PROBLÈME I : MIRAGES ACOUSTIQUES

« 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 **I.1.** à **I.3.** sont indépendantes et peuvent être traitées séparément.

I.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. »

I.1.a. 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 ?

I.1.b. 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).

I.1.c. 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.

I.1.d. 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.

I.2. Principe du sonar

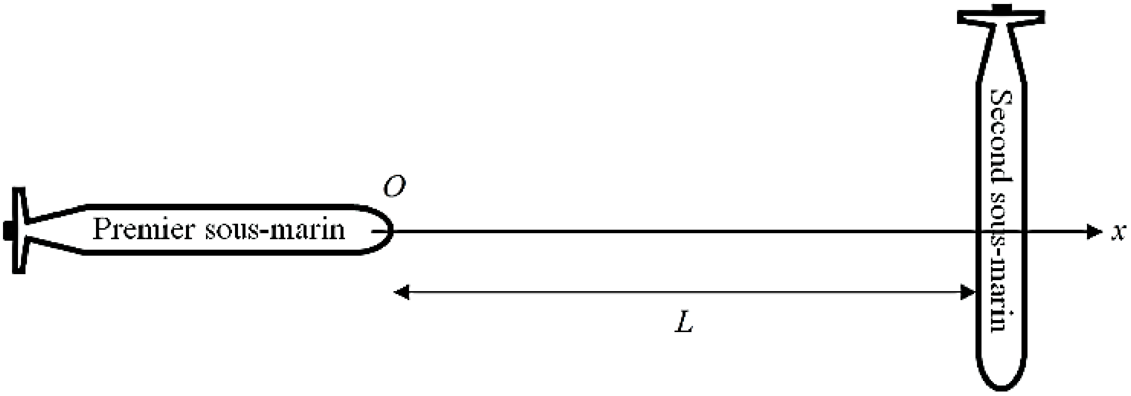

FIGURE 1 – Les sous-marins, vus du dessus

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

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 (page 2).

I.2.a. Expliquer le principe de fonctionnement d'un sonar.

I.2.b. L'émetteur produit une très brève impulsion sonore. Le récepteur en reçoit l'écho au bout d'une durée $\Delta t_e = 38{,}8$ 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 $\Delta t_i = 800\ \mu$s.

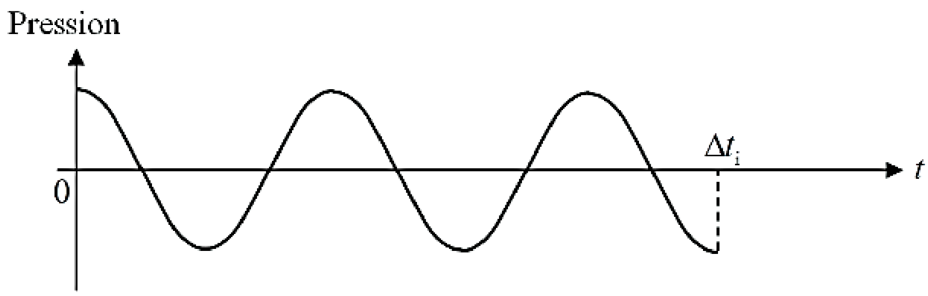

Figure 2 – Impulsion sinusoïdale correspondant au signal envoyé par le sonar

I.2.c. 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

I.2.d. Exprimer et calculer numériquement la longueur spatiale Δx de l'impulsion.

I.2.e. Reproduire sur la copie le système d'axes de la figure 3 et y représenter l'impulsion sonore à l'instant $t = 12{,}0$ 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).

I.2.f. 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.

I.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

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

où $\gamma = 1{,}41$ est le rapport des capacités thermiques à pression et volume constants, $R = 8{,}31\ \mathrm{J.K^{-1}.mol^{-1}}$ est la constante des gaz parfaits, T est la température et $M = 29{,}0\ \mathrm{g.mol^{-1}}$ est la masse molaire de l'air.

« 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. »

I.3.a. Calculer numériquement la vitesse c_0 du son à la température $T_0 = 298$ K.

I.3.b. Montrer que, pour une variation $\Delta T = 1{,}00$ K de la température de l'air par rapport à T_0, la variation Δc de la vitesse du son peut s'écrire, de façon approchée :

$$\Delta c \simeq c_0 \frac{\Delta T}{2T_0}\,. \tag{2}$$

Faire l'application numérique et commenter.

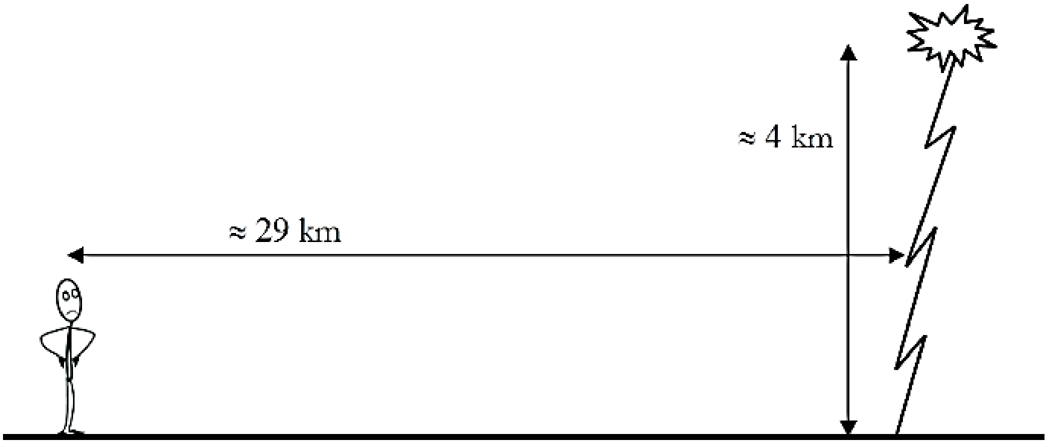

Figure 4 – Un orage silencieux

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.

I.3.c. Reproduire sur la copie la figure 4 (page 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.

FIN DU PROBLÈME I

Dans ce problème, une espèce chimique X est notée $X_{(s)}$ si elle est solide, $X_{(l)}$ si elle est liquide, $X_{(g)}$ si elle est gazeuse et $X_{(aq)}$ si elle est en solution aqueuse.

II.1. Concentration d'une eau oxygénée

L'eau oxygénée, aussi appelée peroxyde d'hydrogène, a pour formule H_2O_2. C'est une espèce chimique soluble dans l'eau sous forme moléculaire : en solution aqueuse, on la note $H_2O_{2(aq)}$.
On donne les numéros atomiques Z, nombres de masse A et masses molaires M suivants :

- pour l'hydrogène H : $Z_H = 1$, $A_H = 1$, $M_H = 1{,}01$ g.mol^{-1} ;
- pour l'oxygène O : $Z_O = 8$, $A_O = 16$, $M_O = 16{,}0$ g.mol^{-1}.

On donne également :

- masse du proton : $m_p = 1{,}673.10^{-27}$ kg ;
- masse du neutron : $m_n = 1{,}675.10^{-27}$ kg ;
- masse de l'électron : $m_e = 9{,}109.10^{-31}$ kg ;
- nombre d'Avogadro : $\mathcal{N}_A = 6{,}022.10^{23}$ mol^{-1} ;
- volume molaire d'un gaz à 20 °C et sous 1 bar : $V_m = 24{,}4$ L.mol^{-1} ;
- masse volumique de l'eau liquide, supposée incompressible et indilatable : $\mu_{eau} = 1{,}00.10^3$ kg.m^{-3}.

II.1.a. Donner, en justifiant, la composition précise (nombre et type de nucléons, nombre d'électrons) des atomes d'hydrogène et d'oxygène.

II.1.b. Écrire les configurations électroniques de ces deux atomes dans leurs états fondamentaux. Identifier leurs électrons de valence. En déduire les schémas de Lewis de l'hydrogène et de l'oxygène.

II.1.c. Déterminer les schémas de Lewis du dioxygène O_2, de l'eau H_2O et de l'eau oxygénée H_2O_2. Justifier, en prenant un exemple pour chaque atome, que les règles de l'octet et du duet sont vérifiées.

II.1.d. Déterminer les nombres d'oxydation de l'oxygène et de l'hydrogène dans le dioxygène O_2, dans l'eau H_2O et dans l'eau oxygénée H_2O_2. En déduire l'existence des couples oxydant-réducteur H_2O_2/H_2O et O_2/H_2O_2.

II.1.e. Écrire les deux demi-réactions d'oxydo-réduction des couples où intervient l'eau oxygénée. Montrer que l'eau oxygénée peut réagir selon la réaction suivante

$$2H_2O_{2(aq)} = 2H_2O_{(l)} + O_{2(g)} \,. \tag{3}$$

Une solution pharmaceutique d'eau oxygénée contient 3 % en masse d'eau oxygénée ; sa densité est $d = 1{,}04$.

II.1.h. Exprimer et calculer numériquement la concentration C, en mol.L^{-1}, de cette solution pharmaceutique.

II.2. Décomposition de l'eau oxygénée

On s'intéresse à la décomposition de l'eau oxygénée

$$2H_2O_{2(aq)} \rightarrow 2H_2O_{(l)} + O_{2(g)} \,. \tag{4}$$

Cette réaction est lente et sa loi de vitesse est d'ordre 1 par rapport à l'eau oxygénée H_2O_2. Une étude expérimentale permet de déterminer sa constante cinétique à 25 °C : $k = 2{,}01.10^{-3}$ SI.

On note $C(t)$ la concentration $\left[H_2O_{2(aq)}\right]$ en eau oxygénée à l'instant t.

À l'instant $t = 0$, la concentration en eau oxygénée est $C_0 = C(t = 0) = 1{,}00.10^3$ mol.m^{-3}.

II.2.a. Exprimer la vitesse de disparition de l'eau oxygénée en fonction de k et de $C(t)$. En déduire, par une analyse dimensionnelle, l'unité SI de k.

II.2.b. Déterminer l'équation différentielle à laquelle obéit la concentration $C(t)$.

II.2.c. En déduire la loi horaire $C(t)$ donnant l'évolution de la concentration en fonction du temps.

II.2.d. Définir le temps de demi-réaction $t_{1/2}$ de cette réaction. L'exprimer littéralement et faire l'application numérique.

II.2.e. Dans certaines notices, on lit qu'une eau oxygénée, en flacon jamais ouvert, est stable pendant douze mois. Commenter cette information.