VILLE DE PARIS

Direction des ressources humaines

Sous-direction des compétences
Bureau de la formation

TEST POUR LE FINANCEMENT DE LA PREPARATION AU CONCOURS INTERNE D'ELEVE INGENIEUR À l'EIVP

RENTRÉE SEPTEMBRE 2026

Mardi 12 Mai 2026

Épreuve de Physique

Durée de l'épreuve **: 3h00**

Épreuve notée sur 20

Coefficient 3

Du papier brouillon est à votre disposition. Son usage vous est personnel. Aucun brouillon ne pourra être remis en fin d'épreuve en lieu et place d'une copie.

Test d'admission : Physique (3h)

Mai 2026

- Ce devoir est composé d'exercices **indépendants**. Ils peuvent être traités dans un ordre quelconque.
- **Changer de page** au début de chaque exercice.
- Penser à **numéroter** les copies.
- L'argumentation des réponses devra être **précise**, **concise** et **rigoureuse**.
- Toute application numérique non suivie d'une **unité correcte** sera comptée fausse.
- Les résultats littéraux demandés par l'énoncé seront **encadrés** et les applications numériques **soulignées**.

"I prefer **unanswered** questions to **unquestionable** answers"

- Richard Feynman -

- Calculatrice autorisée -

On étudie dans ce sujet divers aspects liés à la plongée sous-marine faisant appel à des modélisations physiques dans les domaines suivants : Mécanique, Thermodynamique, Electricité & Acoustique

VALEURS UTILES :

- **Mécanique :**
  - ▷ Accélération de la pesanteur terrestre : $g = 9,81$ m.s^{-2}
  - ▷ Masse volumique du lest : $\rho_c = 1,5.10^3$ kg.m^{-3}
  - ▷ Masse volumique de l'eau : $\rho_e = 1,0.10^3$ kg.m^{-3}
  - ▷ Masse volumique de l'air : $\rho_g = 1$ kg.m^{-3}
  - ▷ Masse molaire de l'air : $M_{\text{air}} = 29$ g.mol^{-1}
  - ▷ Température de la mer supposée constante : $T_0 = 283$ K
  - ▷ Pression atmosphérique : $P_{\text{atm}} = 10^5$ Pa
  - ▷ Constante des gaz parfait : $R = 8,314$ J.K^{-1}. mol^{-1}
- **Thermodynamique :**
  - ▷ Masse du plongeur : $m_p = 80$ kg
  - ▷ Température du plongeur avant la plongée : $T_i = 37$°C
  - ▷ Capacité thermique massique moyenne du corps humain : $c_h = 3,5$ kJ.K^{-1}. kg^{-1}
  - ▷ Surface totale du corps humain en échange thermique avec l'eau : S (valeur à estimer dans le sujet)
  - ▷ Coefficient de transfert thermique entre le plongeur et l'eau : $h \approx 10$ W.m^{-2}.K^{-1}
  - ▷ Puissance thermique produite par le métabolisme du plongeur pour maintenir sa température : $P_m = 200$ W
- **Electricité :**
  - ▷ Fréquence propre du détecteur de métaux : 10 kHz
  - ▷ Inductance propre de la bobine de détection : $L_0 = 300$ mH
- **Acoustique :**
  - ▷ Célérité des ondes sonores dans l'air : $c_A = 340$ m.s^{-1}
  - ▷ Célérité des ondes sonores dans l'eau : $c_E = 1500$ m.s^{-1}
  - ▷ Seuil d'audibilité dans l'eau : $I_0 = 7,00.10^{-17}$ W.m^{-2}

I Mécanique : étude d'une chute sous marine

Un plongeur, équipé d'un masque et de bouteilles d'oxygène, nage en mer. Intrigué par un détail du fond marin, il descend d'une distance $d = 10$ m par rapport à la surface libre de l'eau. Puis il progresse horizontalement selon la direction de l'axe (Ox) à une vitesse initiale $\overrightarrow{v}_0 = v_0\,\overrightarrow{u_x}$ avec $v_0 > 0$, à une hauteur $H = 1$ m du fond marin. On prend un repère $\mathcal{R}(O, \overrightarrow{u_x}, \overrightarrow{u_y})$ avec l'axe verticale (Oy) **ascendant** et l'origine du repère O situé au fond marin.

Dans toute cette partie mécanique (I.1 et I.2), on ne prendra pas en compte les forces de frottements fluides (traînée) en considérant qu'elles sont négligeables devant la pression hydrostatique de l'eau (poussée d'Archimède).

I.1 Chute d'un lest

Au cours de l'exploration, pour faciliter sa descente lors des premiers mètres, les plongeurs utilisent souvent un lest en plomb accroché à une ceinture et facilement largable. Le lest, initialement lié à la combinaison, se détache et tombe dans l'eau.

Le lest, de masse m, volume V, masse volumique ρ_c, enitèrement immergé dans l'eau de masse volumique ρ_e et subit la poussée d'ARCHIMEDE noté $\overrightarrow{\Pi} = -\rho_e V \overrightarrow{g}$ avec $\overrightarrow{g} = -g\,\overrightarrow{u_y}$ l'accélération de la pesanteur. On néglige les frottements.

1. Faire un schéma, ainsi que le bilan des forces s'appliquant sur le système "lest" une fois quitté la main du plongeur.
2. Montrer que l'acceleration s'écrit $\overrightarrow{a} = \begin{cases} a_x = & 0 \\ a_y = & -g_{\text{eff}} \end{cases}$
   avec g_{eff} une constante qu'on explicitera en fonction de g, ρ_c et ρ_e. *(Rq : on appelle g_{eff} le champ de pesanteur effectif)*
   Faire l'application numérique de a_y.
3. Etablir les équations horaires du mouvement $\begin{cases} x(t) = & v_0 t \\ y(t) = & -\dfrac{1}{2} g_{\text{eff}} t^2 + h \end{cases}$.
4. En déduire l'équation de la trajectoire $y(x)$ et conclure sur la nature de la trajectoire.
5. Sachant que sur la lune l'accéleration de la pesanteur Lunaire g_L est 6 fois plus petite que celle sur Terre. Que dire de l'affirmation suivante :

   "Sauter sur la lune est equivalent à sauter au fond de l'eau"

I.2 Formation d'une bulle d'air

Le plongeur ouvrant un peu trop la bouche sur l'embout de respiration, laisse échapper une bulle d'air. On admet que l'air, de masse volumique ρ_g, se comporte comme un gaz parfait. On rappelle la définition de la masse molaire $M = \dfrac{m}{n}$: où m désigne la masse de l'entité chimique considérée et n la quantité de matière correspondante (en mol).

On admet que la bulle d'air est de forme sphérique et que ses conditions **initiales** (position, vitesse) sont les mêmes que celles du lest.

6. À partir de l'équation d'état des gaz parfait, déterminer la masse volumique de l'air ρ_g en fonction de la masse molaire de l'air M_{air}, de la température T_0, de la pression P_{atm} bar et la constante des gaz parfait $R = 8,314$ J.K^{-1}. mol^{-1}. Faire l'application numérique, retrouve-t-on bien la valeur donnée en début d'exercice ?
7. Sans calcul et par analogie avec l'étude du lest donner l'expression de l'acceleration de la bulle $\overrightarrow{a}_b$ en fonction de g, ρ_e et ρ_g.
8. Faire l'application numérique de a_y pour la bulle. Quel est son signe ? Etait ce prévisible ? **Justifier**.
9. Tracer sur un même schéma la trajectoire du lest et de la bulle.
10. Le plongeur étant à une profondeur d sous la surface de l'eau et à une hauteur H par rapport au fond marin, lequel du lest ou de la bulle finit son parcours le premier ?

II Thermodynamique : durée de plongée sous marine & hypothermie

On s'intéresse dans cette partie à la compression du dioxygène dans les bouteilles, qui permet d'avoir une grande autonomie pour le plongeur, puis à l'intérêt pour le plongeur de disposer d'une combinaison pour modifier les échanges thermiques et limiter l'hypothermie.

II.1 Duree de la plongée

Ici on prend un repère $\mathcal{R}'(O', \overrightarrow{u_z},)$ avec l'origine O' situé sur la surface de la mer et l'axe verticale $(O'z)$ **descendant**.

La pression de l'eau varie en fonction de la profondeur z :

- A la surface de l'eau, (étant en contact avec l'air) la pression de l'eau est à la pression atmosphérique P_{atm}.
- A une profondeur z quelconque, on donne la loi de l'hydrostatique : $\dfrac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}z} = +\rho_e g$ avec l'axe $(O'z)$ **descendant**.

1. En intégrant la loi de l'hydrostatique et en tenant compte de la constante d'intégration qu'on pourra prendre judicieusement pour $z = 0$ m, calculer la pression de l'eau P_f au niveau du fond marin pour $z_f = 30$ m Vérifier qu'elle vaut environ 4 bar. On rappelle que 1 bar $\approx 10^5$ Pa.
2. Pour conlure, dans la partie précédente a-t-on surestimé ou sous-estimé l'accélération de la bulle ?
   Astuce : qu'aurait il fallu changer dans le calcul de la masse volumique de l'air ρ_g dans la partie précédente

La pression intiale de l'air comprimé $P_b = 230$ bar dans une bouteille de volume $V_b = 30$ L et à température $T_0 = 283$ K.

3. Montrer que la quantité initiale d'air comprimé contenue dans la bouteille de plongée vaut $n = 293$ mol.

Un détendeur permet de diminuer la pression de l'air en sortie de la bouteille. Il faut fournir au plongeur de l'air à une pression égale à celle qui s'exerce sur sa poitrine pour qu'il y ait équipression. Ainsi la pression de l'air respiré par le plongeur est égale à la pression d'eau à la profondeur à laquelle il évolue, profondeur qui sera prise à $z_f = 30$ m. La température de l'air est supposée constante. On considère qu'un nageur a une consommation de 15 L d'air par minute.

4. Expliquer pourquoi l'autonomie du plongeur diminue avec la profondeur.

On considère que pour des questions de sécurité, il convient de garder une pression de 50 bar de réserve dans la bouteille. Enfin, on admet que la durée de descente et remontée correspond à la moitié du temps de sortie du nageur.

5. Estimer la durée Δt de l'exploration sous-marine possible pour le nageur.
6. Quelle est la pression résiduelle P_{res} à l'intérieur de la bouteille à l'issue de 45 min de plongée ?

II.2 Risques d'hypothermie

On s'intéresse à l'évolution au cours du temps de la température $T(t)$ du plongeur et des risques de refroidissement trop important au contact de l'eau de mer considérée comme un thermostat de température T_0.

On considère qu'un être humain est hypothermie légère lorsque la valeur de la température intérieure de son corps est inférieure à 35°C.

Le plongeur peut réaliser 2 transferts thermiques :

- Le transferts thermiques au contact du thermostat "eau de mer" dont on peut modéliser la puissance thermique Φ_r reçue par le plongeur par la loi dite de NEWTON : $\Phi_r = -hS(T(t) - T_0)$
- Le transfert thermique reçu par son métabolisme de puissance thermique P_m

7. Pendant une durée $\mathrm{d}t$, la température du plongeur varie de $\mathrm{d}T$. Exprimer la variation d'énergie interne ΔU du plongeur en fonction de m_p, c_h et $\mathrm{d}T$.

8. Rappeler le premier principe de la thermodynamique et exprimer Q en fonction de Φ_r, P_m et $\mathrm{d}t$. En déduire que la température $T(t)$ du plongeur vérifie l'équation différentielle suivante :

$$\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t} + \frac{1}{\tau}T = \frac{1}{\tau}T_\infty$$

$$\text{avec} \quad \tau = \frac{m_p c_h}{hS} \quad \text{et} \quad T_\infty = \frac{P_m}{hS} + T_0$$

9. Comment s'appelle τ ? Donner une estimation réaliste de la valeur numérique de la surface S de contact entre le plongeur et l'eau et faire l'application numérique de τ.

10. Quel est le sens physique du terme T_∞

11. Tracer l'allure de la courbe d'évolution de $T(t)$ (**sans resoudre l'equation différentielle**). Au bout de combien de temps le regime permanent est atteint ? Cette valeur semble-t-elle plausible ? Commenter.

12. En comparant le plongeur avec combinaison et sans combinaison, quelle grandeur physique sera modifiée ? Comment varierait sa valeur numérique ? Justifier.

13. Quelle influence aurait il alors sur τ et T_∞ ? Quelle est alors l'intérêt de la combinaison ? Justifer

14. On propose de faire une analogie avec la décharge d'un condensateur dans un circuit RC. La différence de la température $T(t) - T_0$ est analogue à la différence de potentiel $V(t) - V_0$ (tension électrique aux bornes du condensateur), et la capacité thermique du nageur et de sa combinaison C_{th} est analogue à la capacité électrique du condensateur C.

    Dans cette analogie, quelle est l'analogue thermique-électrique de la résistance R ? de l'intensité i ? de l'équation de la Loi de Newton ?

III Electricité : detecteur de métaux sous l'eau

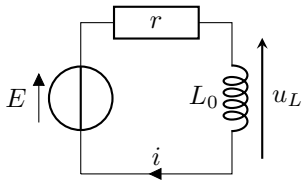
Arrivée au fond marin le plongeur se met à la recherche du lest metallique qui est tombé à l'aide d'un detecteur de métaux. Les détecteurs de métaux sont des instruments électroniques capables d'indiquer la présence de masses métalliques de natures et de tailles variées. À l'extrémité du détecteur se trouve une bobine de détection parcourue par un courant électrique variable.



Cette bobine génère un champ magnétique auquel sont soumis les objets situés dans la zone de détection. Les objets conducteurs, en particulier les métaux, vont être le siège de courants induits (dite de Foucault). Ces courants génèrent à leur tour un champ magnétique qui sera perçu par le détecteur sous la forme d'induction mutuelle.

Les détecteurs mobiles émettent généralement un son dont la fréquence dépend de la proximité avec une pièce métallique. Pour ce faire, on associe deux oscillateurs électriques de fréquences voisines, assimilables à des circuits LC et dont le fonctionnement n'est pas étudié ici. Un circuit de référence oscillant à fréquence propre **fixe** $f_0 = \dfrac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C}}$ est associé à un circuit de détection, contenant la bobine de détection, de fréquence variable f_d. En l'absence de détection, les fréquences des oscillateurs sont identiques $f_0 = f_d$. Lors d'une détection, la fréquence du détecteur f_d varie légèrement et l'écart des fréquences permet de générer le signal sonore.

III.1 En absence de métaux



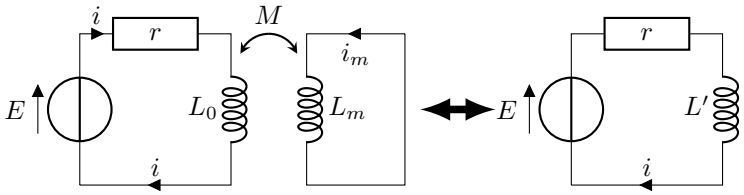
On assimile la bobine de détection à une bobine réelle que l'on modélise par une indutance propre L_0 et sa résistance interne r alimenté par un générateur de f.e.m. E stationnaire. À l'instant $t = 0$, on allume le générateur, le courant étant alors nul $i(t < 0) = 0$

1. Rappeler la relation entre l'intensité i traversant une bobine d'inductance L_0 et la tension u_L à ses bornes. À quel dipôle est-il équivalent en régime stationnaire ?
2. En appliquant la loi des mailles, établir l'équation différentielle vérifiée par la tension $i(t)$. On la mettra sous la forme $\dfrac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} + \dfrac{1}{\tau} i = \dfrac{1}{\tau} i_\infty$. Preciser l'expression du temps caractéristique τ en fonction de r et L_0, puis i_∞ en fonction de E et r.
3. Quelle grandeur électrique est continue au moment de l'allumage du générateur ? En utilisant cette condition initiale, résoudre l'équation précédente afin de montrer que $i(t) = \dfrac{E}{r}(1 - e^{-t/\tau})$.
4. Quelle est la valeur maximale possible $i_{\max}$ de l'intensité ? Exprimer, en fonction de τ, la durée Δt nécessaire pour considérer que le régime permanent est atteint à 5% près. (un calcul mathématique de justification est attendu.
5. Tracer l'allure de $i(t)$ en faisant apparaitre l'asymptote, le temps caractéristique et la tangente initiale.
6. Sachant que le générateur qui alimente le circuit délivre une tension $e(t)$ variable et périodique de forme rectagulaire. (sur une demi période $e(t) = E$ puis la demi période suivante $e(t) = 0$), tracer sur la même courbe l'évolution de $i(t)$ sur une période.

III.2 En présence de métaux

On admet que le métal détecté se comporte comme un inductance propre L_m. Le couplage entre le métal et la bobine de détection est modélisé par une inductance mutuelle M.

Au final, l'inductance propre du circuit de détection, au lieu de valoir L_0, s'en trouve modifiée et prend une nouvelle valeur L' que l'on souhaite déterminer.



7. De part le couplage on a obligatoirement $L' < L_0$. Comment sera affecté l'évolution de $i(t)$? Tracer cette nouvelle evolution sur le même graphique que $i(t)$ précédemment.
8. La fréquence variable f_d est alors modifié. Calculer en fonction de L_0 et L' le rapport $\dfrac{f_d}{f_0}$.
9. Le seuil de sensibilité du dispositif (variation relative minimale détectable) est de l'ordre de 2%. Cette variation minimale de fréquence se fait-elle dans le sens des plus aigus ou des plus graves ? En déduire la valeur numérique correspondante de f_d.
10. Le plongeur rase le fond marin avec la bobine de detection. Il detecte le lest enfoui sous le sable lorsque le detecteur sonne à une fréquence $f_d = 10,8$ kHz. On note ℓ la distance entre la bobine de detection et le lest.

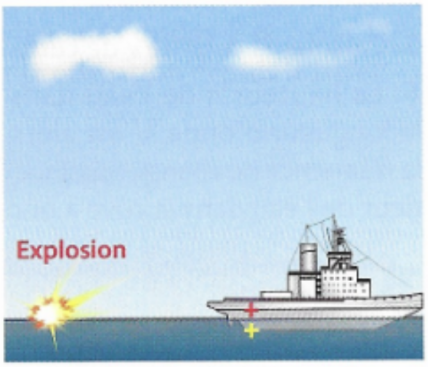
    A l'aide du tableau ci-dessous, proposer une estimation de la profondeur à creuser pour récupérer le lest.

L' (mH)	273	269	265	259	250	237	214	167
ℓ (cm)	40	35	30	25	20	15	10	5

11. Une loi empirique (en USI) simplifiée donne la relation de L' en fonction de la distance ℓ entre la bobine de detection et un objet metallique : $L' = \dfrac{L_0}{1 + \dfrac{0,04}{\ell}}$. Retrouve-t-on la même valeur de ℓ qu'à la question précédente ?

IV Acoustique : echolocalisation & sonar sous marine

IV.1 Localisation d'une explosion



Une équipe de scientifiques à bord d'un navire enregistre en pleine mer une détonation à l'instant t_0 située à une distance D du navire. Le son est detecté à la fois pas deux capteurs, l'un situé dans l'air (**capteur rouge**) à un instant t_A, l'autre situé dans l'eau (**capteur jaune**) à un instant t_E.

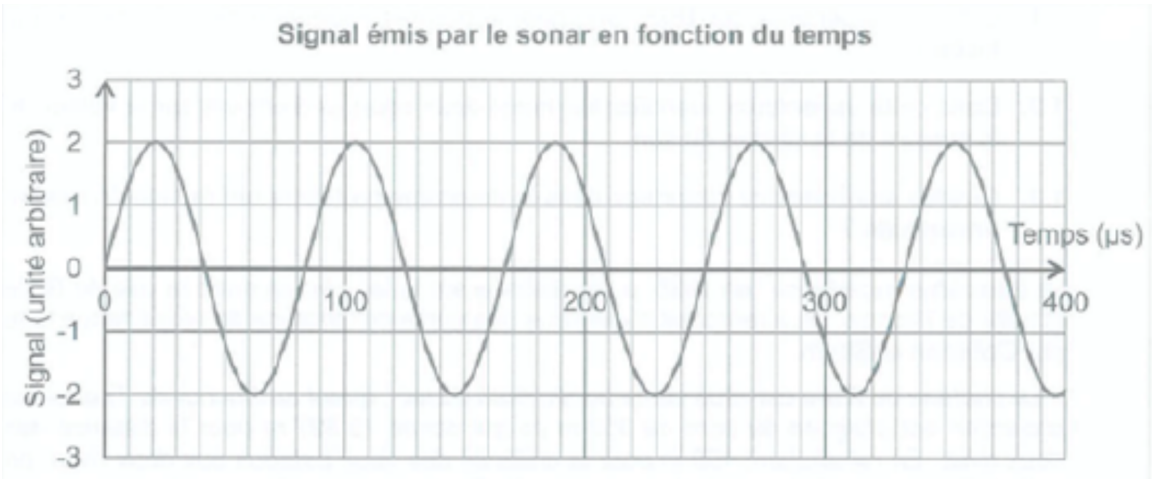
La méthode repose sur le principe d'echolocalisation à 2 ondes dont les célérités sont différentes. On note c_A et c_E respectivement les célérités de l'onde sonore dans l'air et dans l'eau.

1. Quelle grandeur physique du milieu varie au passage d'une onde acoustique. caractériser le plus précisément possible une onde acoustique. **Justifier**.
2. Préciser quelles sont les ondes détectées les premières. **Justifier**.
3. Donner une relation qui relie t_E, t_0, D et c_E.
4. Donner une relation qui relie t_A, t_0, D et c_A.
5. En déduire que l'expression de l'instant de l'explosion s'écrit $t_0 = \dfrac{c_E t_E - c_A t_A}{c_E - c_A}$ et la distance D de la station à l'épicentre $D = c_E c_A \times \dfrac{t_A - t_E}{c_E - c_A}$.
6. l'analyse des enregistrements montre que les signaux reçus par les capteurs sont décalés d'un retard $\Delta t = 16,43$ s. En déduire la valeur numérique de la distance du lieu de l'explosion (par rapport au bateau)
7. Que faudrait il en plus pour pour localiser précisément l'explosion ?

IV.2 Impact des sonars sur la faune sous-marine

En 2008 à Madagascar, un échouage massif de dauphins a crée une polémique entre une grande partie de la communauté scientifique et les experts qui ont analysé cet echouage. Les experts ont en effet mis en cause pour la première fois un navire d'une compagnie pétrolière utilisant des sonars à fréquences élevées lors de relevés topographiques à 65 km du lieu d'échouage

Les signaux émis par les sonars des bateaux peuvent perturber la faune. A 1 m de l'émetteur d'un sonar, le niveau d'intensité sonore maximal peut atteindre $\mathcal{L}_{\max} = 240$ dB. on modélise le signal émis par une fonction sinusoïdale du temps.



8. A l'aide de l'enregistrement ci-dessus du signal émis par le sonar, vérifier que la fréquence d'émission $f = 12$ kHz. Ce signal appartient-il au domaine audible des êtres humains ?

L'intensité sonore I reçue en un point situé à une distance D de la source acoustique, est liée à la puissance acoustique $\mathcal{P}$ de la source par la relation : $I = \dfrac{\mathcal{P}}{4\pi D^2}$

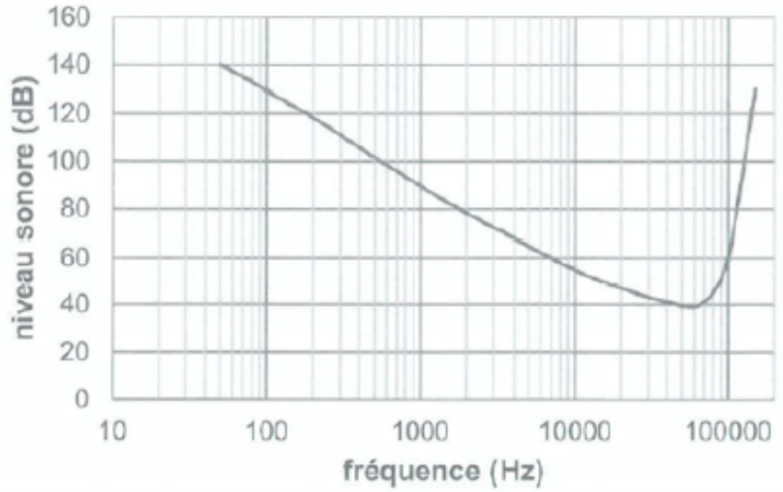
9. On rappelle la défintion du niveau d'intensité sonore $\mathcal{L} = 10\log\left(\dfrac{I}{I_0}\right)$, où I est l'intensité sonore et I_0 est le seuil d'audibilité dans l'eau. On cherche à déterminer le niveau d'intensité sonore au lieu d'échouage des dauphins :
   (a) Calculer la valeur $I_{\max}$ de l'intensité sonore maximale à 1 m du sonar.
   (b) Montrer que la puissance de la source vaut $\mathcal{P} = 8,80.10^8$ W
   (c) En déduire que le niveau d'intensité sonore à 65 km du sonar vaut 144 dB.

Le milieu de propagation absorve une partie de l'énergie de l'onde sonore. Il en résulte que le niveau d'intensité sonore mesuré en un point subit une perte supplmentaire en décibel (dB) égale à αD où α est un coefficient d'absorption qui dépend, entre autres, de la fréquence f de l'onde, et où D est la distance entre la source et le récepteur.

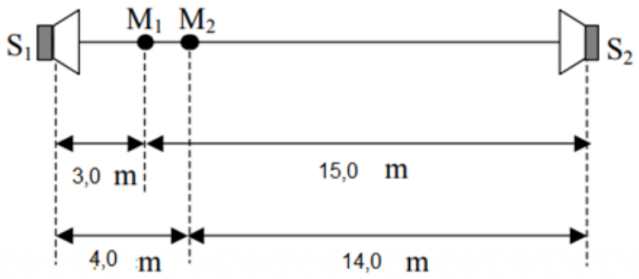
f (kHz)	0,1	0,3	1	3	10	30	100	300	1 000
α (dB.km^{-1})	0,001	0,01	0,07	0,1	1	5	30	100	500

10. Estimer la valeur de la diminution du niveau d'intensité sonore en décibel (dB) dans la situation étudiée. On précisera l'approximation effectuée.

11. La courbe ci-dessous indique le niveau sonore maximal pour qu'un son de fréquence f soit audible par un dauphin. D'après les données graphiques, les dauphins ont-ils pu percevoir l'émission du sonar du navire scientifique à Madagascar en 2008 ? Conclure.



12. Pour prévenir les autres navires de sa présence, le bateau utilise sur le pont des sirènes alimentées par un même générateur de fréquence $f = 85$ Hz. Les sirènes engendrent des ondes sonores de célérité c_A. On s'intéresse à deux sirènes, notées S_1 et S_2, distantes de $18,0$ m orientées l'une vers l'autre.



   (a) Expliquer pourquoi on est suceptible d'avoir des interférences entre les points S_1 et S_2
   (b) Les interférences au point M_1 situé entre S_1S_2 à 3,0 m de S_1 sur ce même axe, sont-elles constructives ou destructives ? **Justifier** soigneusement.
   (c) Les interférences au point M_2 situé entre S_1S_2 à 4,0 m de S_1 sur ce même axe, sont-elles constructives ou destructives ? **Justifier** soigneusement.
   (d) On double la fréquence de générateur qui alimente les sirènes. Les résultats précédents sont ils maintenus ?