

SESSION 2025

---

**AGRÉGATION  
CONCOURS INTERNE  
ET CAER**

**Section : PHYSIQUE CHIMIE**

**COMPOSITION SUR LA PHYSIQUE  
ET LE TRAITEMENT AUTOMATISÉ DE L'INFORMATION**

Durée : 5 heures

---

*Calculatrice électronique autorisée selon les modalités de la circulaire du 17 juin 2021 publiée au BOEN du 29 juillet 2021.*

*L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.*

*Il appartient au candidat de vérifier qu'il a reçu un sujet complet et correspondant à l'épreuve à laquelle il se présente.*

*Si vous repérez ce qui vous semble être une erreur d'énoncé, vous devez le signaler très lisiblement sur votre copie, en proposer la correction et poursuivre l'épreuve en conséquence. De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, vous devez la (ou les) mentionner explicitement.*

**NB : Conformément au principe d'anonymat, votre copie ne doit comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé consiste notamment en la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de la signer ou de l'identifier.  
Le fait de rendre une copie blanche est éliminatoire**

**Tournez la page S.V.P.**

A

### INFORMATION AUX CANDIDATS

Vous trouverez ci-après les codes nécessaires vous permettant de compléter les rubriques figurant en en-tête de votre copie.

Ces codes doivent être reportés sur chacune des copies que vous remettrez.

► **Concours interne de l'Agrégation de l'enseignement public :**

| Concours | Section/option | Epreuve | Matière |
|----------|----------------|---------|---------|
| EAI      | 1500C          | 101     | 0385    |

► **Concours interne du CAER / Agrégation de l'enseignement privé :**

| Concours | Section/option | Epreuve | Matière |
|----------|----------------|---------|---------|
| EAH      | 1500C          | 101     | 0385    |





## Au fil de l'eau

Ce sujet aborde différentes thématiques en lien avec la présence d'eau liquide sur Terre. Il est composé de quatre parties indépendantes.

Après l'étude dans une première partie de quelques propriétés physiques élémentaires de l'eau, la partie II s'intéresse plus particulièrement aux propriétés optiques de l'eau et notamment au phénomène de réflexion totale.

La partie III propose d'étudier un dispositif permettant de convertir l'énergie mécanique de la houle en pleine mer afin d'en tirer profit. Enfin, la dernière partie traite de la simulation et de la modélisation des vagues en eau peu profonde afin d'essayer d'estimer la quantité d'énergie qu'elles véhiculent.

Les questions sont posées à l'aide d'un ou plusieurs verbes d'action en **gras**. L'évaluation tient compte du respect de chacune des consignes ainsi formulées.

Des questions pédagogiques et didactiques reliées aux concepts abordés dans les différentes parties sont insérées dans le corps du texte. Elles sont signalées par l'indication **QP** et représentent environ vingt pour cent du total des points attribués.

Certaines questions sont repérées par une barre noire dans la marge gauche. Leur résolution demande une prise d'initiative de la part du candidat ou de la candidate.

L'évaluation des réponses par le jury porte tout particulièrement sur l'analyse physique des situations étudiées, l'intelligibilité et la clarté de la rédaction et la mise en place d'une démarche raisonnée de résolution.

## Contenu du sujet

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| I. Quelques propriétés physiques élémentaires de l'eau .....                              | 3  |
| II. Eau et effets de lumière.....                                                         | 7  |
| III. Un exemple de convertisseur d'énergie de la houle : l'absorbeur ponctuel résonant .. | 13 |
| IV. Ondes et vagues : aspects énergétiques .....                                          | 19 |
| Annexe 1.....                                                                             | 24 |
| Annexe 2.....                                                                             | 25 |
| Annexe 3.....                                                                             | 26 |
| Annexe 4.....                                                                             | 27 |
| Annexe 5.....                                                                             | 28 |
| Annexe 6.....                                                                             | 29 |
| Annexe 7.....                                                                             | 30 |

## Données numériques

- Constante d'Avogadro :  $N_A = 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
- Masse molaire de l'oxygène :  $M_O = 16,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$
- Masse molaire de l'hydrogène :  $M_H = 1,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$

## I. Quelques propriétés physiques élémentaires de l'eau

### I.1. De l'eau liquide sur Terre

**Q1. Donner** la masse molaire de l'eau.

**Q2. Comparer** le nombre de molécules d'eau dans un verre d'eau de 20 cL, dans les conditions ambiantes de température et de pression ( $T = 20\text{ °C}$  et  $P = 1,0 \times 10^5\text{ Pa}$ ), au nombre de grains de sable présents sur Terre, sachant qu'il y a  $10^{20}$  grains de sable sur la totalité des plages de la Terre.

**Q3. Associer** les ordres de grandeur des énergies de liaison correspondant aux liaisons covalente, hydrogène et de van der Waals proposées dans le tableau ci-dessous.

|                              |                       |
|------------------------------|-----------------------|
| A — Liaison covalente        | 1 — quelques kJ/mol   |
| B — Liaison de van der Waals | 2 — 10 à 50 kJ/mol    |
| C — Liaison hydrogène        | 3 — 200 à 1000 kJ/mol |

**Q4. Expliquer** pourquoi l'eau est en phase liquide dans les conditions ambiantes de température et de pression alors que la plupart des espèces chimiques de masse molaire comparable sont à l'état gazeux dans les mêmes conditions.

**QP5.** Pour répondre à la question précédente, un élève écrit la phrase suivante : « la plupart des molécules de masse molaire comparable à celle de l'eau sont à l'état gazeux dans les conditions ambiantes de température et de pression ». **Corriger** la réponse de l'élève et **indiquer** la confusion qu'il commet.

**Q6. Décrire** qualitativement l'évolution de la température de fusion de la glace avec la pression dans le diagramme de phases de l'eau (figure 1). **Citer** une expérience usuellement présentée pour illustrer cette propriété.

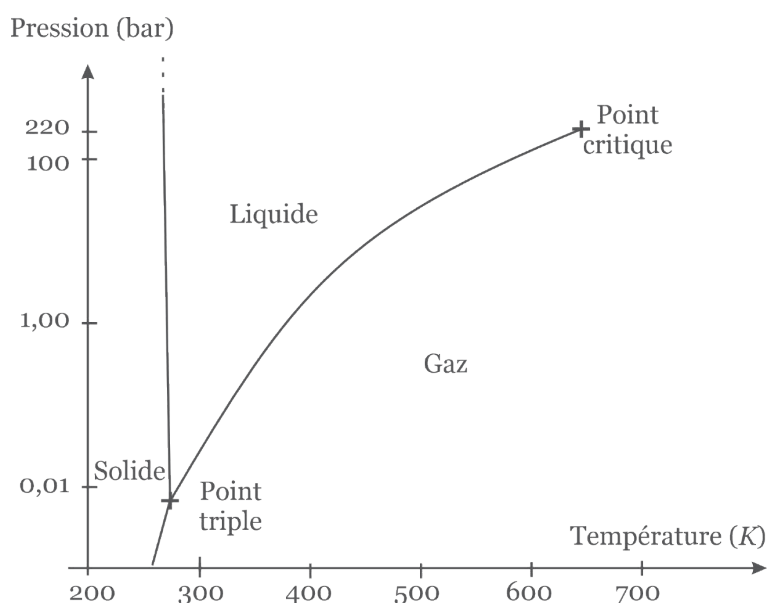


FIGURE 1 - Diagramme de phases de l'eau.

D'après <https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/eau-glace-pression.xml#phases-eau>

## I.2. Mise en évidence expérimentale de la dilatation thermique de l'eau au cycle 4

Un enseignant au cycle 4 propose à ses élèves une question issue d'une épreuve de DNB, reproduite en annexe 1, sur la variation de la masse volumique de l'eau avec la température. L'extrait du programme de cycle 4 correspondant est donné en annexe 2.

Pour la correction, il propose les éléments de réponse suivants :

- (1) D'après le graphique, quand la température augmente, la masse volumique  $\rho$  de l'eau diminue.
- (2) Si  $\rho$  diminue, le volume augmente.
- (3) Le volume augmente donc le niveau de l'eau dans le tube monte.

**QP7.Proposer** un élément de réponse supplémentaire qu'il serait judicieux de prendre en compte lors de la correction.

## I.3. Mesure de la capacité thermique massique de l'eau en classe de terminale de la voie générale, spécialité physique-chimie

Les extraits de programme correspondants sont fournis en annexes 3 et 4.

En début de séance sur les transferts thermiques, un élève est invité par son professeur à toucher successivement un cube en bois et un cube en acier de même taille, déposés tous deux sur son bureau. L'élève répond qu'au toucher, le cube en acier est plus froid que le cube en bois. Le professeur lui révèle alors que les deux cubes sont à la même température, celle de la pièce.

**QP8.Préciser** deux grandeurs physiques que cette expérience démonstrative permet de distinguer.

**QP9.Donner** l'explication que l'enseignant peut apporter à l'élève qui s'étonne que les deux cubes soient à la même température.

L'enseignant distribue à ses élèves l'activité expérimentale ci-dessous afin de leur faire mesurer la capacité thermique massique de l'eau hors la classe.

Matériel :

Bouilloire électrique  
Balance numérique  
Thermomètre  
Chronomètre

Protocole expérimental :

Relever la puissance électrique de la bouilloire.  
Mesurer une masse  $m$  d'eau liquide, par exemple  $m = 1,0 \text{ kg}$ .

Mettre l'eau dans la bouilloire. Mesurer la température initiale  $T_i$  de l'eau à l'aide d'un thermomètre.

Fermer la bouilloire, démarrer le chauffage et le chronomètre.

Arrêter la bouilloire au bout d'une durée  $\Delta t = 200$  s, durée à adapter suivant votre bouilloire.

Mélanger puis mesurer la température finale  $T_f$ .

**Question : Proposer une mesure de la capacité thermique massique de l'eau et évaluer son incertitude.**

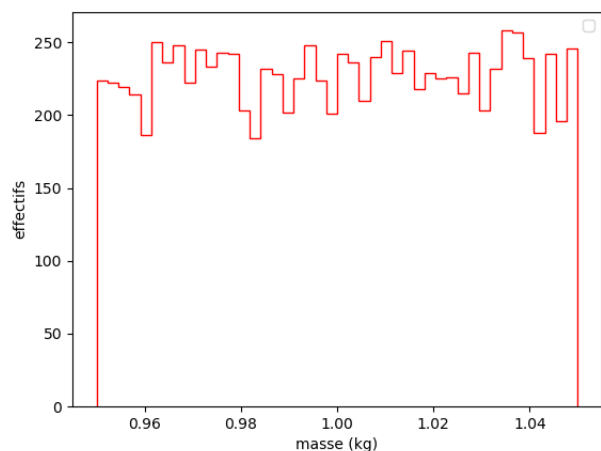
**QP10. Donner** la raison pour laquelle l'enseignant précise dans le protocole d'adapter la durée  $\Delta t$  de chauffage en fonction de la bouilloire utilisée.

De retour en classe, l'enseignant discute des limites du protocole expérimental donné pour la mesure de la capacité thermique massique de l'eau réalisée hors la classe.

**QP11. Indiquer** une précaution à rajouter au protocole en termes de sécurité.

Afin d'illustrer l'évaluation de l'incertitude-type de type B sur la mesure de la masse d'eau prélevée,  $m = 1,0$  kg, l'enseignant propose dans le document ci-dessous (figure 2) un code Python et le résultat de son exécution dans la console. La précision de la balance utilisée pour l'exercice est donnée par le constructeur et vaut 0,05 kg.

```
1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3 m = np.random.uniform(0.95, 1.05, 10000)
4 plt.figure()
5 plt.hist(m, bins='rice', color='red', histtype='step')
6 plt.xlabel('masse (kg)')
7 plt.ylabel('effectifs')
8 plt.legend()
9 plt.show()
10 print('theorie sigma = ', 0.05/np.sqrt(3))
11 print('monte carlo s = ', )
```



theorie sigma = 0.02886751345948129  
monte carlo s = 0.02892559454784287

FIGURE 2 - Évaluation de l'incertitude sur la mesure de la masse d'eau prélevée,  $m = 1,0$  kg, suivant deux méthodes.

**QP12. Compléter** la ligne 11 du code Python (figure 2) afin d'afficher dans la console l'incertitude-type évaluée suivant une méthode de Monte Carlo.

**QP13. Cibler** l'objectif pédagogique principal de ce document (figure 2). **Expliquer** l'intérêt de la présence de l'histogramme.

Afin d'évaluer l'incertitude-type sur la mesure de la capacité thermique massique de l'eau, l'enseignant fournit aux élèves le code Python suivant à renseigner avec les valeurs mesurées hors la classe :

```

1 '''
2 Contexte: détermination d'une capacité thermique massique ( $c = P \cdot t / m \cdot \theta$ )
3
4 '''
5 import numpy as np
6 def capacite(P,t,m,theta):
7     '''
8     Renvoie la valeur de la capacité thermique massique c à partir de :
9     - la puissance P de la bouilloire électrique (en W)
10    - la durée de l'expérience t (en s)
11    - la masse d'eau prélevée m (en kg)
12    - la différence de température theta (en K)
13    '''
14    return (P*t)/(m*theta)
15
16 def u_c(N,P,t,m,theta,delta_P,delta_t,delta_m,delta_theta):
17     '''
18     Renvoie la valeur de c et son incertitude-type étant données les valeurs des grandeurs utiles
19     et les demi-largeurs de leurs intervalles de variation. Ces grandeurs sont considérées
20     comme des variables aléatoires avec une loi de probabilité uniforme sur ces intervalles de
21     variation.
22     '''
23     #
24     liste = np.empty(N)
25     # tirage aléatoire des valeurs des grandeurs
26     for i in range(N):
27         P_sim = P + delta_P*np.random.uniform(-1,1)
28         t_sim = t + delta_t*np.random.uniform(-1,1)
29         m_sim = m + delta_m*np.random.uniform(-1,1)
30         theta_sim = theta + delta_theta*np.random.uniform(-1,1)
31         liste[i] = capacite(P_sim,t_sim,m_sim,theta_sim)
32     return [liste.mean(),liste.std()]
33
34 '''Cas où P = 1300 W ; t = 200 s ; m = 1,0 kg et theta = 60 K avec delta_P = 100 W ;
35 delta_t = 0,5 s ; delta_m = 0,05 kg et delta_theta = 0,05 K'''
36 res = u_c(100000,1300,200,1,60,100,0.5,0.05,0.05)
37 print("Capacité thermique massique = %2.1f J/K/kg ; Incertitude- type = %1.1f /K/kg"%(res[0],res[1]))
38

```

Résultats obtenus après exécution dans la console :

Capacité thermique massique =  $4338,6 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$   
 Incertitude-type =  $229,7 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$

FIGURE 3 - Code Python pour l'évaluation de l'incertitude-type sur la mesure de la capacité thermique massique de l'eau et résultat de son exécution.

**QP14.** Citer la partie du programme de spécialité physique-chimie de la classe de terminale, donné en annexe 4, qui fait référence à ce code Python et préciser l'intérêt pédagogique de son utilisation.

**QP15. Écrire** le résultat de la mesure de la capacité thermique massique de l'eau sur l'exemple fourni dans la figure 3 et **discuter** quantitativement de sa compatibilité avec la valeur de référence,  $C_{\text{eau}} = 4180 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ . On retiendra deux chiffres significatifs pour l'expression de l'incertitude-type.

**QP16.** Le professeur souhaite effectuer en classe une mesure de la capacité thermique massique de l'eau en utilisant un calorimètre. **Proposer** un exemple de protocole à suivre afin de mesurer la valeur en eau du calorimètre utilisé.

## II. Eau et effets de lumière

### II.1. Fenêtre de Snell

*« La fenêtre de Snell (ou « cercle de Snell », ou « trou optique ») est un phénomène d'optique subaquatique lié aux propriétés de l'interface eau/atmosphère. [...] C'est le phénomène par lequel un spectateur situé à plusieurs mètres sous l'eau et regardant vers la surface ne voit ce qui est au-dessus de la surface qu'à travers un cône de perception de la lumière [...]. La zone située à l'extérieur de cette « fenêtre de Snell » apparaît à ce spectateur subaquatique soit complètement sombre, soit elle réfléchit le décor subaquatique ou la partie inférieure d'objets semi-immergés. »*



FIGURE 4 – Vue par-dessous d'une personne qui nage à la surface.

Texte et photo d'après [https://fr.wikipedia.org/wiki/Fenêtre\\_de\\_Snell](https://fr.wikipedia.org/wiki/Fenêtre_de_Snell)

L'objectif de cette partie est de modéliser ce phénomène.

**Q17.** L'indice de réfraction de l'eau vaut  $n_{\text{eau}} = 1,3$ . **Décrire** comment évolue cette grandeur physique avec la température et **justifier** brièvement.

**Q18. Citer** une situation de la vie courante qui permet d'illustrer le caractère dispersif de l'eau.

On considère deux milieux d'indices de réfraction  $n_1$  et  $n_2$  séparés par un dioptre.

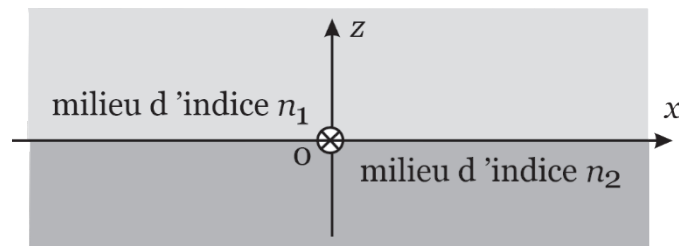


FIGURE 5 – Dioptre entre un milieu d'indice  $n_1$  et un milieu d'indice  $n_2$ .

**Q19. Énoncer** les lois de Snell-Descartes et les illustrer par un schéma légendé où la lumière arrive sur le dioptre par le milieu d'indice  $n_1$ .

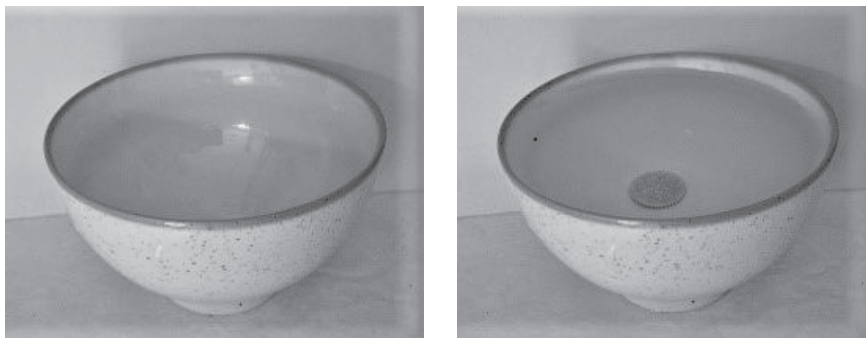


FIGURE 6 – A gauche, le bol contient une pièce de monnaie, à droite, le bol contient la même pièce de monnaie et de l'eau.

Les deux photos sont prises sous le même angle de vue.

Photographies issues du site <https://physiqueludique.fr/>

**Q20. Expliquer** qualitativement, en s'appuyant sur un schéma, pourquoi la pièce n'est visible que dans le bol de droite de la figure 6.

**Q21.** Dans le cas général de la figure 5, **décrire** le phénomène de réfraction limite lorsque la lumière arrive sur le dioptre par le milieu d'indice  $n_1$  et **préciser** la condition que doivent vérifier les indices  $n_1$  et  $n_2$  pour que ce phénomène se produise. **Déterminer** l'expression de l'angle limite de réfraction.

**Q22.** Dans le cas général de la figure 5, **décrire** le phénomène de réflexion totale lorsque la lumière arrive sur le dioptre par le milieu d'indice  $n_1$  et **préciser** la condition que doivent vérifier les indices  $n_1$  et  $n_2$  pour que ce phénomène se produise. **Déterminer** l'expression de l'angle d'incidence limite correspondant.

On s'intéresse maintenant tout particulièrement à l'interface air/eau.

**Q23. Calculer** la valeur numérique de l'angle limite de réfraction dans le cas de l'interface air/eau.

Sur la photo de la figure 4, la taille du plongeur est celle d'un adulte de taille moyenne que l'on pourra prendre égale à 1,8 m.

**Q24. Expliquer** de façon qualitative ce que l'on observe sur la photo. **Faire** un schéma explicite.

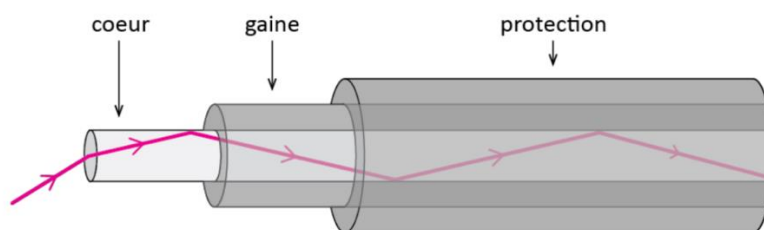
**Q25. Calculer** une valeur estimée de la profondeur  $d_{\text{photo}}$  sous la surface à laquelle la photo a été prise.

## II.2. Transmission des informations par fibre optique en spécialité SPCL de la classe de terminale STL

Un enseignant propose à ses élèves une activité sur la transmission d'informations par fibre optique, utilisée par exemple pour les télécommunications mondiales qui transitent par des câbles sous-marins, et dont le début est donné ci-dessous (figure 7). L'annexe 5 reproduit l'extrait du programme correspondant.

### 1<sup>ère</sup> partie : la fibre à saut d'indice, quelques rappels

Le schéma ci-dessous rappelle le principe de la propagation d'un faisceau de lumière dans une fibre optique à saut d'indice :



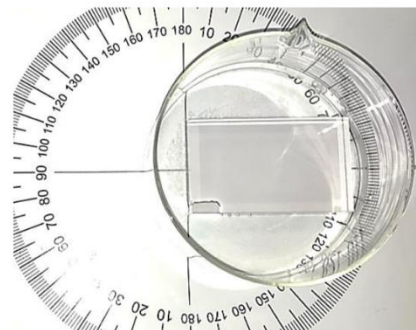
1. Quel phénomène physique garantit que le faisceau de lumière ne sorte pas du cœur de la fibre ?
2. À l'aide de vos connaissances, en déduire une comparaison entre les indices de réfraction respectifs du cœur et de la gaine  $n_{\text{cœur}}$  et  $n_{\text{gaine}}$ .

### 2<sup>ème</sup> partie : mesure de l'ouverture numérique d'un modèle de fibre optique

Dans cette partie on va réaliser une maquette de fibre optique à l'aide d'un objet parallélépipédique en plexiglas et d'un cristalliseur contenant de l'eau.

#### *Expérience : réalisation de la maquette*

- Placer l'objet parallélépipédique en plexiglas dans un cristalliseur à demi rempli d'eau.
- Positionner sous le plexiglas un rapporteur afin que l'axe central du rapporteur soit parfaitement confondu avec le côté du parallélépipède (voir photo ci-dessous).
- Positionner le laser à la même hauteur que le plexiglas, perpendiculairement à sa surface d'entrée (sur la normale).



#### *Question :*

3. Dans notre maquette, quel milieu représente le cœur de la fibre ? Quel milieu représente la gaine ?

FIGURE 7 - Extrait du début de l'activité sur la fibre optique à saut d'indice.

**QP26. Critiquer** l'expérience proposée dans cette activité. **Proposer** un autre dispositif.

### II.3. Cuve à ondes

Une cuve à ondes est un dispositif expérimental, illustré en figure 8, utilisé en cours de sciences physiques pour étudier les ondes mécaniques et leurs propriétés.

Les ondes sont créées à l'aide d'un vibreur rectangulaire, qui agite l'eau de manière périodique à la fréquence  $f$  ( $f$  de l'ordre de quelques dizaines de hertz), permettant d'obtenir des ondes localement planes à la surface libre de l'eau contenue dans la cuve à ondes. Une lampe stroboscopique flashe à la même fréquence  $f$  et éclaire la surface de l'eau avec des rayons lumineux émis considérés comme quasi-parallèles, ce qui permet d'observer une allure « statique » de la situation.

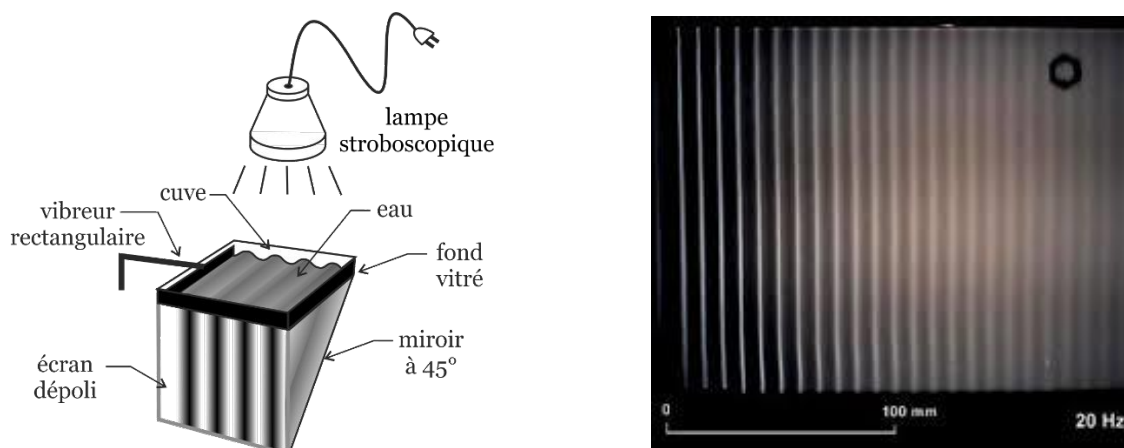


FIGURE 8 - Principe de fonctionnement d'une cuve à ondes avec à gauche le schéma du dispositif et à droite la photographie de l'écran en verre dépoli pour  $f = 20$  Hz.

**QP27. Expliquer** à un élève de première l'origine de la présence de lignes sombres et claires sur l'écran dépoli dans le dispositif de cuve à ondes.

**QP28.** Cet élève veut effectuer une mesure de longueur d'onde à l'aide de ce dispositif. Sur l'écran dépoli, il mesure à la règle l'intervalle séparant cinq lignes claires et vous annonce que la longueur d'onde correspond à la longueur de cet intervalle divisé par quatre. **Corriger** la réponse de l'élève.

Il est possible de simuler dans une cuve à ondes le phénomène de la réfraction vu en optique, en formant deux zones dont le comportement ondulatoire est analogue à celui de deux milieux transparents d'indices différents  $n_1$  et  $n_2$ . Cette situation est possible en faisant varier la hauteur d'eau, donc en plaçant un bloc de plexiglas au fond de la cuve dans la zone choisie. Les deux hauteurs d'eau sont alors différentes,  $h_1$  et  $h_2$ , ce qui permet d'observer, à la traversée des deux zones, la réfraction et la réflexion des ondes incidentes lors du passage de la zone d'indice  $n_1$  à la zone d'indice  $n_2$ .



FIGURE 9 - À gauche, une photo de la cuve à ondes. À droite, une photo de l'écran dépoli dans deux zones de profondeurs différentes<sup>1</sup>.

Dans toutes les questions qui suivent, les ondes se déplacent de la zone d'indice  $n_1$  vers la zone d'indice  $n_2$  et le rapport des indices de réfraction équivalents  $\frac{n_2}{n_1}$  sera pris tel que  $\frac{n_2}{n_1} = 0,73$ .

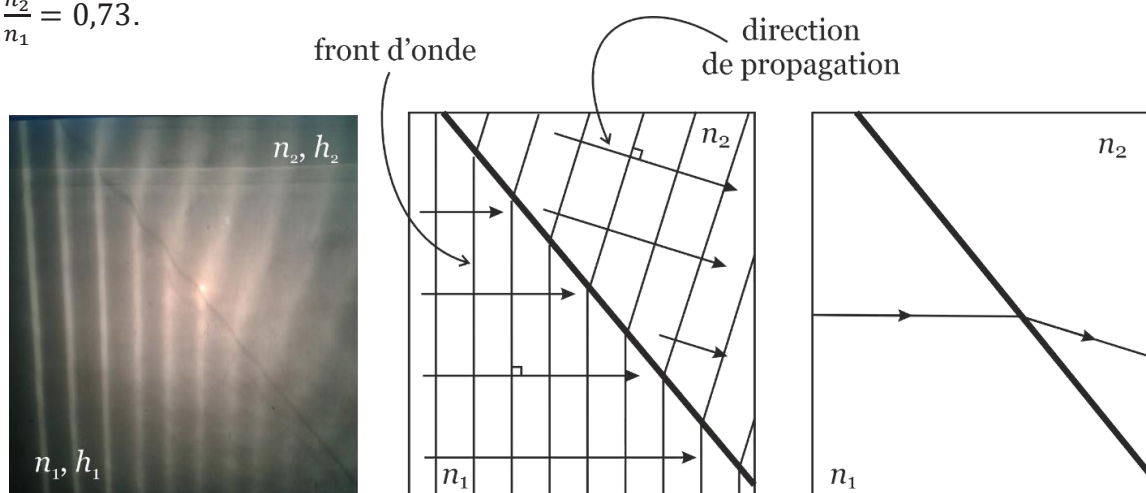


FIGURE 10 - Photo, schéma et analogie optique du phénomène de réfraction observé dans la cuve à ondes.

**Q29. Déterminer**, en utilisant l'analogie optique, la valeur de l'angle d'incidence limite pour lequel le phénomène de réflexion totale de l'onde se produit.

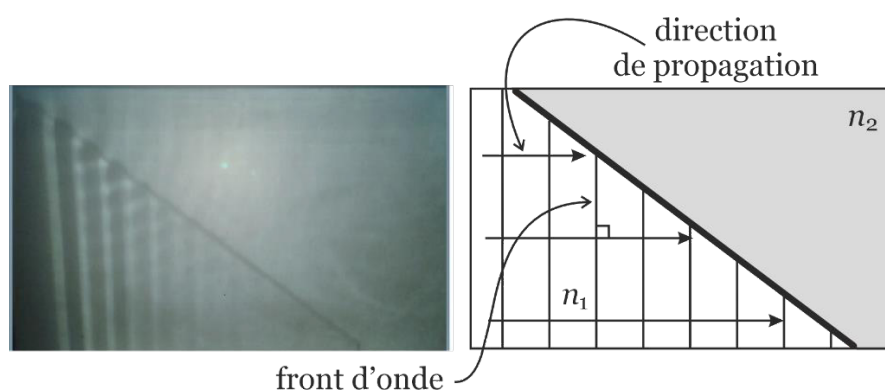


FIGURE 11 – Ondes observées dans le cas d'une incidence de  $50^\circ$ .

<sup>1</sup> SCHULER É. BUP n°1049 (décembre 2022).

**Q30.** Sachant que l'angle d'incidence sur la photographie de la figure 11 est de  $50^\circ$ , **commenter** la situation expérimentale observée au regard de la valeur numérique de l'angle d'incidence limite obtenue à la question précédente.

L'angle d'incidence n'est pas modifié, il est toujours de  $50^\circ$ . La zone d'indice  $n_2$  est désormais réduite à une bandelette d'épaisseur  $e$ , parallèle à l'interface (dioptre) précédente. Au-delà de cette bande, on retrouve la zone d'indice  $n_1$ .

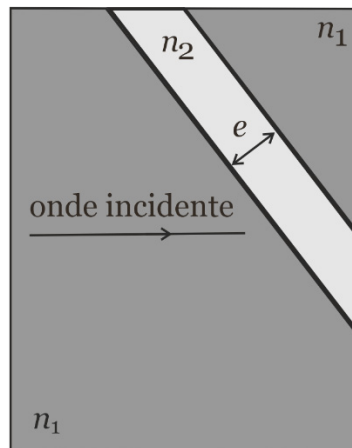


FIGURE 12 - Dessin de la situation avec les trois zones.

Toujours sans changer l'angle d'incidence ( $50^\circ$ ), on observe trois situations où la largeur  $e$  de la zone d'indice  $n_2$  vaut respectivement 0,5 cm, 1,0 cm et 2,5 cm, illustrées par les trois photos suivantes :

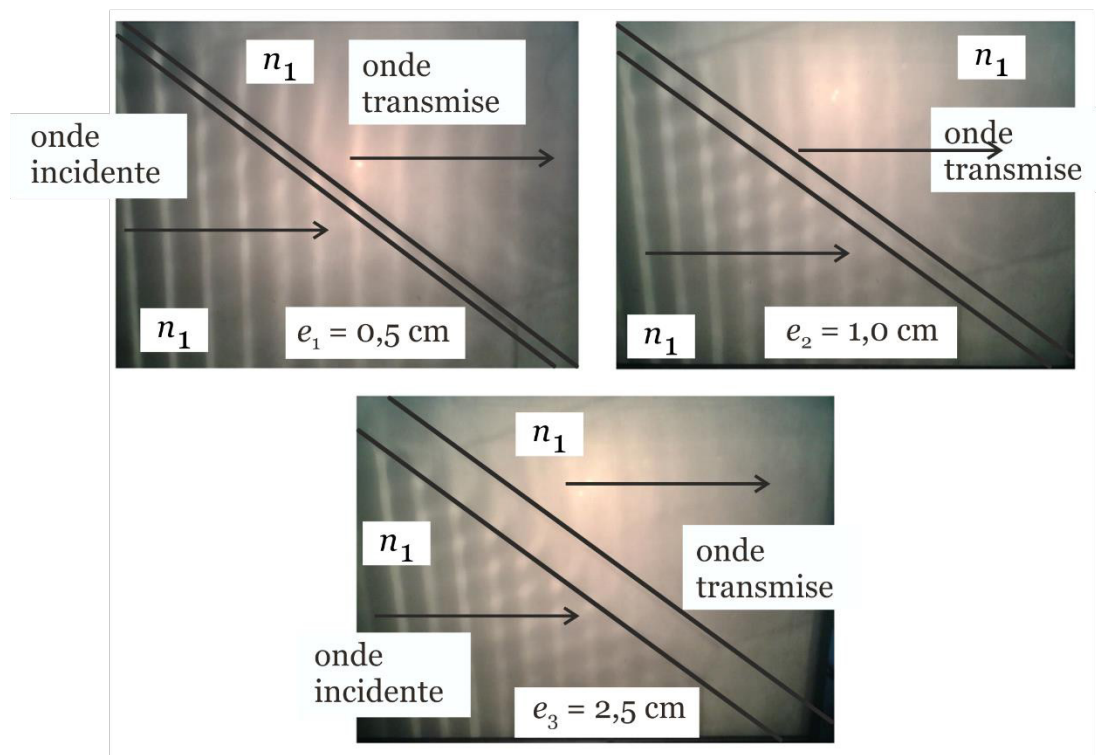


FIGURE 13 - Propagation de l'onde incidente dans la cuve en fonction de la largeur  $e$  de la zone d'indice  $n_2$ .

**Q31. Décrire** en quelques lignes les ondes observées dans les deux zones d'indice  $n_1$  des trois situations étudiées. En particulier, **expliquer** l'influence de l'épaisseur  $e$  sur les phénomènes observés.

**Q32. Indiquer** un phénomène se produisant dans un autre domaine de la physique, à **préciser**, où un comportement analogue peut être observé.

### III. Un exemple de convertisseur d'énergie de la houle : l'absorbeur ponctuel résonant

La houle est un phénomène naturel qui se manifeste par des ondulations à la surface des océans, des mers et des lacs. Elle joue un rôle crucial dans la dynamique des écosystèmes marins et côtiers. Elle est généralement causée par le vent, mais peut également être engendrée par des objets en mouvement dans l'eau. Comme cela sera vu dans la partie IV, la houle véhicule une énergie mécanique notable. En première approche, la houle peut être modélisée par une onde plane sinusoïdale de période  $T_{\text{houle}} = \frac{2\pi}{\omega}$ .

La récupération et la transformation de cette énergie se fait grâce à des convertisseurs d'énergie, de conceptions diverses, développés dans de nombreux projets et études. Dans cette partie, nous nous proposons d'étudier le comportement de l'un d'entre eux, l'absorbeur ponctuel résonant.

Afin d'être efficace, le dispositif de conversion doit interagir avec la houle de manière à absorber l'énergie transportée par les vagues. Le principe des actions réciproques amène à envisager l'absorbeur ponctuel résonnant comme un générateur de vagues : « *pour qu'un système oscillant soit un bon absorbeur de vagues, il doit être un bon générateur de vagues* »<sup>2, 3</sup>.

#### III.1. Action de l'absorbeur ponctuel résonant sur l'eau : approche qualitative

Le modèle de convertisseur étudié dans cette partie, l'absorbeur ponctuel résonant, appelé simplement absorbeur par la suite, est vu comme un générateur qui provoque des ondes à la surface de l'eau. Il agit sur l'eau en combinant un mouvement oscillant vertical et un mouvement oscillant de rotation autour d'un axe parallèle à l'axe (Oy) et passant par son centre géométrique (figure 14).

---

<sup>2</sup> Budar K., Falnes J. A resonant point absorber of ocean-wave power. *Nature* 256, 478–479 (1975).

<sup>3</sup> Falnes J, Kurniawan A. *Ocean Waves and Oscillating Systems: Linear Interactions Including Wave-Energy Extraction*. 2<sup>nd</sup> ed. Cambridge University Press, 204-205 (2020).

On suppose la surface de l'eau parfaitement plane. Dans un premier temps, l'absorbeur descend dans l'eau pendant la durée  $\frac{T_{APR}}{2}$ . Ce déplacement provoque alors une émission symétrique de vagues, de part et d'autre de l'absorbeur, comme représenté sur la figure 14.

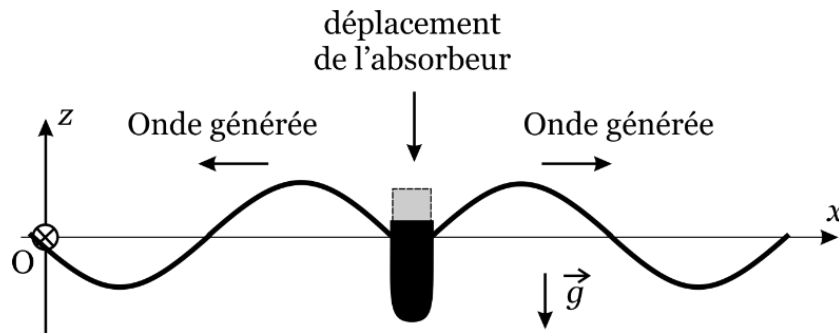


FIGURE 14 – Ondes créées par le mouvement vertical de l'absorbeur.

L'absorbeur effectue en même temps un mouvement de rotation pendant la même durée  $\frac{T_{APR}}{2}$  qui crée une émission de vagues en opposition de phase comme indiqué sur la figure 15.

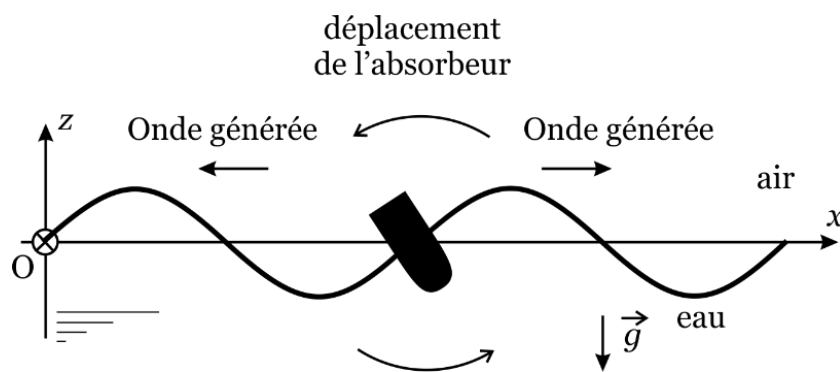


FIGURE 15 – Ondes créées par le mouvement de rotation de l'absorbeur.

La combinaison simultanée de ces deux mouvements de l'absorbeur provoque alors les ondes de l'eau représentées sur la figure 16, telles que la surface libre de l'eau est au repos à gauche de l'absorbeur.

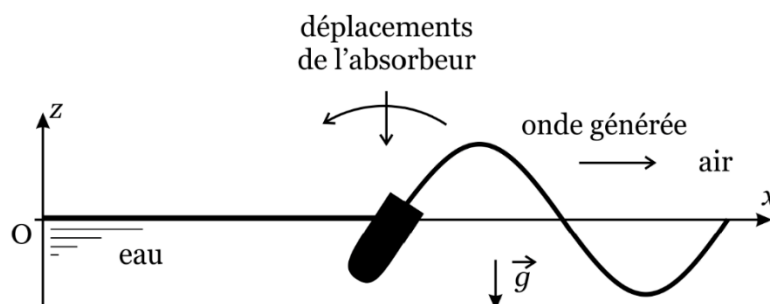


FIGURE 16 – Onde créée par la superposition du mouvement vertical et de la rotation de l'absorbeur.

**Q33. Nommer** le phénomène physique, vu habituellement dans un autre domaine de la physique, responsable du comportement particulier de l'eau entre le point O et l'absorbeur.

On considère maintenant qu'une onde plane incidente sinusoïdale, de même période que celle du mouvement de l'absorbeur, se propage en direction de l'absorbeur, comme représenté sur la figure 17.

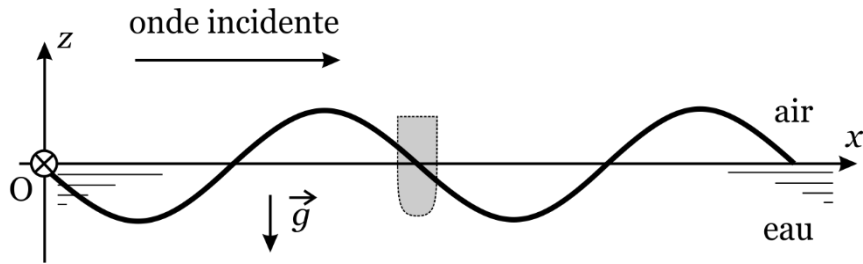


FIGURE 17 – Onde incidente sinusoïdale se propageant vers l'absorbeur selon  $x$  croissant.

L'allure de la surface de l'eau de part et d'autre de l'absorbeur est représentée sur la figure 18. Elle est issue de la superposition des deux ondes, celle produite par les mouvements de l'absorbeur et l'onde incidente sinusoïdale.

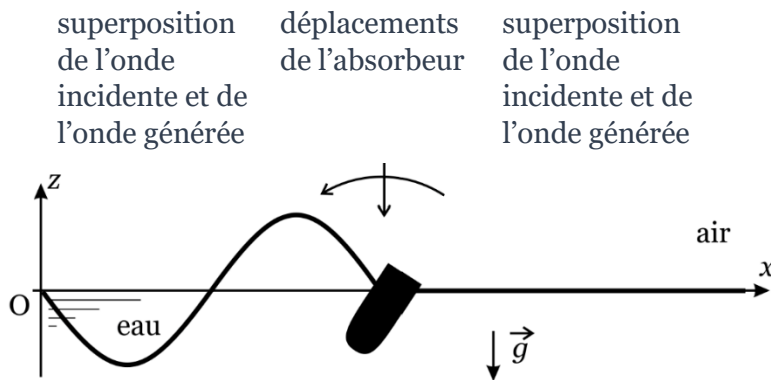


FIGURE 18 – Vagues résultant de la superposition de l'onde incidente sinusoïdale et de l'onde générée par les mouvements de l'absorbeur.

**Q34. Commenter** la situation présentée figure 18. La fréquence des oscillations imposées par l'absorbeur étant fixée, **citer** deux autres grandeurs physiques qu'il faut ajuster pour obtenir le résultat proposé, notamment à droite de l'absorbeur.

Dans une situation idéale comme celle qui a été présentée dans cette partie, l'absorbeur convertit complètement l'énergie mécanique de l'onde incidente. On propose d'étudier, dans la suite, les conditions de cette conversion idéale.

### III.2. Étude de la récupération d'énergie de la houle par l'absorbeur ponctuel résonant lors du mouvement oscillant vertical

Il s'agit maintenant de construire un modèle permettant d'étudier le comportement de l'absorbeur en tant que convertisseur d'énergie.

Le modèle linéaire le plus simple est celui d'un oscillateur dont on peut ajuster les paramètres de sorte à convertir un maximum d'énergie véhiculée par la houle en énergie

mécanique. Par souci de simplification, on ne s'intéressera qu'au mouvement oscillant vertical de l'absorbeur ponctuel résonant.

Le mouvement est étudié dans le référentiel galiléen lié au fond marin.

L'absorbeur est constitué d'un flotteur lesté et d'un dispositif de conversion d'énergie noté « dispositif » sur la figure 19.

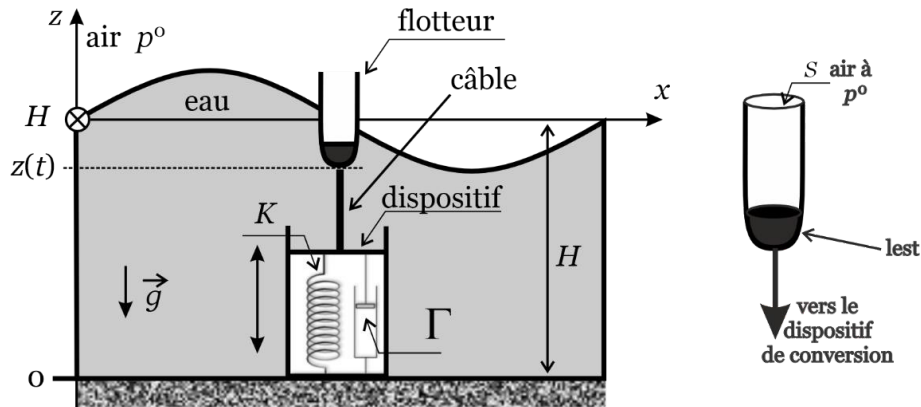


FIGURE 19 – Description du flotteur et du dispositif complet (flotteur et dispositif de conversion d'énergie).

Le flotteur est relié par un câble inextensible au dispositif de conversion d'énergie dont le comportement est modélisé par un ressort de constante de raideur  $K$ . Le ressort est couplé à un autre dispositif dont l'action est proportionnelle (constante  $\Gamma$ ) à la vitesse du câble.

Les actions dues aux frottements de toutes natures sont modélisées par une unique force proportionnelle (constante  $B$ ) à la vitesse du câble.

On admettra pour l'instant que le mouvement du système se traduit par un mouvement de va et vient strictement vertical. Le point d'étude est la position du point d'attache entre le flotteur et le câble, repéré par son ordonnée  $z(t)$  dans le repère  $(xOz)$  et auquel on attribue la masse  $m$  du flotteur lesté. La masse du câble est négligée.

Le flotteur est soumis à l'action excitatrice des vagues, modélisée par une force dont la valeur est notée  $f_d(t)$ .

La masse volumique de la mer est notée  $\rho$  et la section du flotteur est notée  $S$ .

La mise en équation du mouvement de la masse  $m$  dans le référentiel galiléen lié au fond marin et projetée suivant l'axe  $(Oz)$  conduit à l'équation différentielle suivante :

$$m \frac{d^2 z(t)}{dt^2} = \underbrace{\left( f_d(t) - \rho g S z(t) - B \frac{dz(t)}{dt} \right)}_{\text{flotteur, vagues, houle}} + \underbrace{\left( -K z(t) - \Gamma \frac{dz(t)}{dt} \right)}_{\text{dispositif propre de conversion}} + cte$$

convertisseur

La force excitatrice des vagues  $f_d(t)$  est supposée imposer un régime sinusoïdal forcé de pulsation  $\omega$ . L'équation du mouvement de la masse  $m$  est donc celle d'un régime d'oscillations mécaniques forcées. On propose de résoudre cette équation par analogie électrocinétique.

**Q35. Donner** le nom de la grandeur électrocinétique habituellement choisie comme analogue de la vitesse.

Dans le cadre de la modélisation électrocinétique choisie, la source d'énergie générée par les vagues est modélisée par un générateur de tension électrique  $F_d$  associée à une inductance  $L_{app}$  et à une résistance interne  $R_G$ . Le dispositif de conversion d'énergie est vu comme un récepteur composé d'une capacité  $C_{app}$  et d'une résistance  $R_X$ .

Les analogies entre les grandeurs électrocinétiques et les grandeurs mécaniques sont les suivantes :

| Électrocinétique                         | Mécanique                                                                                                        |
|------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $R_G$ : résistance interne du générateur | $B$ : constante de frottement liée à la houle                                                                    |
| $L_{app}$ : inductance de la bobine      | $m$ : masse                                                                                                      |
| $C_{app}$ : capacité du condensateur     | $\frac{1}{K + \rho g S}$ : constante globale des éléments du système qui ont un comportement de rappel élastique |
| $R_X$ : résistance du récepteur          | $\Gamma$ : constante de frottement du dispositif de conversion                                                   |

Du fait de la linéarité de l'équation, toutes les grandeurs physiques du système évoluent de façon sinusoïdale à la pulsation  $\omega$ . Il est donc possible de traiter le problème en notation complexe. La tension excitatrice du générateur s'écrit alors de la façon suivante  $\underline{F_d}(\omega) = F_d e^{j\omega t}$ . Cette tension est prise comme origine des phases, donc le terme  $F_d$  est réel. La maille est parcourue par un courant d'intensité  $\underline{I}(\omega)$ .  $\underline{U_X}(\omega)$  est la tension aux bornes du récepteur, noté « dispositif de conversion » sur la figure 20.

La modélisation électrocinétique se traduit par le schéma suivant :

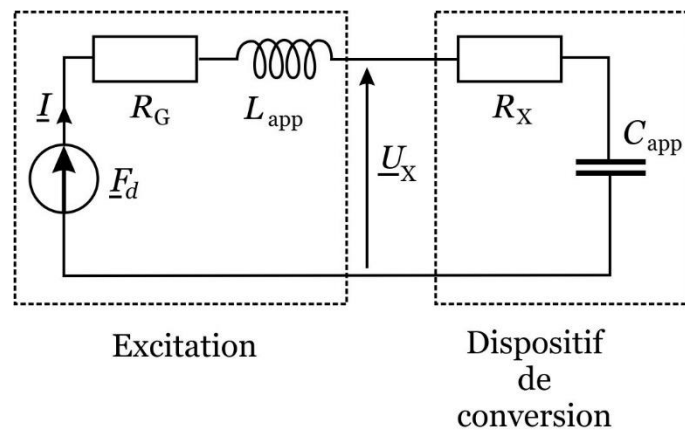


FIGURE 20 – Circuit électrique équivalent au dispositif de conversion d'énergie de la houle par l'absorbeur ponctuel résonant.

**Q36. Donner** l'expression des impédances complexes associées au condensateur  $C_{app}$  et à la bobine  $L_{app}$ .

**Q37. En déduire** l'expression complexe de l'intensité du courant électrique  $\underline{I}(\omega)$  en fonction de  $F_d, R_G, R_X, C_{app}, L_{app}, t$  et  $\omega$ .

**Q38. Déterminer** la tension  $\underline{U_X}(\omega)$  aux bornes du récepteur en fonction de  $F_d, R_G, R_X, C_{app}, L_{app}, t$  et  $\omega$ .

On souhaite chercher quelles sont les conditions requises pour les paramètres de l'absorbeur afin de maximiser l'énergie qu'il reçoit de la houle.

**Q39. Montrer** que l'expression de la puissance moyenne reçue par le dispositif de conversion  $\langle P \rangle$  est :

$$\langle P \rangle = \frac{F_d^2 R_X}{2} \cdot \frac{1}{(R_X + R_G)^2 + (L_{app}\omega - \frac{1}{C_{app}\omega})^2}$$

**Q40. Décrire** qualitativement le comportement de la puissance moyenne  $\langle P \rangle$  en fonction de  $\omega$  et **en déduire** le type de filtre auquel s'apparente le circuit de la figure 20.

**Q41. Déterminer** l'expression littérale de la pulsation  $\omega_{max}$  pour laquelle la puissance moyenne reçue par le dispositif de conversion  $\langle P \rangle$  est maximale. **Indiquer** à quelle grandeur caractéristique du circuit cette pulsation  $\omega_{max}$  correspond.

**Q42.** Lorsque  $\omega = \omega_{max}$ , **déterminer** l'expression de la résistance  $R_X$  qui maximise la puissance transmise au dispositif de conversion.

**Q43.** En se plaçant dans les conditions qui maximisent la puissance transmise au dispositif de conversion trouvées à la question précédente, **établir** l'expression de la puissance moyenne maximale  $\langle P \rangle_{max}$  en fonction de  $F_d$  et de  $R_X$ . **Commenter**.

**Q44.** Sachant que dans ces conditions, le facteur de qualité du circuit est

$Q = \frac{1}{2R_X} \sqrt{\frac{L_{app}}{C_{app}}}$ , **décrire** l'influence de  $R_X$  sur la bande passante du dispositif et **discuter** de l'intérêt de réduire au maximum les frottements de l'absorbeur.

Un enregistrement de la distribution spectrale de l'énergie associée au mouvement des vagues sans convertisseur est proposé à la figure 21.

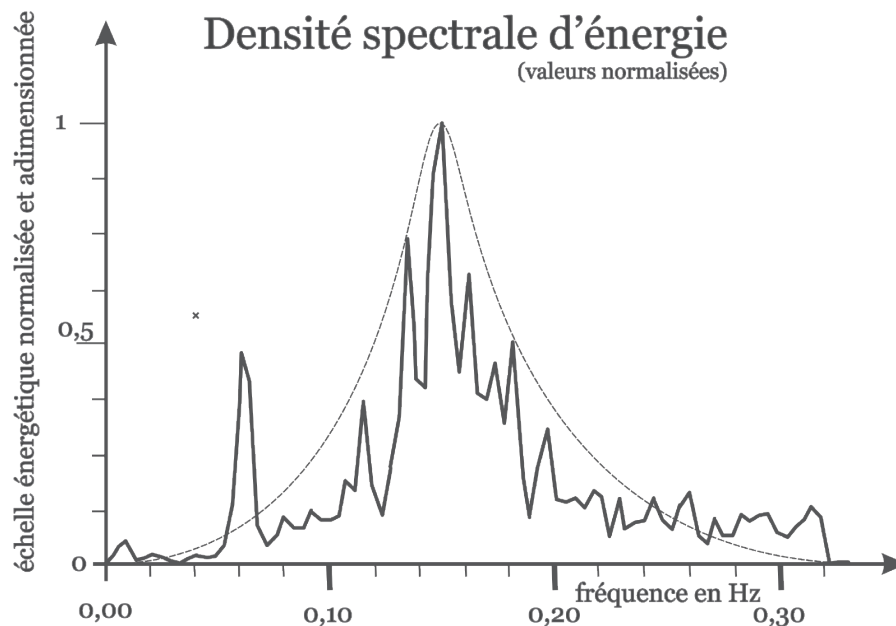


FIGURE 21 - Densité spectrale d'énergie associée au mouvement des vagues.  
D'après [https://cdip.ucsd.edu/m/documents/wave\\_measurement.html#spectral-analysis](https://cdip.ucsd.edu/m/documents/wave_measurement.html#spectral-analysis)

**Q45.** À partir du graphique proposé en figure 21, **donner** une estimation de la valeur numérique de  $\omega_{max}$ .

**Q46.** En s'appuyant sur le graphique de la figure 21, **déterminer** la valeur numérique à donner au facteur de qualité de l'absorbeur  $Q$  pour que la conversion d'énergie soit la plus efficace possible.

## IV. Ondes et vagues : aspects énergétiques

### IV.1. Simulation de la propagation d'une onde périodique en classe de première de la voie générale, spécialité physique-chimie

L'extrait du programme correspondant est fourni en annexe 6.

Afin de modéliser le phénomène de la houle par la propagation d'une onde mécanique sinusoïdale unidimensionnelle, un enseignant se propose d'utiliser un code Python qui permet de simuler la propagation d'une onde en animant au cours du temps sa représentation spatiale. La simulation obtenue est donnée en annexe 7 et la structure du programme Python est décrite dans le paragraphe ci-après.

L'amplitude de l'onde  $A$ , sa période  $T$  ainsi que sa célérité  $v$  étant fixées, une boucle calcule pour chaque valeur du temps (ici 100 instants répartis dans l'intervalle  $0 - 10$  s) la valeur de l'élongation verticale de l'onde, puis fait ensuite appel à la fonction « tracer ». Cette fonction commence par effacer la représentation précédente, puis elle définit un certain nombre d'éléments de la représentation graphique : son titre, le nom de chacun des axes ainsi que leurs limites, affiche la grille puis trace l'onde sinusoïdale. Une courte pause est effectuée. À chaque itération de la boucle, le graphique est effacé puis retracé pour montrer le déplacement de l'onde. Pour travailler sur les notions de périodicité spatiale et temporelle, il est plus aisé pour l'œil d'ajouter un point d'abscisse fixe sur la représentation graphique, ici un point de couleur noire situé à l'abscisse  $x_p = 20$  m.

**QP47. Rédiger** quelques questions à poser aux élèves pour leur permettre de vérifier la relation entre la longueur d'onde, la célérité et la période temporelle de l'onde sur la base de mesures effectuées à l'aide de cette simulation.

**QP48. Donner** un exemple de propriété de l'onde que la simulation permet d'illustrer très simplement.

### IV.2. Étude du mouvement de la houle en eau peu profonde

Les vagues sont souvent perçues comme un simple mouvement ondulatoire de la surface de l'eau. Elles peuvent être décrites comme une somme d'ondes sinusoïdales

élémentaires. Ce modèle, bien que simple en apparence, est intéressant pour comprendre et analyser des situations réelles. Cette partie s'attachera dans un premier temps à mettre en équation la propagation de la houle pour pouvoir, dans un second temps, estimer l'énergie véhiculée par cette dernière.

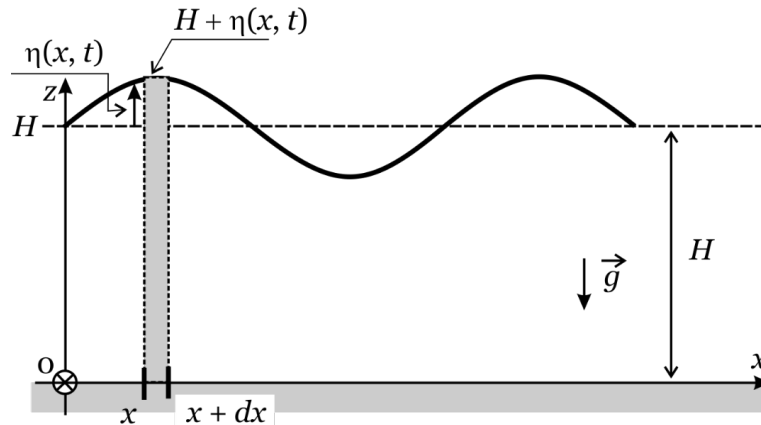


FIGURE 22 - Schéma d'ensemble.

L'eau est assimilée à un fluide incompressible. Sa masse volumique est notée  $\rho$ . L'écoulement est supposé parfait. Le champ de pesanteur est uniforme et noté  $\vec{g} = -g\vec{e}_z$ . L'air impose au-dessus de la surface libre une pression constante et uniforme  $p^0$ .

Toute l'étude se fera dans le référentiel galiléen lié au fond marin. Le fond de l'eau est supposé rigide, immobile et horizontal à la cote  $z = 0$ . Dans la modélisation proposée ici, le système est considéré comme invariant par translation parallèlement à l'axe  $(Oy)$ . Tous les champs sont eulériens et ne dépendent plus que des variables  $x, z, t$ . L'étude est menée dans le plan  $(xOz)$ .

À l'origine des temps, la colonne d'eau est au repos et la surface libre de l'eau est horizontale et située à la cote  $z = H$ . Lorsque celle-ci est en mouvement, la cote de la surface libre de l'eau est notée  $z(x, t) = H + \eta(x, t)$ . L'amplitude du mouvement de la surface libre, notée  $\eta_0$ , la longueur d'onde  $\lambda$  du phénomène étudié et la profondeur  $H$  de l'eau satisfont l'inégalité suivante :  $\eta_0 \ll H \ll \lambda$ . On dit encore que l'étude est faite en eau peu profonde.

L'eau subit une perturbation et, de fait, est mise en mouvement. Il n'y a pas de mouvement permanent d'ensemble du fluide selon l'axe  $(Ox)$ . Dans tout le problème les termes convectifs sont négligés.

On note  $p(x, z, t)$  la pression de l'eau au point  $M(x, z)$  à l'instant  $t$ .

Afin de décrire le comportement de la houle, le champ eulérien des vitesses est de la forme  $\vec{v}(M, t) = v_x(x, z, t)\vec{e}_x + v_z(x, z, t)\vec{e}_z$ . On admettra dans tout le problème que  $|v_x(x, z, t)| \gg |v_z(x, z, t)|$  et que la composante suivant  $(Ox)$  de la vitesse ne dépend pas de  $z$ . On pourra alors écrire :  $\vec{v}(M, t) = v_x(x, t)\vec{e}_x$  dans toute la suite du sujet. Les grandeurs  $v_x(x, t)$  et  $\eta(x, t)$  sont des infiniment petits du même ordre.

**Q49.** En admettant que le champ de pression a la même expression qu'en hydrostatique, et en tenant compte de la pression à la surface libre de l'eau, **établir** l'expression de la pression  $p(x, z, t)$  en fonction de  $p^0, \rho, g, z, H$  et  $\eta(x, t)$ .

**Q50. Rappeler** l'équation d'Euler, puis la **linéariser** pour **établir** la relation scalaire suivante :  $\rho \frac{\partial v_x(x,t)}{\partial t} = - \frac{\partial p(x,z,t)}{\partial x}$ .

**Q51. Établir** alors la relation entre la dérivée temporelle  $\frac{\partial v_x(x,t)}{\partial t}$  de  $v_x(x,t)$ , la dérivée spatiale  $\frac{\partial \eta(x,t)}{\partial x}$  de  $\eta(x,t)$  et  $g$ . Cette relation sera notée « (1) ».

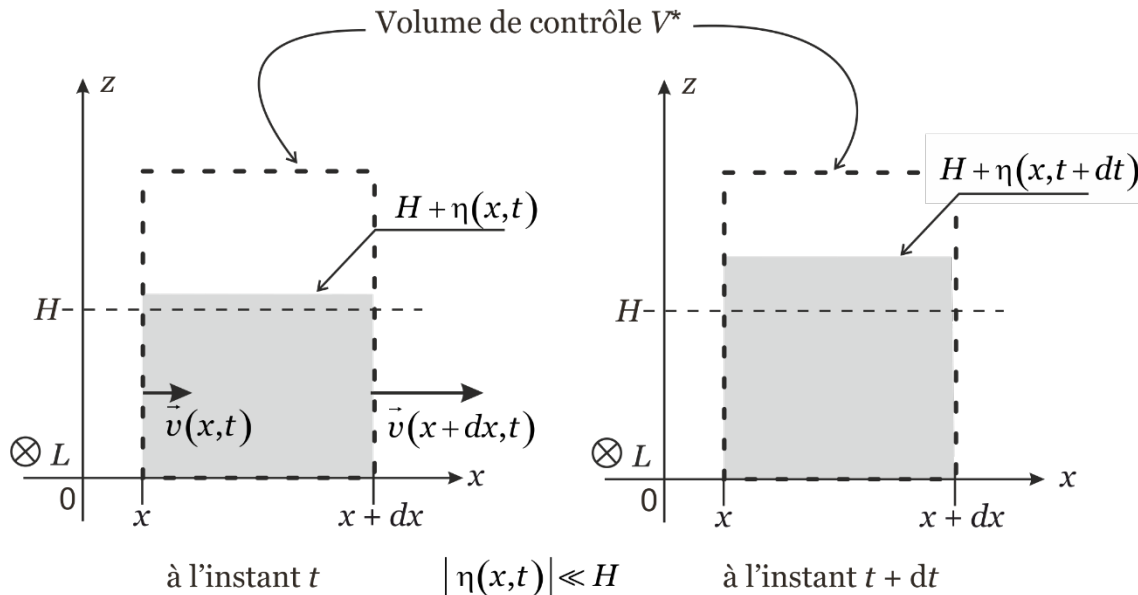


FIGURE 23 - Schéma au niveau mésoscopique du volume de contrôle  $V^*$  de largeur  $L$  selon  $(Oy)$ . L'échelle selon  $(Ox)$  est très dilatée par souci de clarté.

Afin d'établir l'équation de propagation de l'onde de surface, on se propose de faire un bilan de masse sur un volume de contrôle  $V^*$ , fixe et indéformable, situé à l'abscisse  $x$ , de largeur élémentaire  $dx$ , d'épaisseur  $L$  suivant la direction  $(Oy)$  et de hauteur toujours supérieure à  $H + \eta(x,t)$  (figure 23). La situation est représentée à l'instant  $t$  puis à l'instant  $t + dt$  sur la figure 23. Pour mémoire, la grandeur  $\eta(x,t)$  représente l'écart vertical élémentaire, selon  $(Oz)$ , à la position du fluide au repos.

**Q52. Établir** l'expression de la masse d'eau notée  $m(x,t)$  contenue dans le volume  $V^*$  à l'instant  $t$  en fonction des variables  $\rho, L, H, \eta(x,t)$  et  $dx$ . En **déduire** l'expression de sa variation temporelle :  $\frac{\partial(m(x,t))}{\partial t}$ .

**Q53. Établir** l'expression de la masse  $\delta m_e$  qui entre dans le volume de contrôle en  $x$ , entre  $t$  et  $t + dt$ , en fonction de  $\rho, H, v_x(x,t), \eta(x,t), L$  et  $dt$ .

**Q54. Établir** l'expression de la masse  $\delta m_s$  qui sort du volume de contrôle en  $x + dx$ , entre  $t$  et  $t + dt$ , en fonction de  $\rho, H, v_x(x + dx, t), \eta(x + dx, t), L$  et  $dt$ .

**Q55.** À partir des questions **Q52**, **Q53**, **Q54**, et en effectuant, à l'ordre le plus bas, un bilan de masse sur le volume de contrôle entre  $t$  et  $t + dt$ , **établir** l'expression suivante, notée « (2) » :

$$\frac{\partial v_x(x,t)}{\partial x} = - \frac{1}{H} \frac{\partial \eta(x,t)}{\partial t} \quad (2)$$

**Q56.** À partir des relations (1) et (2), **établir** alors l'équation de propagation suivante :

$$\frac{\partial^2 \eta(x, t)}{\partial x^2} = \frac{1}{gH} \frac{\partial^2 \eta(x, t)}{\partial t^2}$$

**Q57. Établir** l'expression de la relation de dispersion en cherchant une solution de l'équation de propagation sous la forme  $\eta(x, t) = \eta_0 \cos(\omega t - kx)$ .

**Q58. Établir** les expressions des vitesses de phase et de groupe, respectivement  $V_\phi$  et  $V_G$  en fonction de  $g$  et de  $H$ . **Déterminer** si le milieu est dispersif ou non.

### IV.3. Aspects énergétiques

On reste dans les conditions précédentes et on s'intéresse au cas particulier où l'évolution spatiale et temporelle de la surface libre de l'eau peut être décrite par une onde plane progressive sinusoïdale  $\eta(x, t) = \eta_0 \cos(\omega t - kx)$  où  $k$  est le vecteur d'onde tel que  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  et  $\lambda$  est la longueur d'onde.

**Q59.** L'expression habituelle de l'énergie potentielle de pesanteur  $E_{pp}$  d'un système quelconque de masse  $m$  est donnée par  $E_{pp} = mgz + cste$  (axe  $(Oz)$  vertical ascendant). **Préciser** à quel point spécifique de ce système la cote  $z$  est associée.

**Q60. Montrer** que l'expression de l'énergie potentielle de pesanteur élémentaire  $dE_{pp}(x, t)$  d'une tranche élémentaire de fluide de hauteur  $H + \eta(x, t)$ , d'épaisseur  $dx$  et de largeur  $L$ , telle que définie à la figure 22, s'écrit :  $dE_{pp}(x, t) = \rho g L \frac{(\eta(x, t))^2}{2} dx$ , avec comme référence  $E_{pp\_ref} = 0$  en l'absence de perturbation, c'est-à-dire lorsque  $\eta(x, t) = 0$ .

**Q61. En déduire** l'expression de la valeur moyenne temporelle de la densité linéique d'énergie potentielle  $\langle e \rangle = \langle \frac{dE_{pp}}{dx} \rangle$  en fonction de  $\eta_0, g, L$  et  $\rho$ .

**Q62.** En se situant toujours en eau peu profonde, **établir** l'expression de l'énergie cinétique élémentaire  $dE_c(x, t)$  de la même tranche de fluide, de hauteur  $H + \eta(x, t)$ , d'épaisseur  $dx$  et de largeur  $L$ , en fonction  $L, \rho, dx, H$  et de la vitesse  $v_x(x, t)$ .

**Q63.** À partir de la relation (1), **exprimer**  $v_x(x, t)$  en fonction de  $x, t, \eta_0, k, \omega$  et  $g$ . **Exprimer** ensuite l'amplitude de  $v_x(x, t)$  uniquement en fonction de  $\eta_0, H$  et  $g$ .

**Q64. En déduire** l'expression de la valeur moyenne temporelle de la densité linéique d'énergie cinétique  $\langle \kappa \rangle = \langle \frac{dE_c}{dx} \rangle$  en fonction de  $\eta_0, g, L$  et  $\rho$ .

**Q65. Exprimer** la propriété qui se dégage des expressions littérales des valeurs moyennes des densités linéiques d'énergie potentielle  $\langle e \rangle$  et d'énergie cinétique  $\langle \kappa \rangle$  obtenues précédemment.

**Q66. En déduire** la densité d'énergie linéique moyenne totale  $\langle w \rangle$  transportée par une tranche élémentaire de fluide, en fonction de  $\eta_0, g, L$  et  $\rho$ .

**Q67.** On note  $\langle \mathcal{P}_L \rangle$  la puissance moyenne par unité de largeur de front  $L$ , suivant  $(Oy)$ , transportée par l'onde. **Établir** l'expression de cette puissance moyenne en fonction de la vitesse de groupe, ici égale à celle de l'énergie, et de la densité d'énergie linéique moyenne  $\langle w \rangle$  établie précédemment. **Montrer** que  $\langle \mathcal{P}_L \rangle$  peut s'écrire :  $\langle \mathcal{P}_L \rangle = \frac{\rho \eta_0^2}{2} \sqrt{H} \sqrt{g^3}$ .

**Q68. Vérifier** l'homogénéité de la relation obtenue à la question précédente, pour la grandeur  $\langle \mathcal{P}_L \rangle$ .

**Q69. Application numérique. Calculer** la valeur de  $\langle \mathcal{P}_L \rangle$  en prenant les valeurs typiques suivantes :

- profondeur de l'eau :  $H = 100 \text{ m}$
- amplitude verticale de la houle :  $\eta_0 = 0,36 \text{ m}$
- masse volumique de l'eau :  $\rho = 1,0 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- accélération de la pesanteur :  $g = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

**Q70.** Sachant qu'un foyer français consomme en moyenne 12 kWh/jour, **calculer** le nombre de foyers qui peuvent être alimentés par un dispositif de largeur  $L = 1,0 \text{ m}$ .

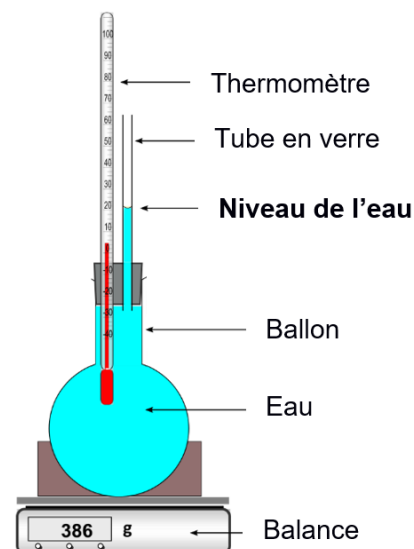
✦  
✦    FIN DES QUESTIONS    ✦  
✦

## Annexe 1

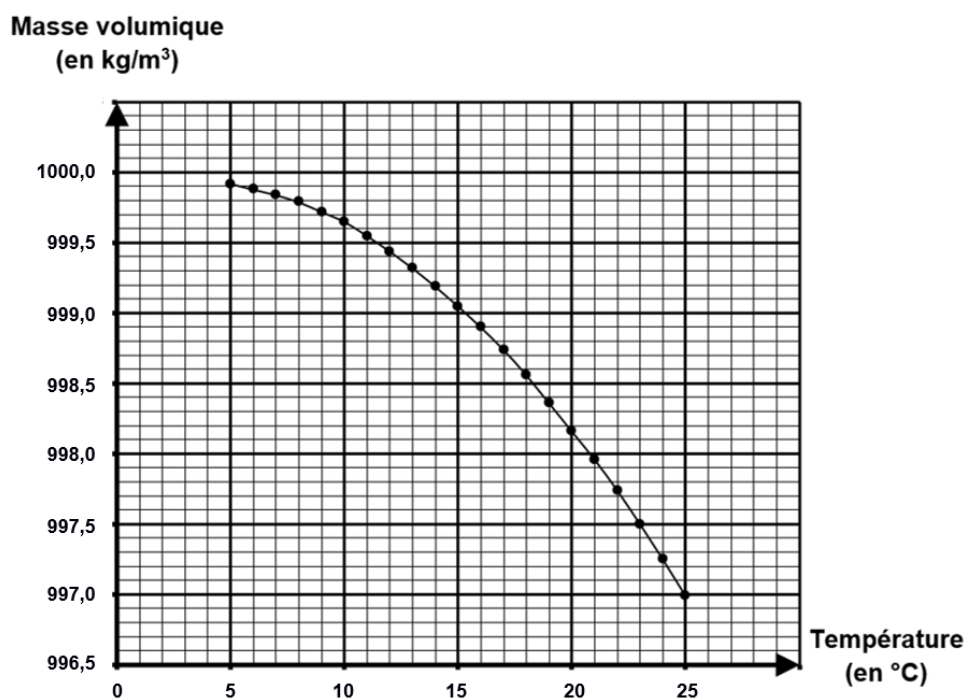
### Mise en évidence expérimentale de la dilatation thermique de l'eau au cycle 4 (Extrait d'un sujet de DNB)

De l'eau, initialement placée dans un réfrigérateur à une température de  $5^{\circ}\text{C}$ , est mise dans un ballon surmonté d'un bouchon, d'un thermomètre et d'un tube en verre. Le niveau de l'eau dans le tube est indiqué sur le schéma ci-contre.

Le dispositif est placé sur une balance pendant plusieurs heures, dans une pièce à la température de  $25^{\circ}\text{C}$ . La masse de l'ensemble reste constante.



### Graphique de l'évolution de la masse volumique de l'eau en fonction de la température



D'après <https://webphysique.fr/masse-volumique-eau/>

À partir du **graphique**, expliquer sans calcul pourquoi le niveau de l'eau dans le tube de l'expérience monte lorsque la température de l'eau augmente. Détailler précisément le raisonnement.

## Annexe 2

### Extrait du programme de physique-chimie de cycle 4

| Connaissances et compétences associées                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Exemples de situations, d'activités et d'outils pour l'élève                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Décrire la constitution et les états de la matière</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| <p>Caractériser les différents états de la matière (solide, liquide et gaz).</p> <p>Proposer et mettre en œuvre un protocole expérimental pour étudier les propriétés des changements d'état.</p> <p>Caractériser les différents changements d'état d'un corps pur.</p> <p>Interpréter les changements d'état au niveau microscopique.</p> <p>Proposer et mettre en œuvre un protocole expérimental pour déterminer une masse volumique d'un liquide ou d'un solide.</p> <p>Exploiter des mesures de masse volumique pour différencier des espèces chimiques.</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Espèce chimique.</li><li>- Corps pur et mélange.</li><li>- Changements d'états de la matière.</li><li>- Conservation de la masse, variation du volume, température de changement d'état.</li><li>- Masse volumique : relation <math>m = \rho \cdot V</math>, influence de la température.</li></ul> | <p>On mettra en œuvre des expériences simples montrant la conservation de la masse (mais non conservation du volume) d'une substance lors d'un changement d'état.</p> <p>Si l'eau est le principal support expérimental – sans en exclure d'autres – pour l'étude des changements d'état, on peut exploiter des données expérimentales pour connaître l'état d'un corps dans un contexte donné et exploiter la température de changement d'état pour identifier des corps purs.</p> <p>L'étude expérimentale des changements d'état est l'occasion de mettre l'accent sur les transferts d'énergie et d'aborder l'impact du réchauffement climatique sur les glaciers et la banquise.</p> <p>L'intérêt de la masse volumique est présenté pour mesurer un volume ou une masse quand on connaît l'autre grandeur mais aussi pour distinguer différents matériaux. La variation de la masse volumique avec la température permet d'aborder une cause de l'élévation du niveau des mers et océans en lien avec le réchauffement climatique.</p> <p>Un travail avec les mathématiques sur les relations de proportionnalité et les grandeurs-quotients peut être proposé.</p> |

## Annexe 3

### Extrait du programme de la spécialité physique-chimie en classe de terminale générale

#### L'énergie : conversions et transferts

| 2. Effectuer des bilans d'énergie sur un système : le premier principe de la thermodynamique                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Notions et contenus                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Capacités exigibles<br><i>Activités expérimentales support de la formation</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Énergie interne d'un système.<br>Aspects microscopiques.<br><br>Premier principe de la thermodynamique. Transfert thermique, travail.<br><br>Capacité thermique d'un système incompressible.<br>Énergie interne d'un système incompressible.<br><br>Modes de transfert thermique.<br>Flux thermique. Résistance thermique. | Citer les différentes contributions microscopiques à l'énergie interne d'un système.<br><br>Prévoir le sens d'un transfert thermique.<br><br>Distinguer, dans un bilan d'énergie, le terme correspondant à la variation de l'énergie du système des termes correspondant à des transferts d'énergie entre le système et l'extérieur.<br><br>Exploiter l'expression de la variation d'énergie interne d'un système incompressible en fonction de sa capacité thermique et de la variation de sa température pour effectuer un bilan énergétique.<br><i>Effectuer l'étude énergétique d'un système thermodynamique.</i><br><br>Caractériser qualitativement les trois modes de transfert thermique : conduction, convection, rayonnement.<br><br>Exploiter la relation entre flux thermique, résistance thermique et écart de température, l'expression de la résistance thermique étant donnée. |

## Annexe 4

### Extrait du programme de la spécialité physique-chimie en classe de terminale générale sur les mesures et incertitudes

| Notions et contenus                                         | Capacités exigibles                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Variabilité de la mesure d'une grandeur physique.</b>    | Exploiter une série de mesures indépendantes d'une grandeur physique : histogramme, moyenne et écart-type. Discuter de l'influence de l'instrument de mesure et du protocole. Évaluer qualitativement la dispersion d'une série de mesures indépendantes.<br><br><b>Capacité numérique</b> : Représenter l'histogramme associé à une série de mesures à l'aide d'un tableur ou d'un langage de programmation. |
| <b>Incertitude-type.</b>                                    | Définir qualitativement une incertitude-type.<br>Procéder à l'évaluation d'une incertitude-type par une approche statistique (évaluation de type A).<br>Procéder à l'évaluation d'une incertitude-type par une autre approche que statistique (évaluation de type B).                                                                                                                                         |
| <b>Incertitudes-types composées.</b>                        | Évaluer, à l'aide d'une formule fournie, l'incertitude-type d'une grandeur s'exprimant en fonction d'autres grandeurs dont les incertitudes-types associées sont connues.<br><br><b>Capacité numérique</b> : Simuler, à l'aide d'un langage de programmation, un processus aléatoire illustrant la détermination de la valeur d'une grandeur avec incertitudes-types composées.                               |
| <b>Écriture du résultat.</b><br><b>Valeur de référence.</b> | Écrire, avec un nombre adapté de chiffres significatifs, le résultat d'une mesure.<br>Comparer, le cas échéant, le résultat d'une mesure $m_{mes}$ à une valeur de référence $m_{ref}$ en utilisant le quotient $\frac{ m_{mes} - m_{ref} }{u(m)}$ où $u(m)$ est l'incertitude-type associée au résultat.                                                                                                     |

## Annexe 5

### Extrait du programme de spécialité SPCL en terminale STL

#### Ondes

| Transmettre l'information                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Notions et contenus                                              | Capacités exigibles                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Fibre optique à saut d'indice.<br>Ouverture numérique.<br>Débit. | <ul style="list-style-type: none"><li>- Expliquer le principe du guidage par une fibre optique.</li><li>- Déterminer l'expression de l'angle de réfraction limite en fonction des indices et en déduire la valeur de l'ouverture numérique de la fibre optique.</li><li>- Expliquer qualitativement l'élargissement temporel d'une impulsion au cours de la propagation et son influence sur le débit maximal.</li><li>- Exploiter la relation entre la distance parcourue et les puissances en entrée et en sortie.</li></ul> <p><b>Capacité expérimentale :</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Mesurer l'ouverture numérique d'une fibre optique.</li></ul> |

## Annexe 6

### Extrait du programme de la spécialité physique-chimie en classe de première générale

#### Ondes et signaux

##### 1. Ondes mécaniques

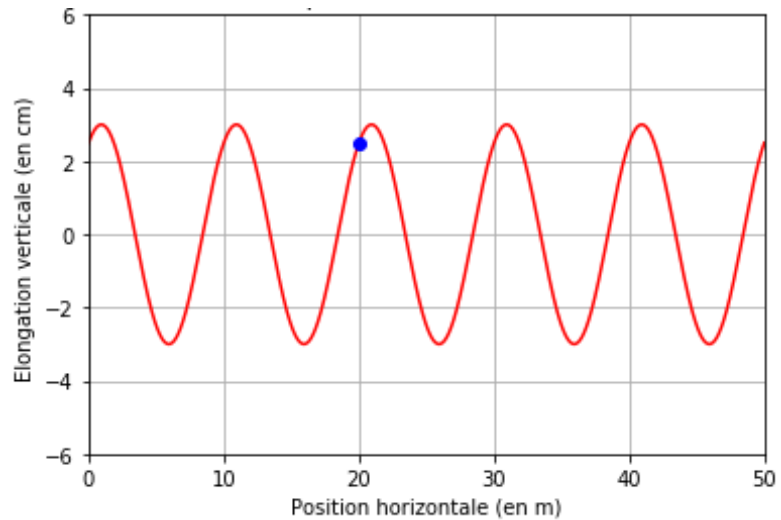
| Notions et contenus                                                                                                                       | Capacités exigibles<br><i>Activités expérimentales support de la formation</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Onde mécanique progressive.<br>Grandeurs physiques associées.                                                                             | Décrire, dans le cas d'une onde mécanique progressive, la propagation d'une perturbation mécanique d'un milieu dans l'espace et au cours du temps : houle, ondes sismiques, ondes sonores, etc.<br><br>Expliquer, à l'aide d'un modèle qualitatif, la propagation d'une perturbation mécanique dans un milieu matériel.<br><br><i>Produire une perturbation et visualiser sa propagation dans des situations variées, par exemple : onde sonore, onde le long d'une corde ou d'un ressort, onde à la surface de l'eau.</i>                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Célérité d'une onde. Retard.                                                                                                              | Exploiter la relation entre la durée de propagation, la distance parcourue par une perturbation et la célérité, notamment pour localiser une source d'onde.<br><br><i>Déterminer, par exemple à l'aide d'un microcontrôleur ou d'un smartphone, une distance ou la célérité d'une onde.</i><br><br><i>Illustrer l'influence du milieu sur la célérité d'une onde.</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Ondes mécaniques périodiques.<br>Ondes sinusoïdales.<br>Période. Longueur d'onde.<br>Relation entre période, longueur d'onde et célérité. | Distinguer périodicité spatiale et périodicité temporelle.<br><br>Justifier et exploiter la relation entre période, longueur d'onde et célérité.<br><br>Déterminer les caractéristiques d'une onde mécanique périodique à partir de représentations spatiales ou temporelles.<br><br><i>Déterminer la période, la longueur d'onde et la célérité d'une onde progressive sinusoïdale à l'aide d'une chaîne de mesure.</i><br><br><b>Capacités numériques</b> : Représenter un signal périodique et illustrer l'influence de ses caractéristiques (période, amplitude) sur sa représentation. Simuler à l'aide d'un langage de programmation, la propagation d'une onde périodique.<br><br><b>Capacité mathématique</b> : Utiliser les représentations graphiques des fonctions sinus et cosinus. |

## Annexe 7

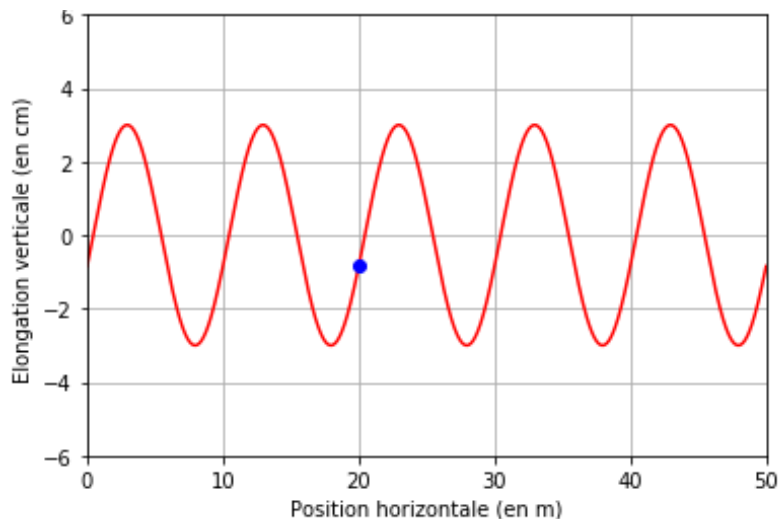
### Simulation de la propagation d'une onde sinusoïdale à l'aide d'un code Python permettant d'animer sa représentation spatiale au cours du temps.

Les trois extraits de la console sont pris à trois instants différents  $t_1$ ,  $t_2$  et  $t_3$ .

Simulation de l'onde à  $t_1$



Simulation de l'onde à  $t_2$



Simulation de l'onde à  $t_3$

