrée par ce détecteur au cours du temps. Calculer numériquement, en justifiant précisément, les instants auxquels le détecteur reçoit le début et la fin de l'impulsion et on repérera ces instants sur l'axe horizontal qu'on graduera.

3 Son et température

Dans le cas où on assimile l'air à un gaz parfait, la vitesse du son dans l'air est donnée par la formule :

$$c = \sqrt{\frac{\gamma R T}{M}} \tag{1}$$

où $\gamma = 1.41$, $R = 8{,}31\,\text{J}\,\text{K}^{-1}\,\text{mol}^{-1}$, T est la température en kelvin et $M = 29{,}0\,\text{g}\,\text{mol}^{-1}$ la masse molaire de l'air (qu'il faut mettre en $\text{kg}\,\text{mol}^{-1}$ dans la formule).

"Le son est dévié dans un milieu où sa vitesse de propagation n'est pas uniforme : les trajectoires des ondes sonores s'incurvent vers les zones où la vitesse de propagation est la plus faible. (...) La vitesse du son croît d'environ 0,6 mètre par seconde et par degré Celsius : elle dépend de l'altitude puisque la température change avec cette dernière."

11. Calculer numériquement la vitesse c_0 du son à la température $T_0 = 298\,\text{K}$.
12. Calculer la variation Δc de la vitesse du son lorsque la température varie de $\Delta T = 1\,\text{K}$.
    La déviation des ondes sonores dans l'air dépend du gradient de température. *"Cet effet est amplifié en cas d'orage où l'air au voisinage du sol est très chaud, la température diminuant fortement avec l'altitude."* La déviation *"est alors si importante que l'on n'entend pas le tonnerre d'orages qui éclatent à seulement quelques kilomètres de distance : tout se passe comme si l'on se trouvait dans une zone d'«ombre sonore»."* Ainsi, il se peut qu'on aperçoive un éclair, produit à environ 4 km d'altitude, sans entendre le tonnerre si on est au-delà d'environ 29 km de distance.
13. Reproduire sur la copie la figure 4 et y représenter l'allure de la trajectoire du son du tonnerre, dans le cas où il est à la limite d'être perçu par l'homme. Par analogie avec un mirage optique, justifier le nom de «mirage acoustique» donné au phénomène décrit. Sur la figure 4 reproduite, repérer la zone d'«ombre sonore», correspondant aux lieux où le tonnerre n'est pas perceptible.

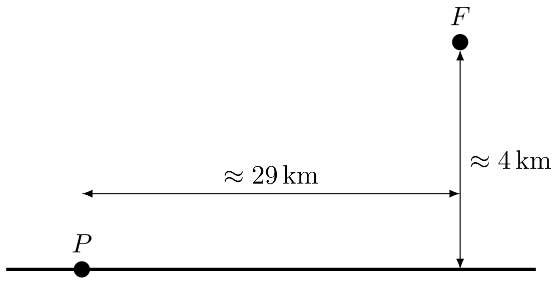
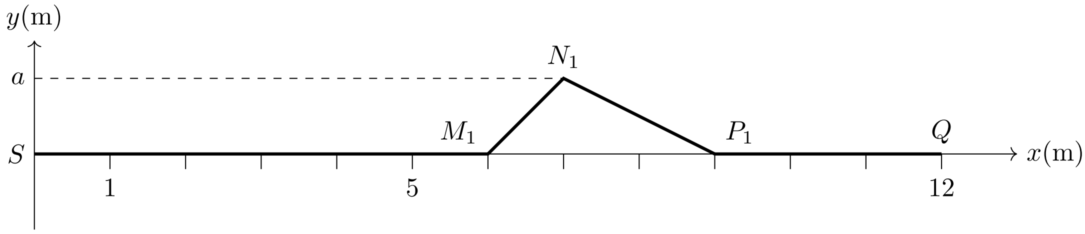


FIGURE 4 – Un orage silencieux. On représente la position d'une personne P et de la foudre F.

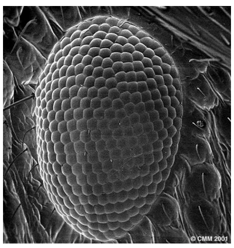
Exercice 1 : Onde progressive le long d'une corde (Adapté du TD1)

On étudie la propagation sans amortissement d'une perturbation le long d'une corde élastique. Au temps $t = 0$, le front de l'onde quitte l'extrémité S de la corde. On trace ci-dessous la forme de la corde au temps $t_1 = 3{,}0\,\mathrm{s}$.

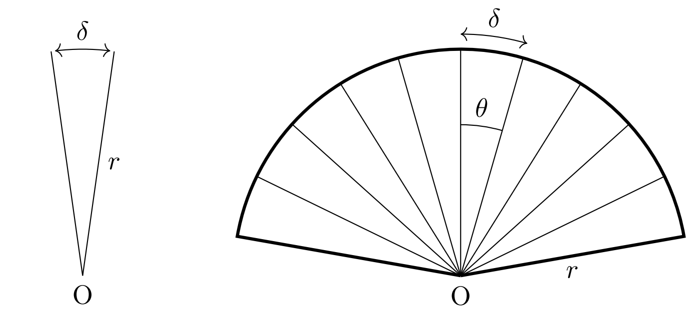


1. Calculer, en la justifiant, la célérité c de l'onde qui se déplace le long de la corde.
2. Pendant combien de temps un point de la corde est-il mis en mouvement par le passage de l'onde ?
3. Au temps t_1, quels sont les points de la corde qui s'élèvent ? Quels sont ceux qui descendent ?
4. Représentez sur le graphique l'allure de la corde à $t_2 = 1\,\mathrm{s}$.
5. Tracez l'évolution temporelle de la position de la corde au point Q ($x = 12\,\mathrm{m}$) et S ($x = 0\,\mathrm{m}$). On fera apparaître sur le graphique la valeur de t aux instants où le mouvement de la corde est modifié.

Exercice 2 : l'Œil composé



Dans ce problème on se propose d'étudier l'œil composé (ou œil à facettes) très répandu chez les insectes, par exemple chez la guêpe (voir photo ci-contre). Un œil à facettes est composé d'un grand nombre de cellules sensibles à la lumière appelées *ommatidies* de forme approximativement conique formant une portion de sphère de rayon r. Une omatidie est composée à son sommet d'une surface transparente qui laisse passer la lumière et la guide vers une fibre étroite où elle est détectée. Une omatidie correspond à un *pixel* de l'œil composé.



Une omatidie L'œil composé

La figue ci-dessus représente schématiquement une omatidie et un œil composé. On suppose que la lumière se propage en ligne droite lorsqu'elle entre dans l'omatidie et que la détection de la lumière se produit au fond de l'omatidie (point O). Nous allons chercher à déterminer la taille δ de l'omatidie qui procure à l'œil une résolution maximale.

1. Une abeille voit essentiellement dans le bleu ou l'ultraviolet. Donner une valeur typique de la longueur d'onde λ de la lumière vue par l'abeille.
2. Exprimer l'angle θ en radians en fonction de r et δ.

3. La résolution angulaire d'une omatidie correspond à l'angle maximum formé par deux rayons lumineux détectés par l'omatidie. Expliquer pourquoi on peut dire que la résolution angulaire de l'œil composé dans le cas simple où on ignore les effets de la diffraction est $\Delta\theta_g = \theta$.
4. Comment doit-on choisir θ pour que l'acuité visuelle de l'abeille soit maximale ?
5. On prend maintenant en compte les effets de la diffraction. La lumière captée par une omatidie provient alors d'un angle identique à celui qu'aurait la lumière diffractée par l'ouverture de l'omatidie. Expliquer pourquoi la diffraction limite l'acuité visuelle maximale de l'œil de l'abeille.
6. Exprimer l'élargissement angulaire $\Delta\theta_d$ dû à la diffraction de la lumière reçue par une omatidie en fonction de λ et δ.
7. On suppose que ces deux effets sur la résolution angulaire s'additionnent, montrer que la résolution angulaire totale est : $\Delta\theta = \dfrac{\delta}{r} + \dfrac{\lambda}{\delta}$. Tracer l'allure de la fonction $\Delta\theta(\delta)$.
8. Montrer que la valeur de δ pour laquelle la résolution angulaire est la meilleur ($\Delta\theta$ minimum) est donnée par $\delta = \sqrt{\lambda r}$. On pourra faire une étude de la fonction $\Delta\theta(\delta)$
9. Calculer un ordre de grandeur de δ pour $r = 3$ mm. Des mesures sur un œil d'abeille montre que δ vaut environ 30 µm. La sélection naturelle a-t-elle été efficace pour sélectionner la valeur optimale de δ ?