

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-marins 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.

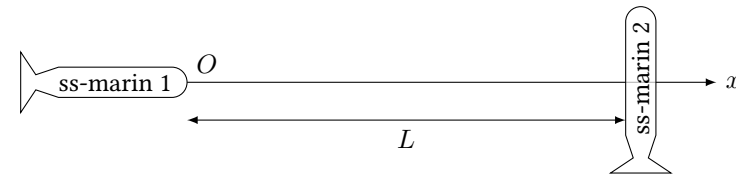


FIGURE 1 – Les sous-marins, vus de dessus

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-marins 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 $c_{\text{mer}} = 1,50 \text{ km s}^{-1}$.

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.

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 $\Delta t_i = 800 \mu\text{s}$.

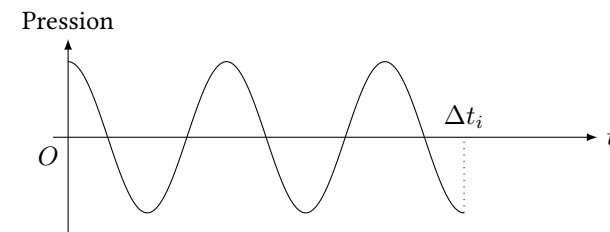


FIGURE 2 – Impulsion sinusoïdale correspondant au signal envoyé par le sonar

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

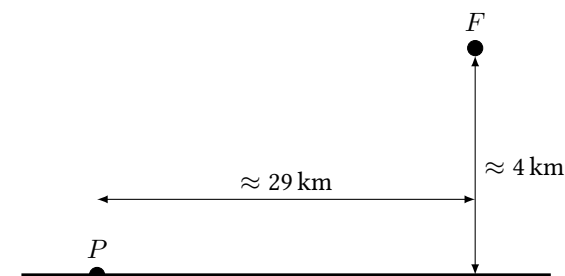
Dans le cas où on assimile l'air à un gaz parfait, la vitesse du son dans l'air est donnée par la formule :

$$c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad (1)$$

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

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

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.

Problème 2 : DIRECTIVITÉ D'UN HAUT-PARLEUR

Dans cet exercice on souhaite étudier la directivité d'un haut-parleur, c'est à dire l'angle sous lequel le haut-parleur émet l'onde sonore. On souhaite vérifier l'hypothèse selon laquelle la directivité du haut-parleur est due au phénomène de diffraction.

On s'intéresse à un haut parleur *Visaton B 80* dont le diamètre de la membrane est $d = 9 \text{ cm}$. Le fabricant donne les mesures de directivité pour des fréquences de 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz et 8000 Hz figure 5. Sur ce graphique on donne l'intensité sonore reçue en fonction de l'angle par rapport à l'axe du haut-parleur. Il faut noter que l'intensité est donnée en décibels, une diminution d'intensité de 3 dB correspond à une puissance sonore divisée par 2.

1. Donner une valeur approchée de la vitesse c du son dans l'air.
2. Déterminer pour chaque fréquence du graphique la longueur d'onde dans l'air correspondante.

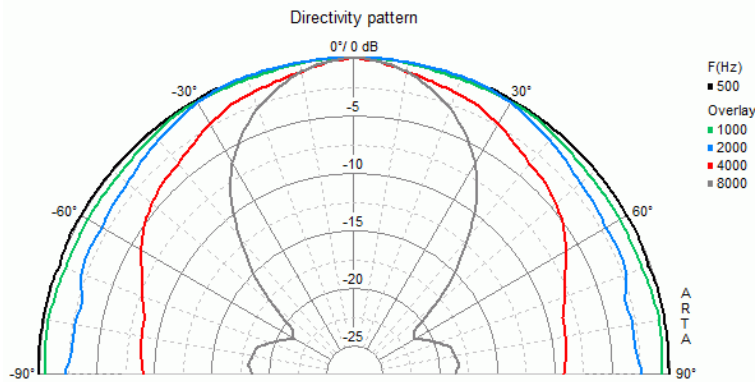


FIGURE 5 – Mesures de directivité du haut-parleur

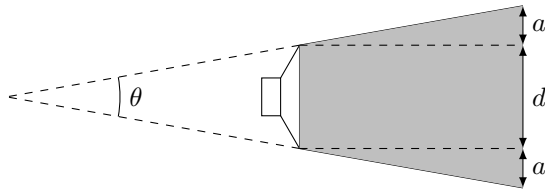


FIGURE 6 – Forme de l'onde sonore émise par un haut-parleur

3. On fait l'hypothèse que l'angle d'émission de l'onde par le haut-parleur est le même que celui qu'aurait une onde diffractée par une ouverture de la taille du haut-parleur. Cette hypothèse est-elle compatible avec les données de la figure 5 ?

On considère maintenant que l'onde émise par un haut parleur de diamètre d l'est sous un angle θ déterminé uniquement par la diffraction. On a représenté sur la figure 6 l'allure de l'onde émise par le haut-parleur.

On cherche à obtenir un haut-parleur aussi directif que possible, c'est à dire qu'à une distance $D \gg d$ donnée, la zone couverte par l'onde sonore doit être aussi réduite que possible.

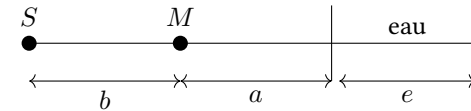
4. En raisonnant sur les valeurs extrêmes de d ($d = 0$ et $d \rightarrow \infty$) justifier qu'il doit exister une valeur de d donnant une directivité optimale.
5. exprimer la longueur a en fonction de θ et D . simplifier cette expression en faisant l'approximation que θ est très faible ($\theta \ll 1$). On peut montrer que pour $\theta \ll 1$, $\tan \theta \simeq \theta$.
6. En déduire que la zone L couverte par l'onde à une distance D peut s'exprimer comme :

$$L \simeq \frac{D\lambda}{d} + d \quad (2)$$

7. On cherche la valeur de d pour laquelle L est minimale. En étudiant la fonction $f(x) = \frac{D\lambda}{x} + x$ exprimer d_{opt} , la valeur optimale de d en fonction de D et λ
8. Quelle doit être la taille d'un haut-parleur que l'on veut le plus directif possible pour une fréquence de 1000 Hz à une distance $D = 10$ m ? Expliquer pourquoi lorsqu'on veut émettre une onde sonore directive on utilise plutôt des ultrasons.

Exercice 1 : BULLE DE SAVON

Considérons une bulle de savon éclairée par une source S d'onde lumineuse monochromatique de longueur d'onde dans le vide λ . La bulle est constituée d'un film d'eau d'épaisseur e . Une partie de la lumière incidente est réfléchi à l'interface air-eau puis une seconde partie est réfléchi à l'interface eau-air. Lors de sa réflexion sur l'interface air-eau, l'onde subit un déphasage supplémentaire de π .



1. Expliquer pourquoi on observe un phénomène d'interférences en M .
2. La célérité de la lumière dans l'eau vaut c/n_e où c est la célérité de la lumière dans le vide. Combien vaut la longueur d'onde λ_e dans l'eau en fonction de λ ? (La fréquence reste inchangée dans l'eau). Exprimer les nombres d'onde dans l'air (k_a) et dans l'eau (k_e) en fonction de λ et n_e .
3. Montrer que les phases $\varphi_1(t)$ et $\varphi_2(t)$ des ondes se réfléchissant sur la première et la seconde interface sont données par :

$$\varphi_1(t) = k_a(2a + b) - \omega t + \pi \quad (3)$$

$$\varphi_2(t) = k_a(2a + b) + 2e k_e - \omega t \quad (4)$$

$$(5)$$

En déduire le déphasage $\Delta\varphi$ entre les deux ondes qui interfèrent en M .

4. Pour quelles longueurs d'ondes (dans l'air) obtient-on des interférences constructives ? destructives ?
5. A.N. : Pour $e = 0,25 \mu\text{m}$ et $n_e = 1.4$, quelles sont les longueurs d'onde du spectre visibles pour lesquelles les interférences sont constructives ? destructives ? De quelle couleur apparaît la bulle ?
6. Expliquez qualitativement pourquoi une bulle plus épaisse ($e > 1 \mu\text{m}$) apparaît blanche.