Banque PT, France

Session 2026, filière PT

Informatique et modélisation de systèmes physiques

Durée : 4 heures

Ce que traite le sujet

- 1.1 Pression au fond des océans
- 1.2 Communication acoustique sous-marine
- 1.3 Communication par ondes radio
- 2.1 Propagation des rayons sonores par résolution de l'équation différentielle
- 2.2 Propagation des rayons sonores dans des milieux non uniformes
- 2.3 Choix d'une loi d'évolution de la célérité
- 2.4 Reconnaissance de signaux acoustiques sous-marins

Sujet reproduit sans retouche à partir de la page suivante.

Résumé des parties, chapitres de cours liés et autres années :
prepahelp.com/annales/banque-pt/pt/2026/info

Prepa Help ne revendique aucun droit sur le sujet, propriété de l'organisateur du concours.

Epreuve d'Informatique et Modélisation de Systèmes Physiques

Durée 4 h

Si, au cours de l'épreuve, un candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, d'une part il le signale au chef de salle, d'autre part il le signale sur sa copie et poursuit sa composition en indiquant les raisons des initiatives qu'il est amené à prendre.

L'usage de calculatrices est interdit.

AVERTISSEMENT

La **présentation**, la lisibilité, l'orthographe, la qualité de la **rédaction, la clarté et la précision** des raisonnements entreront pour une **part importante** dans **l'appréciation des copies**. En particulier, les résultats non justifiés ne seront pas pris en compte. Les candidats sont invités à encadrer les résultats de leurs calculs.

CONSIGNES :

- Composer lisiblement sur les copies avec un stylo à bille à encre foncée : bleue ou noire.
- L'usage de stylo à friction, stylo plume, stylo feutre, liquide de correction et dérouleur de ruban correcteur est strictement interdit. Les surveillants et surveillantes se réservent le droit de les confisquer.
- Remplir sur chaque copie en MAJUSCULES toutes vos informations d'identification : nom, prénom, numéro inscription, date de naissance, le libellé du concours, le libellé de l'épreuve et la session.
- Une feuille, dont l'entête n'a pas été intégralement renseigné, ne sera pas prise en compte.
- Il est interdit aux candidats de signer leur composition ou d'y mettre un signe quelconque pouvant indiquer sa provenance. La présence d'une information d'identification en dehors du cartouche donnera lieu à un point de pénalité et la page concernée pourra être soustraite de la correction.

" Les applications numériques sont attendues avec un (voire deux) chiffres significatifs. Le jury prendra pleinement en compte le fait que l'épreuve est sans calculatrice et de ce fait sera tout à fait tolérant sur la précision des résultats numériques, l'essentiel étant l'ordre de grandeur ".

Tournez la page S.V.P.

Étude et modélisation de phénomènes de communication sous-marine

La communication sous-marine représente un défi technique majeur, tant pour les applications scientifiques que pour la préservation des écosystèmes marins. Ce sujet explore certains des phénomènes physiques qui régissent la propagation des ondes acoustiques et électromagnétiques dans les océans. Pour les ondes acoustiques, l'approche physique est complétée par une modélisation numérique. Enfin, une étude portant sur la classification des sons sous-marins par intelligence artificielle permet d'aborder les enjeux environnementaux liés aux nuisances sonores anthropiques.

1 Propagation des ondes sonores dans les océans

1.1 Pression au fond des océans

Pour étudier les ondes sonores se propageant dans l'océan, il est nécessaire de pouvoir placer un ou plusieurs capteurs au fond de l'océan. Cette première section a pour but d'étudier quelques contraintes mécaniques exercées sur le capteur.

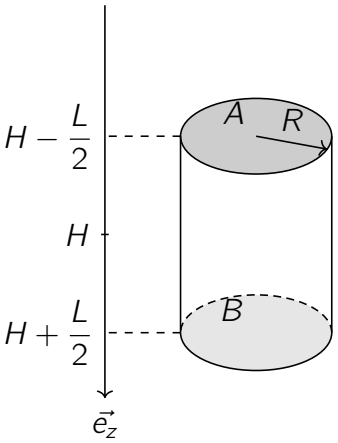


Figure 1 – Capteur cylindrique à la profondeur H.

On cherche à déterminer l'ordre de grandeur des efforts exercés sur le système qui contient le capteur, immergé à la profondeur typique des océans, à savoir $H = 4$ km. On modélise le système par un cylindre de rayon $R = 2$ cm et de longueur $L = 10$ cm. Ce cylindre est d'axe vertical. On note $\overrightarrow{e_z}$ le vecteur unitaire dans le sens de la verticale descendante. On suppose qu'à la surface des océans ($z = 0$), la pression est $P_0 = 10^5$ Pa, pression atmosphérique. On donne également l'intensité de l'accélération de pesanteur $g = 10$ m.s^{-2}.

Question 1 : Donner l'équation locale de la statique des fluides appliquée à un fluide de masse volumique uniforme μ, en présence d'un champ d'accélération de pesanteur uniforme $\overrightarrow{g}$.

Question 2 : En déduire l'expression du champ de pression $P(z)$ dans l'eau des océans modélisée par un fluide statique de masse volumique uniforme $\mu = 1000$ kg.m^{-3}.

On cherche à déterminer la résultante des forces de pressions exercées sur le capteur.

Question 3 : Donner la résultante vectorielle $\overrightarrow{f_A}$ des forces pressantes exercées par l'eau sur la face A. Faire de même pour $\overrightarrow{f_B}$, résultante des forces pressantes exercées par l'eau sur la face B.

Question 4 : Faire l'application numérique pour la face A. Quelle masse, exprimée en tonne, donnerait la même force si elle était posée sur la face A ?

Question 5 : Montrer que la résultante des forces de pression $\overrightarrow{f_C}$ exercées par l'eau sur le pourtour restant du cylindre est nulle.

Le capteur est rempli d'air à la pression P_0 supposée uniforme à l'intérieur du capteur.

Question 6 : En déduire la résultante totale des forces de pressions (air et eau) exercées sur le capteur. Quel résultat connu retrouvez-vous ?

1.2 Communication acoustique sous-marine

On s'intéresse maintenant à la propagation des ondes acoustiques dans l'eau. On admet que les ondes sonores se comportent de façon similaires aux ondes lumineuses dans l'air, et que l'on peut adopter un modèle de « rayon sonore » analogue à celui d'un « rayon lumineux ».

Soit une surface horizontale, le dioptre, située à la profondeur z. Cette surface sépare une couche d'eau où la célérité des ondes sonores est $c_1(z)$ (en haut) d'une autre couche d'eau où la célérité des ondes sonores est $c_2(z)$ (en bas). Ces deux couches sont d'épaisseur infinitésimale (qui sera notée h dans la partie informatique). On nomme $\theta_i(z)$ l'angle d'incidence associé à un rayon sonore qui arrive sur ce dioptre. On nomme $\theta_t(z)$ l'angle associé au rayon transmis, s'il existe. On nomme $\theta_r(z)$ l'angle associé au rayon réfléchi. Tous ces angles sont définis et orientés à partir de la normale au point d'incidence.

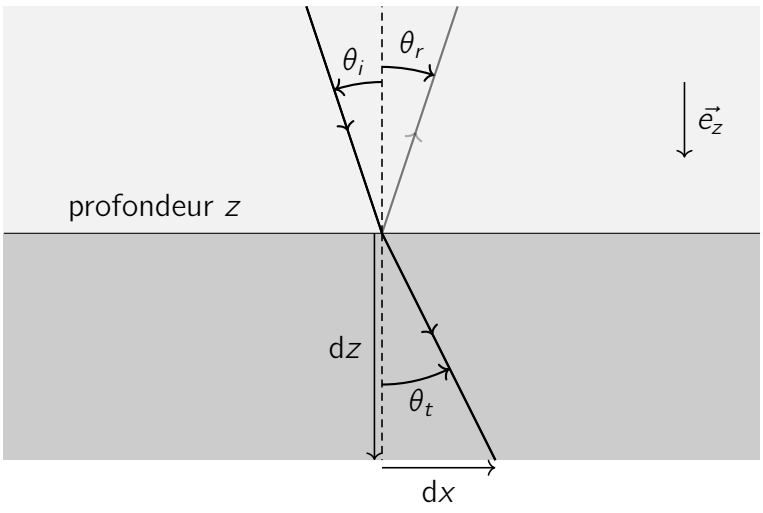


Figure 2 – Transmission d'un rayon sur un dioptre à la profondeur z

On admet les lois physiques suivantes :

$$\begin{cases} \theta_r(z) = -\theta_i(z) \\ \dfrac{\sin\theta_i(z)}{c_1(z)} = \dfrac{\sin\theta_t(z)}{c_2(z)} \end{cases}$$

Tournez la page S.V.P.

Question 7 : De quelles lois d'optique géométrique ces relations sont-elles l'analogue ?

La célérité des ondes sonores c dépend de la profondeur z, en raison des variations de température et de salinité de l'eau. On note $n(z) = \dfrac{c_0}{c(z)}$, où c_0 est la célérité en $z = 0^+$. On modélise l'océan par une succession de couches horizontales, d'épaisseur infinitésimale.

Question 8 : Faire un schéma montrant que l'angle de transmission d'un dioptre correspond à l'angle d'incidence du dioptre suivant.

On ne s'intéresse qu'aux rayons transmis. Grâce au résultat de la question précédente, on peut définir de façon générale un angle $\theta(z)$ qui caractérise l'angle que forme le rayon avec la verticale. On note $\theta_0 = \theta(z = 0^+)$.

Question 9 : Montrer que la quantité $A(z) = \dfrac{\sin(\theta(z))}{c(z)}$ est indépendante de z et donner sa valeur en fonction de θ_0 et c_0.

Question 10 : Quel est le lien géométrique entre $\sin(\theta(z))$, dz et dx ?

Question 11 : En déduire une équation différentielle faisant intervenir $\left(\dfrac{dz}{dx}\right)^2$, n et la constante $\sin\theta_0$.

Question 12 : En déduire l'équation qui pilote la trajectoire des rayons sonores :

$$\frac{d^2z}{dx^2} = \frac{1}{2\sin^2\theta_0}\frac{d}{dz}(n^2)$$

Cette équation n'est pas facilement soluble de façon générale. La partie informatique s'attachera à tracer la trajectoire des rayons de façon numérique, dans le cas particulier où on peut modéliser l'évolution de n avec la profondeur de la façon suivante :

$$n(z) = \sqrt{1 - \beta z^2}$$

où β est une constante phénoménologique.

Question 13 : Montrer qu'en introduisant une fonction $x \mapsto \alpha(x)$, l'équation qui pilote la trajectoire des rayons sonores peut se mettre sous la forme du système différentiel suivant :

$$\begin{cases} \dfrac{dz(x)}{dx} & = \alpha(x) \\ \dfrac{d\alpha(x)}{dx} & = -\dfrac{\beta}{\sin^2\theta_0} z(x) \end{cases}$$

Question 14 : Proposer une interprétation géométrique de α.

On remarque que le résultat que nous avons obtenu décrit la trajectoire d'un rayon transmis à travers chaque dioptre. Si l'angle d'incidence sur le dioptre devient trop grand, le rayon sera réfléchi. Ce cas sera envisagé dans la partie informatique.

1.3 Communication par ondes radio

Pour communiquer dans l'air, les ondes radio sont souvent utilisées. Pourtant, on ne les utilise pas pour communiquer sous l'eau. On se pose donc la question de la propagation des ondes électromagnétiques sous l'eau. On étudie la propagation d'une onde plane de fréquence typique du domaine radio. On envisage une onde plane monochromatique de champ électrique $\overrightarrow{E}$, du type :

$$\overrightarrow{\underline{E}}(x,y,z,t) = E_0 \mathrm{e}^{i\left(\omega t - \underline{k} z\right)} \overrightarrow{e_x}$$

où E_0, ω sont des constantes réelles, i est le nombre tel que $i^2 = -1$, et $\underline{k}$ est un nombre complexe.

On modélise l'eau de mer par un conducteur ohmique de conductivité $\gamma = 4\ \Omega^{-1}.\mathrm{m}^{-1}$. On envisage, pour le moment, uniquement des ondes électromagnétiques de basse fréquence, c'est-à-dire de l'ordre de 10 kHz à 100 kHz.

Question 15 : Rappeler l'expression de la loi d'Ohm locale, reliant la densité volumique de courant $\vec{j}$ à $\overrightarrow{E}$ dans le cas d'un conducteur ohmique de conductivité réelle γ.

On admet que cette loi n'est valide que pour des champs dont les composantes fréquentielles ne dépassent pas $f_m = 10^{13}$ Hz. On nomme $\overrightarrow{B}$ le champ magnétique. On rappelle la relation de Maxwell-Ampère locale, dans un milieu comme l'eau :

$$\overrightarrow{\mathrm{rot}}\,\overrightarrow{B} = \mu_0 \left(\vec{j} + \epsilon \frac{\partial \overrightarrow{E}}{\partial t} \right)$$

avec $\mu_0 \approx 10^{-6}\,\mathrm{H.m}^{-1}$. On suppose que dans l'eau, la seule différence avec le vide est la présence de ϵ en lieu et place de $\epsilon_0 \approx 10^{-11}\,\mathrm{F.m}^{-1}$, avec $\epsilon \approx 80\epsilon_0$.

Question 16 : Montrer que, en norme, le courant de déplacement qui apparaît dans l'expression ci-dessus est négligeable devant le courant de conduction, lorsque la pulsation ω de l'onde de champ $\vec{E}$ considérée est inférieure à une valeur critique dont on déterminera l'expression.

On admet que, dans ces conditions, la densité volumique de charge ρ est nulle dans l'eau.
Question 17 : Dans le cadre des approximations précédentes, montrer que le champ électrique vérifie :

$$\Delta \overrightarrow{E} - \mu_0 \gamma \frac{\partial \overrightarrow{E}}{\partial t} = \overrightarrow{0}$$

Question 18 : Déterminer les valeurs de $\underline{k}$ possibles dans le contexte d'une onde plane du type $\overrightarrow{\underline{E}}(x,y,z,t) = E_0 \mathrm{e}^{i\left(\omega t - \underline{k} z\right)} \overrightarrow{e_x}$ se propageant dans de l'eau de mer.

Question 19 : En déduire que l'onde plane se propageant dans l'eau de mer entre $z = 0$ et $z = +\infty$ est une onde atténuée de la forme :

$$\overrightarrow{\underline{E}}(x,y,z,t) = E_0 \mathrm{e}^{i\left(\omega t - \frac{z}{\delta}\right)} \mathrm{e}^{-\frac{z}{\delta}} \overrightarrow{e_x}$$

où δ est une constante réelle dont on précisera l'expression en fonction de μ_0, γ et ω. Calculer la valeur numérique de ce paramètre, pour une fréquence de l'ordre de 100 kHz.

Tournez la page S.V.P.

Question 20 : Donner l'expression du facteur d'atténuation de l'amplitude à une profondeur $L = 1$ km, pour une onde radio de fréquence $f = 100$ kHz. Conclure.

Pour les fréquences d'ondes électromagnétiques plus élevées, le modèle de conducteur ohmique n'est plus valide, le courant de déplacement n'est plus négligeable également. Les conclusions précédentes ne sont donc plus valides.

Question 21 : À quel domaine du spectre électromagnétique correspond une fréquence $f = 5.10^{14}$ Hz ?

Question 22 : Quelle observation expérimentale permet de justifier que communiquer depuis la surface avec un sous-marin situé à $L = 1$ km de profondeur via des ondes électromagnétiques de ce domaine n'est pas envisageable ?

La modélisation a montré que la communication par ondes radio sous l'eau est irréaliste, tandis que les ondes sonores représentent une alternative viable. Bien que nous n'ayons pas déterminé avec précision les trajectoires exactes des rayons sonores, nous avons formulé un système différentiel permettant de les calculer. La partie informatique va montrer que ces rayons peuvent être guidés sous la surface océanique, de manière analogue à la propagation de la lumière dans une fibre optique.

Cette propriété est exploitée dans le canal SOFAR (SOund Fixing and Ranging). Les ondes sonores de basse fréquence y peuvent parcourir plusieurs milliers de kilomètres avant de se dissiper, et ce canal est utilisé par certains cétacés pour communiquer sur de grandes distances.

2 Modélisation numérique du canal SOFAR (SOund Fixing and Ranging)

La propagation du son dans l'océan dépend principalement de la vitesse du son dans l'eau. Celle-ci est influencée par la profondeur et par les conditions océanographiques telles que la température et la salinité. La vitesse du son varie généralement entre 1450 et 1550 $m.s^{-1}$. Ces variations, bien que faibles, ont un impact significatif sur la propagation des rayons sonores. Le canal SOFAR, par exemple, permet la propagation des ondes sonores sur de très longues distances en raison de la canalisation des ondes dans une couche de minimum de vitesse, limitant ainsi leur dispersion et leur atténuation. La figure 3 donne un exemple de trajet simulé d'un rayon sonore avec ce modèle lorsque le rayon est dans le canal SOFAR. Ce phénomène trouve des applications dans les communications sous-marines aussi bien humaines (sous-marins) qu'animales (baleines).

On se propose d'étudier dans une première partie un modèle de propagation du son afin de calculer le trajet d'un rayon sonore. Dans un second temps, un modèle de classification des sons sous-marins sera construit afin de définir leur origine, animale ou humaine.

Dans toute la suite, on pourra utiliser les fonctions Python au programme. On fournit également quelques fonctions utiles et dont on supposera l'importation déjà réalisée.

— `cos`, `sin` et `tan`

— `acos`, `asin` et `atan`

— la constante `pi`

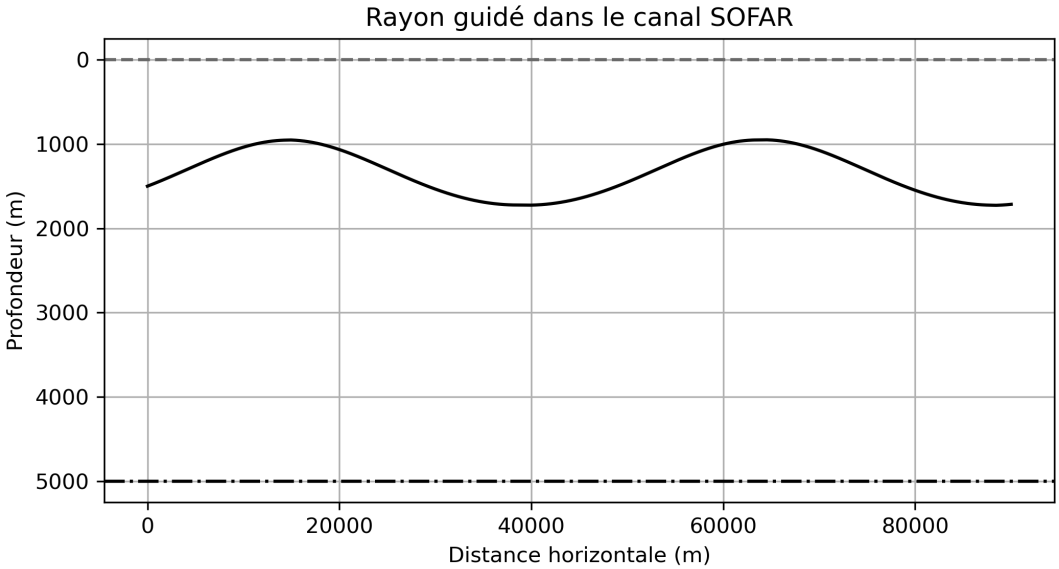


Figure 3 – Exemple d'un rayon sonore guidé dans le canal SOFAR

2.1 Modèle de propagation des rayons sonores : résolution de l'équation différentielle

On a établi dans la première partie l'équation différentielle qui régit la propagation des rayons sonores dans un milieu d'indice variable. On cherche dans un premier temps à résoudre cette équation différentielle par la méthode d'Euler explicite.

On réécrit le système d'équations différentielles trouvé à la **question 12** et faisant intervenir les fonctions continues $z(x)$ et $\alpha(x)$ sous la forme :

$$\begin{cases} \dfrac{dz(x)}{dx} &= \alpha(x) \\ \dfrac{d\alpha(x)}{dx} &= -Az(x) \end{cases}$$

On discrétise l'ensemble de définition de la variable x avec un pas de taille dx. On note z_n et a_n les versions discrètes de z et α aux points $x_n = ndx$.

Question 23 : En utilisant un schéma d'Euler explicite, écrire les trois relations de récurrence permettant de calculer x_{n+1}, z_{n+1} et a_{n+1} en fonction de x_n, z_n, a_n, dx et A.

Question 24 : Compléter la fonction `rayon_Euler` qui prend en argument les bornes du domaine de définition `x0` et `xf`, le pas `dx`, les conditions initiales `z0` (profondeur d'émission), `a0` et la constante `A` du système d'équations différentielles et renvoie deux listes `valeurs_x` et `valeurs_z` contenant les valeurs successives des variables x et z.

```
1 def rayon_Euler(x0, xf, dx, z0, a0, A):
2     # Initialisation des listes
3     valeurs_x = [x0]
4     valeurs_z = [z0]
```


Tournez la page S.V.P.

```
    valeurs_a = [a0]
    x, z, a = x0, z0, a0 # Valeurs courantes des variables
    # Schéma d'Euler explicite
    while .......:
        x_nouveau = ....... # Calcul de x{n+1}
        z_nouveau = ....... # Calcul de z{n+1}
        a_nouveau = ....... # Calcul de alpha{n+1}
        # Ajout des nouveaux éléments
        valeurs_x.append(........)
        valeurs_z.append(........)
        valeurs_a.append(........)
        # Actualisation des variables
        x, z, a = ..................
    return valeurs_x, valeurs_z
```

Question 25 : Quel angle représente `a0` ?

Question 26 : Expliquer brièvement, en 2 ou 3 phrases maximum, comment choisir le pas `dx`. Proposer alors une valeur numérique pour cette variable dans le cas d'un canal SOFAR. On pourra s'aider de la figure 3.

2.2 Modèle de propagation des rayons sonores pour des milieux non-uniformes

On se propose de modéliser le trajet du rayon sonore en tenant compte de la réflexion et de la réfraction des ondes à travers les différentes couches de l'océan. Le fonctionnement de l'algorithme est le suivant :

1. on considère un dioptre à la profondeur z séparant deux couches infinitésimales de même épaisseur h, qui permet de discrétiser la profondeur ;
2. on dispose d'une fonction permettant de connaître la célérité dans chacune de ces deux couches ;
3. on utilise une variable `direction` pour savoir si le rayon remonte vers la surface (la variable vaut alors -1 car z diminue) ou descend en profondeur (la variable vaut alors $+1$ car z augmente) ;
4. pour un dioptre donné, on regarde s'il existe un rayon transmis ou pas.
   - — Si oui, on passe au dioptre suivant en ne retenant que le rayon transmis ;
   - — Si non, il y a réflexion totale, on change la valeur de la variable `direction` et on passe au dioptre suivant.
5. on calcule à l'étape précédente la distance parcourue par le rayon dans la direction x que l'on stocke dans une liste.

La fonction `trajet_rayon` simule le trajet d'un rayon sonore émis à une certaine profondeur avec un angle initial.

2.2.1 Gestion des conditions aux limites

On considère que le rayon ne peut pas sortir de l'espace compris entre la surface et le fond marin de profondeur (5000 m), comme le montre un exemple de propagation possible sur la figure 4. Cela revient à condidérer que la surface et le fond marin réfléchissent totalement et guident les ondes sonores.

Question 27 : Écrire une fonction `conditions_limites` traduisant le changement de direction du rayon aux limites qui prend en argument la profondeur du dernier dioptre franchi, `z_I`, l'épaisseur de

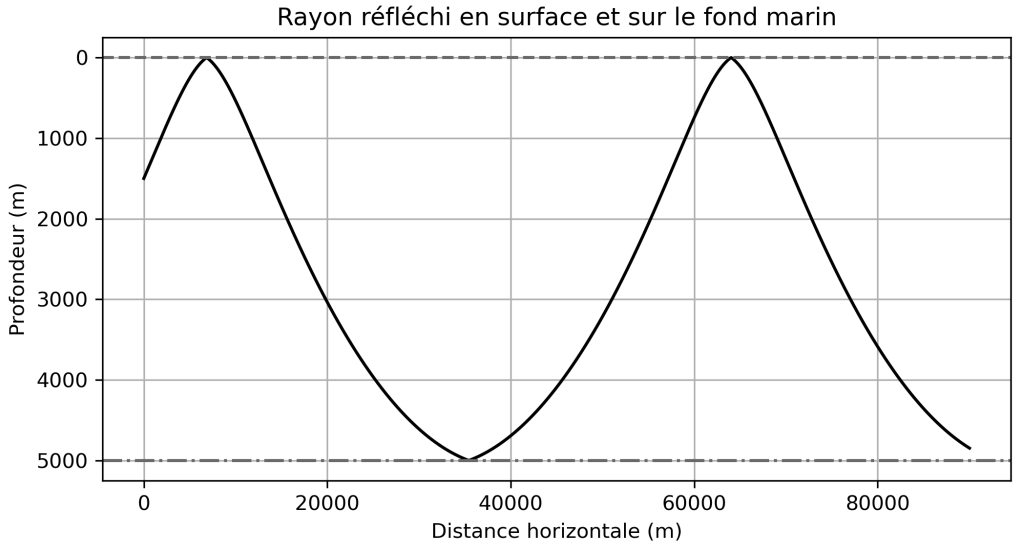


Figure 4 – Effet des conditions aux limites sur un rayon sonore

couche `h` et la direction du rayon stockée dans la variable `direction`, et qui retourne la direction du rayon actualisée selon que le rayon ait atteint la surface ($z = 0$m) ou le fond marin ($z = 5000$m).

2.2.2 Calcul des célérités des deux milieux séparés par le dioptre

Dans la suite, les valeurs des célérités dans chacun des deux milieux séparés par le dioptre à la profondeur z, sont notées `c1` et `c2` : `c1` est la célérité du rayon dans le milieu depuis lequel il arrive et `c2` est la célérité du rayon dans l'autre milieu. Une fonction `celerite`, qui peut intégrer plusieurs modèles continus mathématiques, renvoie la célérité du son en fonction de la profondeur `z` donnée en argument.

Question 28 : Donner une fonction `calculer_celerite` qui prend en argument la profondeur `z`, la hauteur de chaque couche `h` et la variable `direction` et qui renvoie deux nombres flottants, la célérité `c1` dans la couche actuelle et la célérité `c2` dans l'autre couche. Il pourra être utile d'évaluer les vitesses aux points $z+h/2$ et $z-h/2$. *On suppose que la fonction `celerite` a été implémenté précédemment.*

2.2.3 Lois de passage entre deux couches de célérités c_1 et c_2

On souhaite construire un modèle simple de propagation des rayons sonores dans les profondeurs. Pour cela, on construit deux fonctions `refraction` et `reflexion` qui décrivent les deux cas possibles à une interface. Le rayon sonore suit les lois de passage de dioptres décrites dans la partie 1.2 Communication acoustique. On rappelle que dans cet algorithme, on ne suit que le trajet du rayon transmis (=réfracté) sauf en cas de réflexion totale. Les figures 5 et 6 définissent les paramètres de la modélisation pour les deux situations possibles.

— a : angle entre la direction horizontale et le rayon ;

— $A(x_A, z_A)$: point d'incidence du dioptre précédent ;

— $I(x_I, z_I)$: point d'incidence du dioptre courant ;

— $B(x_B, z_B)$: point d'incident du dioptre suivant ;

Tournez la page S.V.P.

— θ_1 : angle entre la normale au dioptre courant et le rayon incident ;

— θ_2 : angle entre la normale au dioptre courant et le rayon suivant.

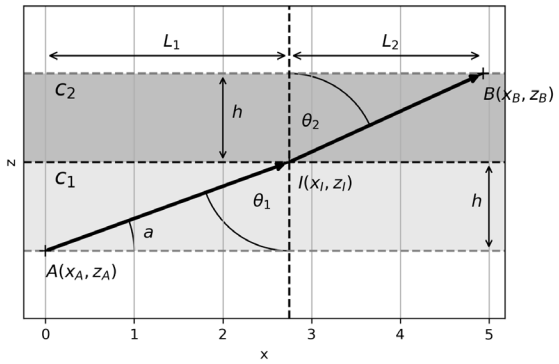


Figure 5 – Réfraction

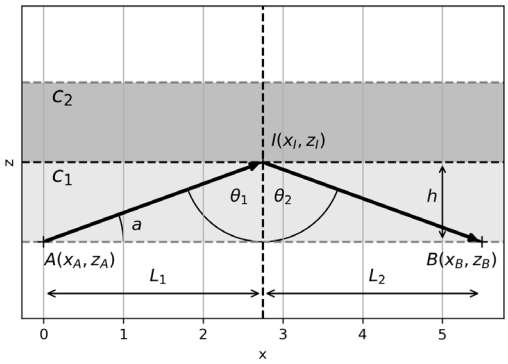


Figure 6 – Réflexion totale

Question 29 : Exprimer la longueur L_2 en fonction des célérités `c1` et `c2`, de l'angle θ_1 et de la hauteur d'une couche `h`. Distinguer les cas de la réfraction et de la réflexion totale.

On rappelle les relations données dans la partie 1.2, avec des notations adaptées à l'absence d'orientation des angles et où θ_i, θ_r et θ_t sont respectivement les angles d'incidence, de réflexion et de réfraction.

$$\begin{cases} \theta_r = \theta_i \\ \dfrac{\sin\theta_i}{c_1} = \dfrac{\sin\theta_t}{c_2} \end{cases}$$

Question 30 : Montrer qu'il existe un rayon transmis si et seulement si l'angle θ_i est inférieur à une valeur critique, notée θ_c. On montrera soigneusement que $\theta_c = \arcsin\left(\dfrac{c_1}{c_2}\right)$.

Question 31 : Écrire une fonction `angle_critique` avec en argument d'entrée les deux célérités `c1` et `c2` et renvoyant l'angle critique.

On donne ci-dessous un extrait du modèle numérique de propagation du rayon sonore. Ce script permet le calcul de la nouvelle position du rayon sonore après passage d'un dioptre.

```
c1, c2 = calculer_celerite(z, h, direction)
if CONDITION_1 :  # Test de réfraction
    theta2, x_B, z_B = refraction(x_I, z_I, theta1, h, c1, c2)
else:  # Réflexion totale
    theta2, x_B, z_B = reflexion_totale(x_I, z_I, theta1, h)
BLOC2
```

Question 32 : Préciser la condition `CONDITION_1`.

Question 33 : Écrire une fonction `refraction` qui prend en argument les coordonnées `x_I`, `z_I` du point I, l'angle d'incidence `theta1`, les célérités des couches `c1` et `c2` et la hauteur de couche `h` et la variable `direction` et qui renvoie l'angle réfracté `theta2` et les coordonnées `x_B`, `z_B` du point B.

Question 34 : Écrire une fonction `reflexion_totale` qui prend en argument les coordonnées `x_I`, `z_I` du point I, l'angle d'incidence `theta1` et la hauteur de couche `hauteur_couche` et qui renvoie l'angle réfléchi `theta2` et les coordonnées `x_B`, `z_B` du point B.

Question 35 : Écrire la ou les lignes du `BLOC2` permettant de mettre à jour les listes `valeurs_x` et `valeurs_z` et d'actualiser la variable `z` en fonction de `direction`. On n'oubliera pas de vérifier si l'on atteint les conditions aux limites.

2.2.4 Construction du rayon sonore - Synthèse

Question 36 : Écrire une fonction `trajet_rayon` qui prend en argument :

- `x_emission`, l'abscisse du point d'émission ;
- `y_emission`, l'ordonnée du point d'émission ;
- `angle_emission`, l'angle d'émission du rayon par rapport à l'horizontale ;
- `h`, la hauteur d'une couche ;
- `distance_x_max`, la distance maximale de propagation du rayon.

et qui renvoie la liste `rayon`, liste de tuples `(x,y)`, coordonnées de tous les points du rayon sonore . On n'oubliera pas d'initialiser la liste `rayon`. Le rayon se propage de la gauche vers la droite.

La figure 7 présente un exemple de calculs de rayons sonores se propageant dans le canal SOFAR.

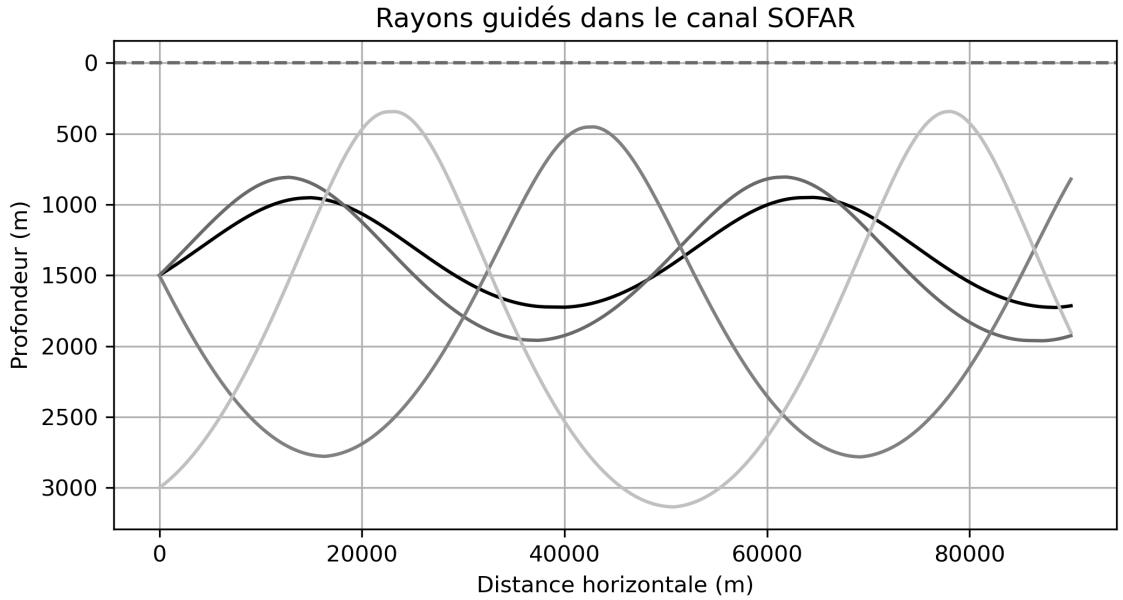


Figure 7 – Exemple de plusieurs rayons sonores émis avec des angles différents et pour deux positions d'émission

Tournez la page S.V.P.

2.3 Choix d'une loi d'évolution de la célérité

La vitesse du son peut être mesurée directement ou calculée à l'aide de formules empiriques. La vitesse augmente avec la profondeur, mais peut être influencée par les variations saisonnières et journalières de température, notamment dans les couches de surface et la thermocline (zone sous-marine de transition thermique rapide entre les eaux superficielles chaudes et les eaux profondes plus froides).

2.3.1 Construction d'une base de données de mesures des caractéristiques de l'eau en profondeur

On souhaite construire une base de données pour identifier des modèles de célérités à partir de relevés expérimentaux. La base de données est constituée de trois tables dont les attributs respectifs sont les suivants :

Description des tables

Table `regions` **:** contient les informations sur les différentes régions.

- id_region : identifiant unique de la région ;
- region : nom de la région (Region1, Region2, Region3).

Table `periodes` **:** contient les informations sur les périodes de l'année.

- id_periode : identifiant unique de la période ;
- periode : nom de la période (Hiver, Printemps, Éte, Automne).

Table `mesures` **:** contient les mesures de température et de salinité en fonction de la profondeur, de la période et de la région.

- id_mesure : identifiant unique de la mesure ;
- id_region : identifiant de la région (clé étrangère) ;
- id_periode : identifiant de la période (clé étrangère) ;
- profondeur : profondeur à laquelle la mesure a été effectuée (en mètres) ;
- temperature : température de l'eau (en °C) ;
- salinite : salinité de l'eau (en PSU) ;
- date : date à laquelle la mesure a été effectuée.

Question 37 : Écrire une requête SQL renvoyant les profondeurs, températures et salinités dans la région 1 à la date du 17 avril 2025.

Question 38 : Écrire une requête SQL renvoyant le nombre de mesures faites dans la région 2 en été.

2.3.2 Modèle de célérité grand fond

Le profil de Munk, représenté sur la figure 8, est un profil de célérité idéalisé qui permet une bonne représentation de la vitesse du son dans les profondeurs sous-marines. c est donnée en $\mathrm{m.s}^{-1}$ et z en m.

$$c(z) = 1500 \cdot \left[1 + 0.00737(\overline{z} - 1 + e^{-\overline{z}})\right] \text{ avec } \overline{z} = \frac{2(z - 1300)}{1300}$$

Question 39 : Écrire une fonction `munk` qui prend en argument la profondeur z et renvoie la célérité à cette profondeur.

La variation particulière du profil de Munk permet de reproduire l'effet du canal SOFAR agissant comme un guide d'onde.

Question 40 : Calculer la dérivée, au sens mathématique, de la fonction c par rapport à la profondeur z et écrire une fonction `dmunk` qui prend en argument la profondeur et retourne la valeur de la dérivée dc/dz en ce point.

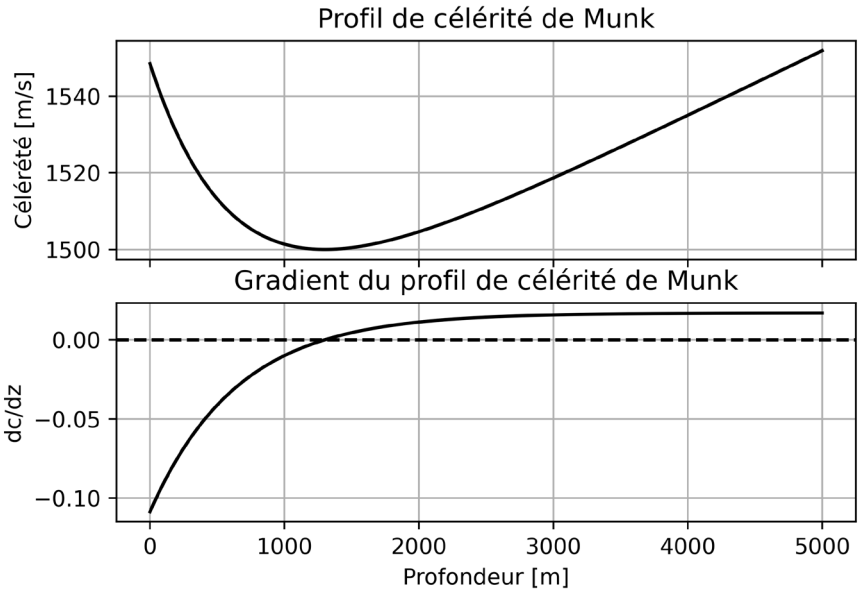


Figure 8 – Tracés du profil de Munk et de sa dérivée

Question 41 : Écrire une fonction Python `dichotomie` qui prend en argument la fonction dérivée du profil de célérité `dmunk`, les bornes de l'intervalle de profondeur `borne_debut` et `borne_fin`, et la tolérance portant sur la taille de l'intervalle de recherche `tolerance`, et qui retourne la profondeur de la célérité minimum en utilisant l'algorithme de la résolution dichotomique. On cherchera entre la surface de la mer et la profondeur 5000 m.

On souhaite identifier la profondeur de célérité minimum à 10 m près.

Question 42 : Quelle valeur donner à la tolérance dans l'appel effectué de la fonction `dichotomie` ?

Question 43 : Quelles instructions permettent de retourner la profondeur de la célérité minimum et la valeur de cette dernière ?

Question 44 : En un court paragraphe (5 lignes maximum), expliquer par analogie l'origine de l'effet SOFAR. À partir du profil de Munk, déterminer autour de quelles profondeurs les ondes seront guidées.

Tournez la page S.V.P.

2.4 Reconnaissances de signaux acoustiques sous-marins

Les activités humaines, telles que la navigation commerciale, les prospections sismiques et l'utilisation de sonars, génèrent des bruits sous-marins qui perturbent les écosystèmes marins. Ces sons anthropiques (d'origine humaine) peuvent masquer les communications essentielles des mammifères marins comme les baleines, entravant leur capacité à trouver des proies, éviter les dangers ou naviguer efficacement.

Pour atténuer ces impacts, il est essentiel de surveiller et d'analyser les sources sonores sous-marines dans les zones de vies des mammifères marins. La figure 9 représente différentes familles de sons sous-marins d'origine anthropique, géophonique ou biophonique dans le plan fréquence-niveau sonore.

On envisage l'utilisation de modèles d'intelligence artificielle sur les enregistrements acoustiques sous-marins pour identifier et catégoriser les différentes sources de bruit. Cette approche faciliterait la distinction entre les sons naturels et anthropiques, contribuant ainsi à une meilleure compréhension et gestion des nuisances sonores dans les habitats marins.

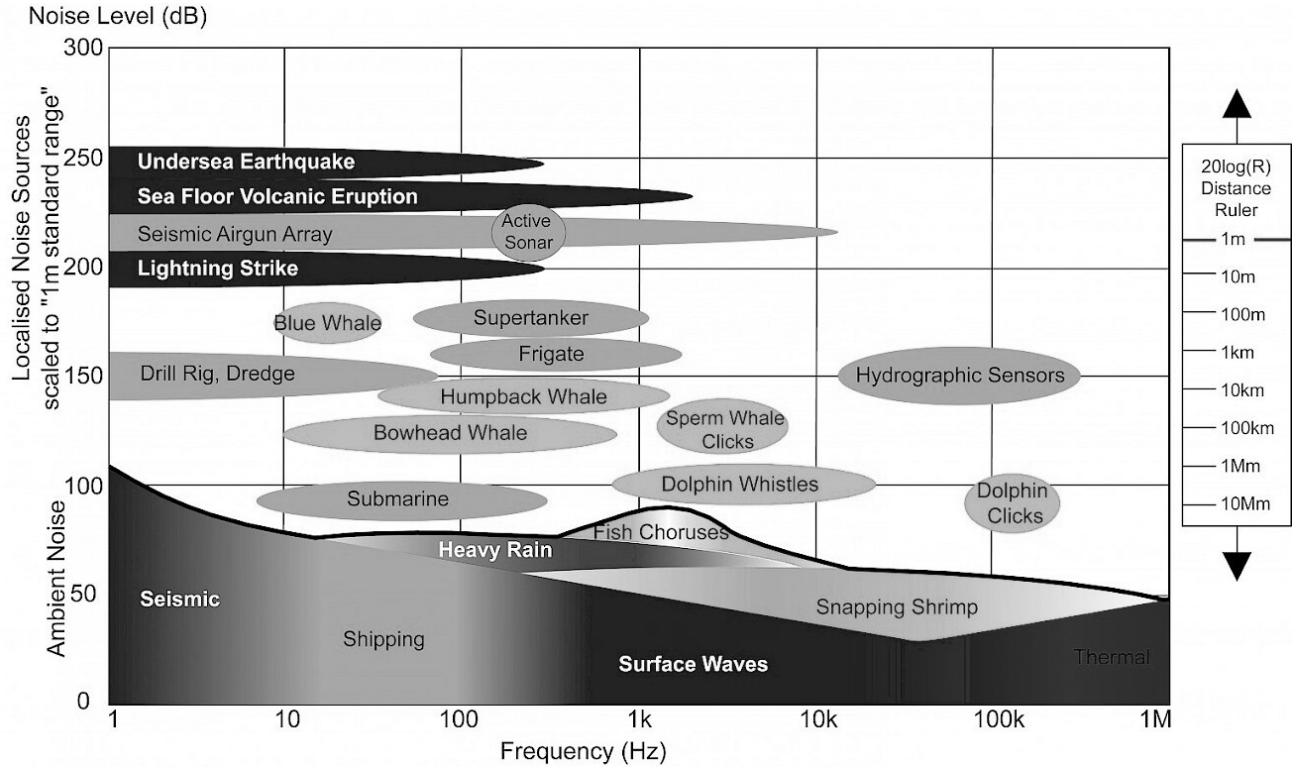


Figure 9 – Densité spectrale d'intensité acoustique (niveau sonore par la suite) en fonction de la fréquence (mesurée en Hertz) présentant les niveaux et fréquences des sources sonores anthropiques et naturelles (géophonie et biophonie) présentes en milieu marin. Référence : OSPAR

2.4.1 Représentation des données étudiées

Une campagne de surveillance a permis de réaliser des mesures de sons sous-marins d'origines anthropique et animale. Les fichiers audios ont été post-traités afin d'en extraire deux informations représentatives : le niveau sonore et la fréquence. La méthode de détermination de ces deux grandeurs n'est pas étudié dans ce problème.

Les données sont compilées dans un fichier texte dont les premières colonnes sont affichées ci-dessous.

```
"Fréquence (Hz)", "Niveau sonore (dB)", "Catégorie", "Origine"
21.236, 186.37, "Baleine bleue", "Animale"
31.959, 174.75, "Baleine bleue", "Animale"
...
63.917, 230.89, "Prospection sismique", "Anthropique"
...
359.474, 186.10, "Opérations pétrolières et gazières", "Anthropique"
296.618, 204.26, "Opérations pétrolières et gazières", "Anthropique"
```

La figure 10 représente l'ensemble des enregistrements audios dans le plan niveau sonore-fréquence et précise leur origine et la sous-catégorie d'appartenance.

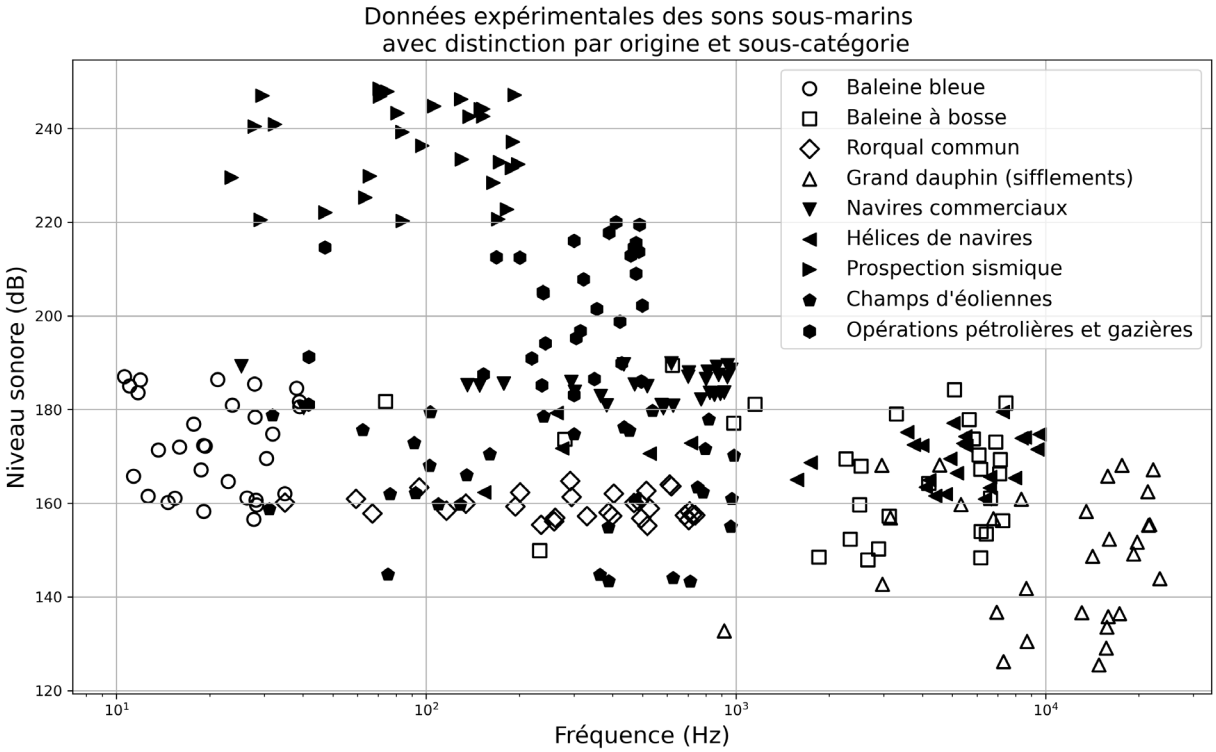


Figure 10 – Représentation des mesures expérimentales en fonction du niveau sonore et de la fréquence, classées par origine anthropique (symbole plein) ou animal (symbole vide)

Tournez la page S.V.P.

2.4.2 Implémentation des k plus proches voisins

On met en œuvre l'algorithme des k plus proches voisins afin de déterminer l'origine de nouveaux enregistrements.

Question 45 : Rappeler le principe de l'algorithme des k plus proches voisins en 5 à 10 lignes maximum.

Question 46 : Expliquer comment choisir une valeur optimale k en précisant les inconvénients de valeurs extrêmes.

L'algorithme des k plus proches voisins nécessite de définir une métrique pour le calcul des distances. Par défaut, la distance euclidienne est utilisée.

Question 47 : Écrire une fonction `distance_euclidienne`, qui renvoie la distance euclidienne entre deux points `A` et `B` du fichier de valeurs expérimentales dont les coordonnées sont stockées dans des tuples `(freq_A, dB_A)` et `(freq_B, dB_B)`.

Il est enfin nécessaire d'identifier les plus proches voisins dans la liste des distances entre la nouvelle donnée à classifier et chaque donnée de la base d'apprentissage.

Question 48 : Écrire une fonction `plus_proches` qui reçoit en argument une liste `distances` de nombres réels représentants la distance entre le point à classifier et chaque point de la base d'apprentissage et un entier `k` strictement positif, et qui retourne les indices des k plus petites distances de la liste `distances`. *L'utilisation des fonctions de tri prédéfinies comme `sorted` est interdit.*

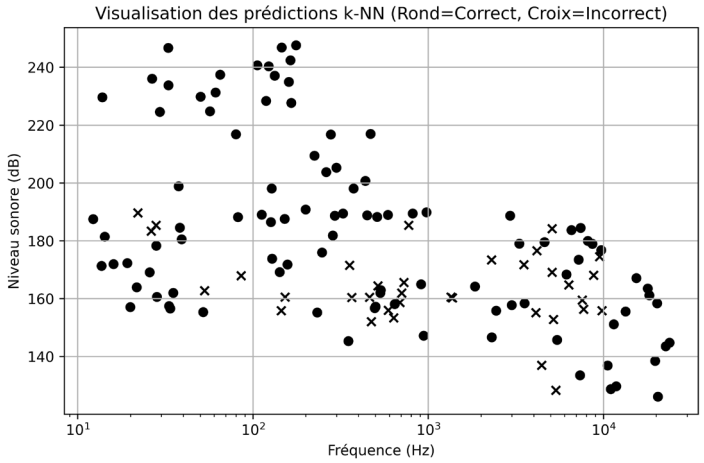


Figure 11 – Visualisation des prédictions

Après exploitation du modèle k plus proches voisins, on obtient la matrice de confusion suivante :

```
Confusion Matrix :
 [[52 13]
 [22 48]]
```

Question 49 : À partir de la matrice de confusion et de la représentation des prédictions (figure 11), expliquer si le modèle permet une bonne prédiction de l'origine du son. Calculer la précision globale et les précisions pour chacune des origines.

Question 50 : Comment améliorer les performances de la classification par la méthode des k plus proches voisins ?

IMPRIMERIE NATIONALE – 26 1055 – D'après documents fournis

Travailler les chapitres de ce sujet

Prepa Help suit le programme de PT chapitre par chapitre : cours détaillé, méthodes, pièges, exercices et problèmes corrigés pas à pas, tirés des concours. L'essai gratuit donne accès aux chapitres offerts de ta filière, sans carte bancaire.

Chapitres liés à ce sujet

- Optique géométrique et formation des images
- Bases de Python : expressions, types, instructions, fonctions
- Listes et algorithmes de recherche (séquentielle, dichotomique)
- Apprentissage automatique : k plus proches voisins et k-moyennes

Ouvrir l'essai gratuit

Scanne le code ou clique sur le bouton.

prepahelp.com/#essai

Une question sur le concours ou sur ta filière : **écrire sur WhatsApp**

Les autres années et épreuves : prepahelp.com/annales/banque-pt/pt