

# Concours blanc

Durée : 4h

## Indications

- Le sujet est divisé en 3 parties **indépendantes** elles-mêmes divisées en sous-parties **quasi-indépendantes**.
  - Les calculatrices **sont interdites**.
  - Les résultats des applications numériques seront données avec **un seul chiffre significatif**.
  - Une absence d'unité non justifiée à la fin d'une application numérique **ne comptera aucun point**.
  - Indiquer clairement le numéro de la question (exemple question 5.1 de la partie B noter "B5.1", question 21 de la partie C noter "C21", etc.), aérer la copie et encadrer vos résultats afin de **faciliter le travail du correcteur**.
  - Attention, **la constante de gravitation universelle** est noté  $G$  et sa valeur est approximée à  $7 \times 10^{-11}$  USI (Unité du Système International).
-

## Autour de la randonnée

### Présentation générale

Le sujet aborde, sous l'angle de la physique et de la chimie, différents thèmes liés à la pratique de la randonnée : l'étude mécanique de la marche à pied, le repas du randonneur et la beauté de la nature.

### Partie I - La marche à pied

#### I.1 - Marcher en montagne

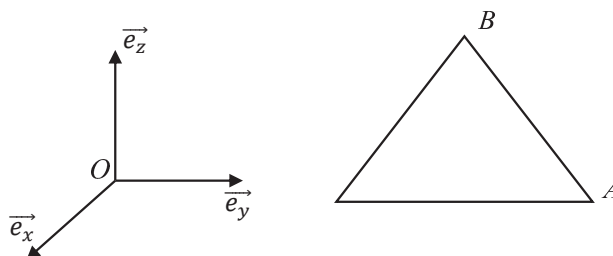
Tout le monde en a fait l'expérience : marcher en montée est plus fatigant que marcher à plat. Le randonneur est un système articulé complexe dont l'étude dépasse le cadre de ce sujet. Nous nous contenterons ici de réfléchir aux différentes contributions énergétiques mises en jeu lorsqu'il se déplace.

On considère un randonneur de masse  $m$ , de centre d'inertie  $I$ , en mouvement dans le référentiel terrestre supposé galiléen muni d'un repère cartésien  $(O, \vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$ .

L'accélération de la pesanteur, notée  $\vec{g} = -g \vec{e}_z$ , est supposée uniforme.

Le randonneur se déplace d'un point  $A$  situé en bas d'une colline à un point  $B$  situé en haut de la colline comme indiqué sur la **figure 1**.

On note  $h$  le dénivelé parcouru par le randonneur  $h = z_B - z_A$  : où  $z_A$  est la coordonnée du point  $A$  selon l'axe  $(O, \vec{e}_z)$  et  $z_B$  celle du point  $B$ .



**Figure 1** - Colline et base cartésienne

Les frottements de l'air sur le randonneur seront négligés.

**Q1.** Lorsqu'il marche, le randonneur est soumis à la réaction  $\vec{R}$  du sol sur ses pieds. La réaction du sol s'applique à chaque instant en un point de vitesse nulle (le point d'appui du pied). On assimile le pied à un point matériel. Que vaut la puissance de la réaction du sol sur le pied ? Justifier.

On cherche la variation d'énergie mécanique du randonneur. Pour cela, on assimile le randonneur à un point matériel placé en  $I$  de coordonnées  $(x_I, y_I, z_I)$ .

**Q2.** Le randonneur est soumis à son poids. Donner sans démonstration l'expression de l'énergie potentielle de pesanteur  $E_p$  du randonneur en fonction de  $m$ ,  $g$ ,  $z_I$  et d'une constante. Cette énergie potentielle est la seule prise en compte dans notre étude.

**Q3.** À l'instant initial, le randonneur est en  $A$  et a une vitesse nulle. Il s'arrête à l'arrivée en  $B$  pour contempler le paysage. Que vaut la variation de son énergie cinétique entre  $A$  et  $B$  ?

Q.1. D'après la définition de la puissance d'une force

$$\mathcal{P}(\vec{R}) = \vec{R} \cdot \vec{v}$$

avec  $\vec{R}$  la force qui s'applique sur le système, ici le randonneur, et  $\vec{v}$  la vitesse du système au niveau du point d'application de la force, le point d'appui du pied. D'après l'énoncé, la vitesse de ce point d'application est nulle

à chaque instant où s'exerce la réaction du support, soit  $\vec{v} = \vec{0}$  donc  $\mathcal{P}(\vec{R}) = 0$ .

Q.2. L'expression de l'énergie de pesanteur du randonneur est

$$E_p = mgz_I + \text{cst.}$$

Q.3. La variation de l'énergie cinétique entre  $A$  et  $B$  est

$$\Delta E_c = E_c(B) - E_c(A) = \frac{1}{2}mv^2(B) - \frac{1}{2}mv^2(A)$$

$$\Delta E_c = 0$$

car le randonneur est à l'arrêt en  $A$  et en  $B$ , soit  $v_A = v_B = 0$ .

- Q4.** Rappeler la définition de l'énergie mécanique. Déterminer la variation d'énergie mécanique  $\Delta E_m$  du randonneur entre  $A$  et  $B$  en fonction de  $m$ ,  $g$  et  $h$ .
- Q5.** Lors d'une randonnée, un individu de 60 kg parcourt une distance de 7 km avec un dénivelé de 1 km. L'accélération de la pesanteur est approximée à  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ . Calculer numériquement la variation de son énergie mécanique.
- Q6.** Calculer à nouveau la variation d'énergie mécanique pour une distance parcourue de 10 km sans dénivelé. Comparer les deux résultats précédents en s'appuyant sur le début de l'introduction de la **sous-partie I.1**.

L'énergie nécessaire à l'ascension du randonneur est apportée par les muscles (assimiler le randonneur à un point matériel n'est ici plus possible : on doit tenir compte des actions intérieures et du travail associé). Lors d'une journée « normale », sans randonnée, un individu consomme  $E_n = 12 \text{ MJ}$  en moyenne (pour maintenir sa température à  $37^\circ\text{C}$ , respirer, bouger, réfléchir ...).

- Q7.** Quel est le pourcentage d'énergie dépensée en plus par l'individu lors de l'ascension décrite à la question **Q5** par rapport à une journée « normale » ? Commenter sachant qu'une randonnée avec un dénivelé de 1 km dure en moyenne trois heures.

Cette énergie lui est apportée par ce qu'il mange : un joule ingurgité est supposé apporter un joule d'énergie pour le métabolisme de l'individu.

- Q8.** Combien de joules le randonneur doit-il ingurgiter le jour de son ascension pour compenser les dépenses totales de son organisme ? On attend une valeur numérique.

## I.2 - Le champ de pesanteur et l'altitude

On souhaite dans cette sous-partie discuter l'hypothèse d'indépendance de l'accélération de la pesanteur avec l'altitude. L'accélération de la pesanteur est due à deux phénomènes : l'attraction gravitationnelle et le mouvement de la Terre autour de l'axe des pôles, dont l'effet est très faible devant celui de l'attraction gravitationnelle.

Ainsi, on assimile l'accélération de la pesanteur  $\vec{g}$  à  $\vec{G}$  le champ d'attraction gravitationnelle créé en un point  $M$  par la planète Terre.

La planète Terre est modélisée par une sphère pleine de centre  $T$ , de masse  $M_T$  et de rayon  $R_T$ . La masse  $M_T$  est supposée uniformément répartie dans la boule terrestre.

On travaille dans le repère sphérique de centre  $O$  :  $(O, \vec{e}_r, \vec{e}_\theta, \vec{e}_\varphi)$  pour repérer le point  $M(r, \theta, \varphi)$ .

### Données 1

Masse de la Terre :  $M_T = 6 \cdot 10^{24} \text{ kg}$

Rayon de la Terre :  $R_T = 6 \cdot 10^3 \text{ km}$

Constante de gravitation universelle :  $G = 7 \cdot 10^{-11} \text{ USI}$  (Unité du Système International)

- Q9.** Démontrer que le champ gravitationnel est porté par le vecteur  $\vec{e}_r$ .

- Q10.** Démontrer que la composante radiale du champ gravitationnel ne dépend que de la variable  $r$ .

Q.4. La définition de l'énergie mécanique est

$$E_m = E_c + E_p.$$

D'après la définition précédente, la variation d'énergie mécanique entre  $A$  et  $B$  est

$$\Delta E_m = \Delta E_p + \Delta E_c = \Delta E_p = mgz_B + \text{cst} - (mgz_A + \text{cst})$$

$$\Delta E_m = mg(z_B - z_A) = mgh$$

car la variation de l'énergie cinétique est nulle, et la seule force conservative qui travaille est la force de pesanteur (donc  $E_p = mgz + \text{cst}$ ).

Q.5. **A.N.**

$$\Delta E_m = 60 \text{ kg} \times 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 1 \times 10^3 \text{ m} = 6 \times 10^5 \text{ J} = 0,6 \text{ MJ}.$$

Q.6. Sans dénivélé, soit  $z = 0$ , **la variation d'énergie mécanique est nulle**. Cela est cohérent avec l'information donnée dans l'énoncé "**marcher en montée est plus fatigant que marcher à plat**" : il faut fournir de l'énergie au système (le randonneur) pour qu'il puisse marcher en montée, soit  $\Delta E_m > 0$ , mais pas lorsqu'il marche à plat, soit  $\Delta E_m = 0$ .

Q.7. Le pourcentage d'énergie dépensée en plus est

$$\frac{E_n + \Delta E_m - E_n}{E_n}$$

**A.N.**

$$\frac{0,6 \text{ MJ}}{12 \text{ MJ}} = 0,5 \times 10^{-1} = 5 \%$$

**Cela paraît peu d'énergie utilisée pour une randonnée de 3 heures.** Le modèle utilisé ne permet pas d'obtenir un résultat cohérent pour cet aspect énergétique.

Q.8. D'après l'énoncé, pour compenser les dépenses totales de son organisme, le randonneur doit ingurgité une énergie

$$E_n + \Delta E_m = 12,6 \text{ MJ} = 1 \times 10^1 \text{ MJ}.$$

Il était difficile ici d'exploiter les informations avec un résultat avec un seul chiffre significatif. Les points sont accordés quelque soit le nombre de chiffre significatif pour cette question.

Q.9. Étudions les symétries de la source du champ gravitationnel, soit la masse  $M_T$  uniformément répartie dans la boule terrestre. Par rapport à un point  $M$  extérieur à la sphère, les plans de symétries sont  $(M, \vec{e}_r, \vec{e}_\theta)$  et  $(M, \vec{e}_r, \vec{e}_\varphi)$ . À l'instar du champ électrique, le champ gravitationnel est contenu dans les plans de symétrie, **il est donc selon le vecteur  $\vec{e}_r$** .

Q.10. Étudions les invariances de la source du champ gravitationnel, soit la masse  $M_T$  uniformément répartie dans la boule terrestre. Il y a invariance par rotations selon les angles  $\theta$  et  $\varphi$ , ainsi **le champ gravitationnel ne dépend que de la variable  $r$** .

On donne le théorème de Gauss gravitationnel

$$\oiint \overrightarrow{G(M)} \cdot d\vec{S} = -4\pi G m \quad (1)$$

où  $G$  est la constante de gravitation universelle et  $m$  la masse contenue à l'intérieur de la surface fermée à travers laquelle on calcule le flux de  $\vec{G}$ .

**Q11.** Donner, en les nommant, les grandeurs analogues à  $\overrightarrow{G(M)}$ ,  $m$  et  $G$  dans le théorème de Gauss de l'électrostatique.

**Q12.** Déterminer avec soin l'unité de  $G$ . On l'exprimera à partir des unités de base du Système International.

**Q13.** En utilisant le théorème de Gauss gravitationnel, déterminer l'expression de  $\overrightarrow{G(M)}$  à l'extérieur de la Terre en fonction de  $M_T$ ,  $G$  et  $r$  et d'un vecteur unitaire.

**Q14.** Montrer que la variation de la norme  $G$  de  $\overrightarrow{G(M)}$  entre un point situé sur la surface de la Terre (altitude nulle) et un point situé à une altitude, notée  $a$ , faible devant  $R_T$  est, à l'ordre 1 en  $\frac{a}{R_T}$  :

$$|\Delta G| = 2 \frac{GM_T a}{R_T^3}. \quad (2)$$

**Q15.** Calculer numériquement  $|\Delta G|$  lors d'une randonnée dont le dénivelé est égal à 1 km. À quelle valeur de  $G$  faut-il le comparer pour savoir si  $|\Delta G|$  est négligeable ? Y a-t-il lieu de tenir compte des variations de la norme de  $\overrightarrow{G(M)}$  lors de l'étude énergétique menée dans la **sous-partie I.1** ?

### I.3 - Marcher à son rythme pour aller loin

Le pas pendulaire effectué à la période propre de la jambe est le plus économe en énergie. La gravité devient l'allié naturel de nos muscles pour permettre le déplacement.

On se propose ici de déterminer la période propre d'oscillations d'une jambe adulte en utilisant un modèle mécanique simple.

Le référentiel d'étude est le référentiel terrestre supposé galiléen, muni d'un repère cartésien  $(O, \vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$ .

On assimile la jambe à un solide rigide de masse  $m_o$  et de longueur  $d$  en rotation autour d'un axe horizontal  $(O, \vec{e}_x)$  fixe dans le référentiel d'étude.  $(O, \vec{e}_x)$  passe par la hanche du randonneur (il est sortant sur la **figure 2**, page 5). La liaison pivot en  $O$  est supposée parfaite. Le moment d'inertie du solide par rapport à l'axe  $(O, \vec{e}_x)$  est noté  $J$ . On néglige tout frottement. On note  $H$  le centre d'inertie de la jambe situé à la distance  $d'$  de  $O$ . La jambe ne touche pas le sol dans cette étude.  $\gamma$  est l'angle entre la verticale passant par  $O$  et la droite  $(OH)$ .

L'accélération de la pesanteur est notée  $\vec{g} = -g \vec{e}_z$  et supposée uniforme.

Q.11. Le théorème de Gauss de l'électrostatique est

$$\oiint E(\vec{M}) dS = \frac{Q}{\epsilon_0}.$$

Par analogie les grandeurs analogues sont

- le champ gravitationnel  $\mathcal{G}(\vec{M})$  et le champ électrostatique  $E(\vec{M})$
- la masse intérieure à la sphère de Gauss  $m$  et la charge intérieure à la sphère de Gauss  $Q$
- la grandeur  $-4\pi G$  et  $\frac{1}{\epsilon_0}$ , soit  $G$  et  $-\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ .

Q.12. D'après l'énoncé, on peut assimiler l'accélération de pesanteur  $\vec{g}$  au champ d'attraction gravitationnel  $\vec{G}$ , ce dernier a donc la même unité :  $m \cdot s^{-2}$ .

D'après le théorème de Gauss gravitationnel, si on remplace les grandeurs par leur unité, il vient que

$$\oiint \mathcal{G}(\vec{M}) \cdot d\vec{S} = -4\pi G m$$

$$m \cdot s^{-2} \times m^2 = [G] \times kg$$

$$[G] = kg^{-1} \cdot m^3 \cdot s^{-2}.$$

Q.13. On choisit une surface de Gauss sphérique de rayon  $r$  supérieur au rayon de la Terre de masse  $M_T$ . On utilise donc l'élément de surface orientée d'intégration colinéaire au champ gravitationnel, soit selon  $\vec{e}_r$ , soit  $d\vec{S} = dS \vec{e}_r = r^2 \sin \theta d\theta d\varphi$ . Comme  $\mathcal{G}(\vec{M})$  ne dépend pas de  $\theta$  ou  $\varphi$ , on peut le faire sortir de l'intégral, ainsi que  $r^2$

$$\mathcal{G}(M) r^2 \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi \sin \theta d\theta = -4\pi G M_T$$

$$\mathcal{G}(M) 4\pi r^2 = -4\pi G M_T$$

$$\mathcal{G}(M) = -\frac{G M_T}{r^2} \quad \text{soit} \quad \mathcal{G}(\vec{M}) = -\frac{G M_T}{r^2} \vec{e}_r.$$

Q.14. D'après la réponse précédente les normes de  $\mathcal{G}$  à la surface de la Terre, soit en  $r = R_T$  et à un point d'altitude  $a$ , soit en  $r = R_T + a$  sont respectivement

$$\mathcal{G}(R_T) = \frac{G M_T}{R_T^2} \quad \text{et} \quad \mathcal{G}(R_T + a) = \frac{G M_T}{(R_T + a)^2}.$$

La variation de la norme est donc

$$|\Delta \mathcal{G}| = |\mathcal{G}(R_T) - \mathcal{G}(R_T + a)| = G M_T \left| \frac{1}{R_T^2} - \frac{1}{(R_T + a)^2} \right| = \frac{G M_T}{R_T^2} \left| 1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{a}{R_T}\right)^2} \right|.$$

Un développement à l'ordre 1 donne

$$|\Delta \mathcal{G}| = \frac{G M_T}{R_T^2} \left| 1 - \left(1 - 2 \frac{a}{R_T}\right) \right|$$

$$|\Delta \mathcal{G}| = \frac{G M_T}{R_T^2} \left| 2 \frac{a}{R_T} \right| = 2 \frac{G M_T a}{R_T^3}.$$

Q.15. **A.N.**

$$|\Delta \mathcal{G}| = 2 \times \frac{7 \times 10^{-11} kg^{-1} \cdot m^3 \cdot s^{-2} \times 6 \times 10^{24} kg \times 1 \times 10^3 m}{(6 \times 10^6 m)^3} = \frac{84}{216} \times \frac{10^{16} m^4 \cdot s^{-2}}{10^{18} m^3}$$

$$|\Delta \mathcal{G}| \simeq \frac{8}{20} \times 10^{-2} m \cdot s^{-2} = 4 \times 10^{-3} m \cdot s^{-2}.$$

Afin de savoir si  $|\Delta\mathcal{G}|$  est négligeable, on compare la valeur de  $\mathcal{G}$  au niveau de la surface soit  $\mathcal{G} = g = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ . On voit que

$$\frac{|\Delta\mathcal{G}|}{g} = 4 \times 10^{-4} \ll 1$$

**il n'y a pas lieu de tenir compte des variations de la norme de  $\mathcal{G}(\vec{M})$ .**



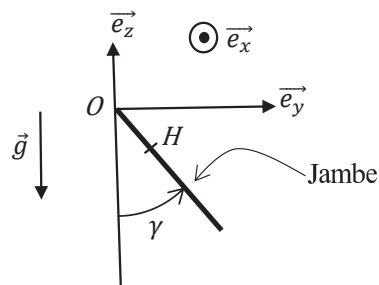


Figure 2 - Jambe et repère cartésien

**Q16.** Donner sans démonstration l'expression du moment cinétique scalaire,  $L_{Ox}$ , de la jambe par rapport à l'axe  $(O, \vec{e}_x)$  en fonction de  $\gamma$  et  $J$ .

**Q17.** Que vaut le moment par rapport à  $(O, \vec{e}_x)$  de l'action mécanique de la liaison en  $O$  ? Justifier.

**Q18.** Déterminer l'expression du moment  $\Gamma_{Ox}$  du poids de la jambe par rapport à  $(O, \vec{e}_x)$  en fonction de  $g$ ,  $m_o$ ,  $d'$  et  $\gamma$ .

**Q19.** Établir l'équation différentielle vérifiée par  $\gamma$ , caractérisant le mouvement de la jambe.

On souhaite retrouver cette équation à l'aide d'une méthode énergétique.

**Q20.** Donner sans démonstration l'expression de l'énergie cinétique de la jambe.

L'énergie potentielle de pesanteur de la jambe s'écrit :

$$E_p = -m_o g d' \cos(\gamma) + \text{constante.} \quad (3)$$

**Q21.** Justifier que l'énergie mécanique de la jambe se conserve au cours du temps.

**Q22.** En déduire l'équation différentielle d'ordre 2 vérifiée par  $\gamma$  caractérisant le mouvement de la jambe.

**Q23.** En se plaçant dans l'approximation des petites oscillations, montrer que la période propre  $T$  d'oscillations de la jambe est :

$$T = \frac{2\pi\sqrt{J}}{\sqrt{m_o g d'}}. \quad (4)$$

**Q24.** Le moment d'inertie est de la forme :  $J = k m_o d'^2$  où  $k$  est une constante positive. Le centre d'inertie  $H$  de la jambe est situé à mi-hauteur de la jambe. En déduire que la période propre  $T$  de la jambe est indépendante de la masse et qu'elle est proportionnelle à la racine carrée de la longueur de la jambe.

**Q25.** Un randonneur adulte a une jambe d'environ 90 cm. La période propre d'oscillations de sa jambe est de 1,6 s. Quelle est la période propre d'oscillations de la jambe d'un randonneur enfant dont la jambe mesure environ 40 cm ?

**Q26.** À l'aide d'une description simple du pas effectué, montrer que la vitesse du randonneur, lorsqu'il respecte sa période d'oscillations naturelle, est proportionnelle à la racine carrée de la longueur de sa jambe. Montrer alors que la vitesse « naturelle » de l'enfant est environ 1,5 fois moins grande que celle de l'adulte.

Q.16. Le moment cinétique scalaire  $L_{Ox}$  de la jambe par rapport à l'axe  $(O, \vec{e}_x)$  est

$$L_{Ox} = J \frac{d\gamma}{dt}.$$

On peut trouver ce résultat par analogie entre le moment cinétique et la quantité de mouvement  $p = mv$  :  $p$  est l'analogue de  $L_{Ox}$ , la masse inerte  $m$  est l'analogue du moment d'inertie  $J$ , et la vitesse  $v$  est l'analogue de la vitesse angulaire  $\frac{d\gamma}{dt}$ .

Q.17. La liaison pivot en  $O$  étant parfaite, **son action mécanique est nulle.**

Q.18. Le moment du poids de la jambe par rapport au point  $O$  est

$$\vec{\Gamma}_O = \vec{OH} \wedge \vec{P}$$

avec  $H$  le point d'application du poids  $\vec{P}$ . Ainsi

$$\vec{\Gamma}_O = (OH \sin \gamma \vec{e}_y - OH \cos \gamma \vec{e}_z) \wedge (-m_o g) \vec{e}_z = -OH \sin \gamma m_o g \vec{e}_x = -d' m_o g \sin \gamma \vec{e}_x.$$

Le moment du poids de la jambe par rapport à l'axe  $(O, \vec{e}_x)$  est donc

$$\Gamma_{Ox} = \vec{\Gamma}_O \cdot \vec{e}_x = -d' m_o g \sin \gamma.$$

Q.19. D'après le théorème du moment cinétique, il vient que

$$\frac{dL_{Ox}}{dt} = \sum_i \Gamma_{i,Ox} \quad ; \quad J \frac{d^2\gamma}{dt^2} = \Gamma_{Ox} \quad ; \quad J \frac{d^2\gamma}{dt^2} = -d' m_o g \sin \gamma$$

$$\frac{d^2\gamma}{dt^2} = -\frac{d' m_o g}{J} \sin \gamma$$

car le seul moment de force qui s'applique sur la jambe est le moment du poids.

Q.20. L'énergie cinétique de la jambe est

$$E_c = \frac{1}{2} J \left( \frac{d\gamma}{dt} \right)^2.$$

On peut retrouver cette expression par analogie avec l'énergie cinétique d'une translation  $E_c = \frac{1}{2} mv^2$  : la masse inerte  $m$  est l'analogue du moment d'inertie  $J$ , et la vitesse  $v$  est l'analogue de la vitesse angulaire  $\frac{d\gamma}{dt}$ .

Q.21. On a négligé tous les frottements donc **l'énergie mécanique se conserve.**

Q.22. D'après la définition de l'énergie mécanique

$$\begin{aligned} E_m &= E_c + E_p = \frac{1}{2} J \left( \frac{d\gamma}{dt} \right)^2 - m_o g d' \cos \gamma + \text{cst} \\ \text{donc} \quad \frac{dE_m}{dt} &= \frac{1}{2} J \frac{d}{dt} \left( \left( \frac{d\gamma}{dt} \right)^2 \right) - m_o g d' \frac{d}{dt} (\cos \gamma) \\ 0 &= J \frac{d\gamma}{dt} \frac{d^2\gamma}{dt^2} + m_o g d' \sin \gamma \frac{d\gamma}{dt}. \end{aligned}$$

On peut diviser par  $\frac{d\gamma}{dt}$  car on ne considère pas la solution triviale  $\frac{d\gamma}{dt} = 0$ , ainsi

$$0 = J \frac{d^2\gamma}{dt^2} + m_o g d' \sin \gamma$$

$$\frac{d^2\gamma}{dt^2} = -\frac{d' m_o g}{J} \sin \gamma.$$

Q.23. Dans l'approximation des petites oscillations,  $\sin \gamma \simeq \gamma$ . On peut alors linéariser l'équation différentielle précédente

$$\frac{d^2\gamma}{dt^2} \simeq -\frac{d'm_og}{J}\gamma.$$

On reconnaît l'équation canonique d'un oscillateur harmonique de pulsation propre

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{d'm_og}{J}}.$$

On peut alors exprimer la période propre d'oscillations de la jambe

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = \frac{2\pi\sqrt{J}}{\sqrt{m_ogd'}}.$$

Q.24. En remplaçant  $J$  par son expression dans la relation précédente, il vient que

$$T = \frac{2\pi\sqrt{km_od^2}}{\sqrt{m_ogd'}} = \frac{2\pi d\sqrt{2kd^2}}{\sqrt{gd}}$$

$$T = \frac{2\pi\sqrt{2kd}}{\sqrt{g}}.$$

avec  $d'$ , la distance du centre d'inertie de la jambe  $H$  par rapport à  $O$ , égale à la moitié de la longueur de la jambe  $d$  :  $d' = d/2$ . On constate que **la période  $T$  est bien indépendante de la masse  $m_o$  et promotionnelle à la longueur de la jambe  $d$ .**

Q.25. Si on fait le rapport entre les deux périodes propres, il vient que

$$\frac{T_{\text{enfant}}}{T_{\text{adulte}}} = \frac{2\pi\sqrt{2kd_{\text{enfant}}}}{\sqrt{g}} \times \frac{\sqrt{g}}{2\pi\sqrt{2kd_{\text{adulte}}}} = \sqrt{\frac{d_{\text{enfant}}}{d_{\text{adulte}}}}$$

$$T_{\text{enfant}} = T_{\text{adulte}} \sqrt{\frac{d_{\text{enfant}}}{d_{\text{adulte}}}}.$$

**A.N.**

$$T_{\text{enfant}} = 1,6 \text{ s} \times \sqrt{\frac{40 \text{ cm}}{90 \text{ cm}}} = 1,6 \text{ s} \times \sqrt{\frac{4}{9}} \simeq 1,5 \text{ s} \times \frac{2}{3} = 1 \text{ s}.$$

Q.26. Lorsque le randonneur fait un pas, sa jambe effectue une demie oscillation (une oscillation étant un aller retour de la jambe). La vitesse du randonneur est donc égale à la vitesse angulaire divisée par deux  $\omega_0/2$  multipliée par la longueur de la jambe  $d$ , soit

$$v = \omega_0 d = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{d'm_og}{J}} d = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{dm_og}{2km_od^2}} d = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{d^2g}{2kd}}$$

$$v = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{dg}{2kd}}.$$

Si on compare les vitesses d'un enfant et d'un adulte

$$\frac{v_{\text{adulte}}}{v_{\text{enfant}}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{d_{\text{adulte}}g}{2k}} \times 2 \sqrt{\frac{2k}{d_{\text{enfant}}g}}$$

$$\frac{v_{\text{adulte}}}{v_{\text{enfant}}} = \sqrt{\frac{d_{\text{adulte}}}{d_{\text{enfant}}}}.$$

**A.N.**

$$\frac{v_{\text{adulte}}}{v_{\text{enfant}}} = \sqrt{\frac{90 \text{ cm}}{40 \text{ cm}}} = \frac{3}{2} = 1,5.$$

On constate bien que la vitesse “naturelle” de l’enfant est bien environ 1,5 fois moins grande que celle de l’adulte.

## Partie II - Le repas en altitude

Pour préparer un repas chaud une fois arrivé au sommet de la colline, notre randonneur utilise un réchaud à combustible solide pour chauffer de l'eau qu'il aura préalablement purifiée à l'aide d'agents chimiques.

### Document 1 - Set de cuisson (extrait du site marchand « monrechaud.com »)

Le set de cuisson Esbit® (popote/réchaud en aluminium anodisé dur, idéal pour les sorties en solo) comprend une casserole d'une capacité de 585 mL, un couvercle et un support de réchaud à combustible solide.

Le support de casserole permet de déposer une tablette de combustible solide Esbit® et fait office de pare-vent. Lors du transport, il se range à l'intérieur de la casserole.



L'ensemble est extrêmement léger et compact. Le set de cuisson Esbit® est livré avec un filet de rangement.

**Document 2 - Tablettes de combustible solide (d'après le site marchand « monrechaud.com »)**

Vingt tablettes de 4 g de combustible solide permettent de recharger les réchauds pliants Esbit®. Elles peuvent être également utilisées pour allumer un feu de camp, un barbecue ou une cheminée. Deux tablettes de 4 grammes permettent de faire bouillir 0,25 litre d'eau en 5 minutes. Une tablette de 4 g brûle approximativement en 5 minutes.

Matériaux : substances non toxiques dont l'hexamine.

Informations complémentaires :

- Non explosif
- S'allume avec une allumette ou un briquet
- Pas d'étincelles
- Puissance de chauffe forte
- Pouvoir calorifique de l'hexamine :  $7 \cdot 10^3 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1} = 31 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
- Ne laisse pas de cendres après la combustion
- Aucune fumée visible
- Léger et compact
- Lorsqu'il est bien entreposé, le combustible solide Esbit® conserve ses caractéristiques techniques pendant de nombreuses années
- Fonctionne également à des températures inférieures à 0 °C et à haute altitude.

**Données 2**

Capacité thermique massique de l'eau liquide à pression constante :  $c_{eau} = 4,2 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$

Masse volumique de l'eau liquide :  $\mu_{eau} = 1,0 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$

Enthalpie massique de vaporisation de l'eau sous 1 bar :  $\ell_v = 2,3 \cdot 10^3 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

Constante des gaz parfaits :  $R = 8,3 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$

**Données spécifiques à l'hexamine**

Aspect : poudre blanche

Formule brute :  $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4$

Masse molaire :  $M_h = 140 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$

Masse volumique supposée indépendante de la température :  $\mu_h = 1,33 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$

Les produits de combustion de l'hexamine dans l'air varient selon les conditions : diazote  $\text{N}_2$ , eau  $\text{H}_2\text{O}$  et dioxyde de carbone  $\text{CO}_2$  dans les conditions optimales.

**Enthalpies standard de formation à 25 °C**

Espèce	$\text{H}_2\text{O}(\text{gaz})$	$\text{CO}_2(\text{gaz})$	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4(\text{solide})$
$\Delta_f H^\circ \text{ en } \text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	$- 2,5 \cdot 10^2$	$- 4,0 \cdot 10^2$	$1,23 \cdot 10^2$

## II.1 - La combustion des tablettes d'hexamine solide

Le but de cette sous-partie est de vérifier le pouvoir calorifique annoncé par le fournisseur.

**Q27.** La réaction de combustion dans l'air s'écrit



où  $a$ ,  $b$ ,  $c$  et  $d$  sont des coefficients stœchiométriques.

Déterminer  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ .

**Q28.** Que valent les enthalpies standard de formation du diazote gazeux et du dioxygène gazeux à 25 °C ? Justifier.

**Q29.** Déterminer numériquement l'enthalpie standard de réaction  $\Delta_r H^\circ$  de la réaction (5) à 25 °C. On suppose cette grandeur indépendante de la température.

Pourquoi la valeur trouvée est-elle cohérente avec le fait que la réaction est une combustion ?

Le pouvoir calorifique est le transfert thermique libéré lors de la combustion complète d'un kilogramme de combustible sous une pression de 1 bar et à une température de 25 °C.

**Q30.** Démontrer avec soin que le pouvoir calorifique de l'hexamine est :  $PC = - \frac{\Delta_r H^\circ}{M_h}$ . On précisera entre autres les conditions d'application des lois utilisées.

**Q31.** Calculer numériquement  $PC$ . La donnée fournisseur est-elle juste ?

**Q32.** Lorsque l'on monte en altitude, la pression diminue. On suppose que la réaction (5) reste un équilibre. Quel est l'effet de cette diminution de pression à température constante sur l'équilibre ? Le réchaud restera-t-il performant en altitude ?

On s'interroge maintenant sur l'affirmation lue sur le site du fournisseur : « Deux tablettes de 4 grammes permettent de faire bouillir 0,25 litre d'eau en 5 minutes ».

**Q33.** Quelle est la valeur numérique de l'énergie délivrée lors de la combustion des deux tablettes de combustible sous 1 bar et à 25 °C ? On utilisera le pouvoir calorifique fourni dans le **document 2**, page 7.

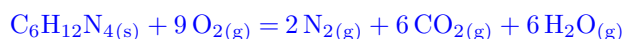
**Q34.** On considère le système thermodynamique fermé constitué par un volume  $V = 0,25$  L d'eau liquide. On le chauffe de manière monobare (pression extérieure constante égale à 1 bar) depuis une température de  $T_1 = 20$  °C jusqu'à une température  $T_2 = 100$  °C (température d'ébullition sous 1 bar). Déterminer, en justifiant soigneusement, l'expression littérale du transfert thermique reçu par l'eau lors de ce chauffage. Faire l'application numérique.

**Q35.** En conséquence, quel est le rendement espéré par le fournisseur lorsqu'il affirme « deux tablettes de 4 grammes permettent de faire bouillir 0,25 litre d'eau » ?

Une fois l'eau portée à ébullition, il faut encore apporter de l'énergie au système contenu dans la casserole pour maintenir l'ébullition.

**Q36.** Déterminer, en justifiant soigneusement, l'expression littérale du transfert thermique reçu par l'eau lors de la vaporisation monobare d'un volume  $V' = 0,05$  L d'eau liquide déjà portée à 100 °C. Faire l'application numérique. Commenter.

Q.27. On équilibre la réaction fournie



donc  $a = 9$ ,  $b = 2$ ,  $c = 6$  et  $d = 6$ .

Q.28. Le diazote gazeux et le dioxygène gazeux sont les états standards de référence de l'azote et de l'oxygène, **leur enthalpie standard de formation est donc nulle.**

Q.29. D'après la loi de Hess

$$\Delta_r H^\circ = \sum_i \nu_i \Delta_{f,i} H^\circ = 6 \Delta_f H^\circ (\text{H}_2\text{O}_{(g)}) + 6 \Delta_f H^\circ (\text{CO}_{2(g)}) - \Delta_f H^\circ (\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_{4(s)})$$

$$\text{A.N. } \Delta_r H^\circ = (-6 \times 2,5 \times 10^2 - 6 \times 4,0 \times 10^2 - -1,23 \times 10^2) \times \text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1} = -40 \times 10^2 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$\Delta_r H^\circ = -4 \times 10^3 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

On constate que l'enthalpie standard de réaction est négative, le système chimique "perd de la chaleur" : **la réaction est exothermique**, ce qui est cohérent avec une réaction de combustion.

Q.30. Le système est l'hexamine  $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_{4(s)}$ . Comme on a affaire à une réaction monobare, le premier principe enthalpique donne

$$\Delta H = Q$$

avec  $Q$  le transfert thermique reçu par l'hexamine. On peut également écrire qu'à  $T = 25^\circ\text{C}$  et que dans les conditions standards, soit à  $P = P^\circ = 1 \text{ bar}$ , il vient que

$$\Delta H = n \Delta_r H^\circ = Q.$$

On s'intéresse à l'enthalpie massique  $\Delta h = \Delta H/m$  et au transfert thermique massique  $q = Q/m$  avec  $m$  la masse d'hexamine. La relation précédente devient

$$\frac{\Delta_r H^\circ}{\frac{m}{n}} = q \quad \text{soit} \quad \frac{\Delta_r H^\circ}{M_h} = q$$

avec  $M_h = m/n$  la masse molaire d'hexamine.

On recherche le transfert thermique massique fourni par l'hexamine à l'extérieur soit  $PC = -q$ , ainsi il vient bien que

$$PC = -\frac{\Delta_r H^\circ}{M_h}.$$

Q.31.

$$\text{A.N. } PC = \frac{4 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}}{140 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}} = \frac{400}{140} \times 10^7 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \simeq \frac{1}{2} \frac{42}{7} \times 10^7 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} = 3 \times 10^7 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

Le résultat est cohérent avec la donnée fournisseur de  $31 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1} \simeq 3 \times 10^7 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

Q.32. Si la pression diminue, les quantités de produits diminuent plus que ceux des réactifs (il y a plus d'espèces gazeuses parmi les produits). Or, d'après le principe de modération de Le Châtelier, le système s'oppose aux variations qu'on lui impose pour rétablir l'équilibre, donc **l'équilibre est déplacé vers les produits pour contrer leur diminution**. La réaction de combustion est donc favorisée, **le réchaud reste donc performant**.



- Q.33. D'après le document 2, le pouvoir calorifique de l'hexamine est  $PC = 31 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} = 3 \times 10^7 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Deux tablettes d'hexamine ont une masse de  $m_2 = 8 \text{ g} = 8 \times 10^{-3} \text{ kg}$ , ces deux tablettes fournissent donc une énergie de

$$PC_2 = m_2 PC$$

**A.N.**  $PC_2 = 3 \times 10^7 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \times 8 \times 10^{-3} \text{ kg} \simeq 2 \times 10^5 \text{ J}.$

- Q.34. La réaction étant monobare, on peut utiliser le premier principe enthalpique sur le système qu'est l'eau liquide, soit

$$\Delta H = Q$$

avec  $Q$  la chaleur reçue, ou chaleur fournie par la réaction de combustion des deux tablettes d'hexamine. Comme l'eau peut être assimilée à une phase condensée indilatable et incompressible, il vient que

$$\Delta H = m_{\text{eau}} c_{\text{eau}} (T_2 - T_1)$$

avec  $m_{\text{eau}}$  la masse d'eau, et  $c_{\text{eau}}$  sa capacité thermique massique. Ainsi

$$Q = \rho_{\text{eau}} V c_{\text{eau}} (T_2 - T_1)$$

avec  $\rho_{\text{eau}}$  la masse volumique de l'eau.

**A.N.**  $Q = 1 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1} \times 0,25 \text{ L} \times 4,2 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1} \times (100^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) \simeq 8 \times 10^4 \text{ J}.$

- Q.35. Le rendement espéré par le fournisseur est donc

$$\frac{Q}{PC_2} = \frac{8 \times 10^4 \text{ J}}{2 \times 10^5 \text{ J}} = 4 \times 10^{-1} = 40 \%$$

- Q.36. On considère comme système l'eau liquide de température  $T_2 = 100^\circ\text{C}$ , on souhaite vaporiser un volume  $V' = 0,05 \text{ L}$  de cette eau. D'après le premier principe enthalpique

$$\Delta H = Q.$$

Or d'après la définition de l'enthalpie massique de vaporisation, la variation d'enthalpie due à la vaporisation de l'eau liquide à  $100^\circ\text{C}$  est

$$\Delta H = m' l_V = \rho_{\text{eau}} V' l_V$$

avec  $m'$  la masse d'eau à vaporiser et  $l_V$  l'enthalpie massique de vaporisation de l'eau sous 1 bar. Ainsi l'expression du transfert thermique reçu par l'eau lors de la vaporisation monobare est

$$Q = \rho_{\text{eau}} V' l_V$$

**A.N.**  $Q = 1 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1} \times 5 \times 10^{-2} \text{ L} \times 2,3 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} = 1 \times 10^5 \text{ J}.$

Le transfert thermique pour vaporiser 1/5ème du volume d'eau à chauffer requière une énergie plus importante que pour augmenter la température de l'eau liquide : les changements d'états sont très coûteux en énergie.

**Q37.** Dans le set de cuisson, on dispose d'un couvercle. Quel est son rôle ? Nommer précisément un phénomène physique en partie évité grâce au couvercle.

## II.2 - Utilisation du réchaud en altitude

Tout randonneur chevronné sait que le temps de cuisson des aliments dans l'eau bouillante change avec l'altitude. Ceci est lié au fait que la pression atmosphérique diminue avec l'altitude. On cherche ici à retrouver la loi d'évolution de la pression avec l'altitude.

Le graphe de la fonction  $f(x) = \exp(-x)$  figure en fin d'énoncé.

On rappelle la loi fondamentale de la statique des fluides dans le champ de pesanteur uniforme, donnant les variations de la pression  $p$  avec l'altitude  $z$  (l'axe des  $z$  est vertical ascendant)

$$\frac{dp}{dz} = -\mu_{air} g \quad (6)$$

où  $\mu_{air}$  est la masse volumique de l'air et  $g$  la norme de l'accélération de la pesanteur supposée uniforme.

L'air est assimilé à un gaz parfait diatomique de masse molaire  $M_{air}$ . L'atmosphère est supposée isotherme. On note  $T_o$  la température et  $p_o$  la pression à altitude nulle :  $z = 0$ .  $R$  est la constante des gaz parfaits.

**Q38.** Pourquoi considère-t-on l'air comme un gaz diatomique ?

**Q39.** Déterminer l'expression de la masse volumique de l'air en fonction de  $p$ ,  $R$ ,  $T_o$  et  $M_{air}$ .

**Q40.** En déduire que  $p$  est solution de l'équation différentielle

$$\frac{dp}{dz} + \frac{p}{D} = 0 \quad (7)$$

où on exprimera  $D$  en fonction de  $g$ ,  $R$ ,  $T_o$  et  $M_{air}$ .

**Q41.** Déterminer, en justifiant, l'unité de  $D$  à l'aide de l'équation différentielle, puis à l'aide de son expression. On l'exprimera à partir des unités de base du Système International.

**Q42.** Déterminer l'expression de  $p$  en fonction de  $z$ , de la pression  $p_o$  et de  $D$ . Cela confirme-t-il que la pression diminue avec l'altitude ?

**Q43.**  $D$  est de l'ordre de 8 km. Que vaut la pression atmosphérique à 2 km d'altitude sachant que  $p_o$  vaut 1 bar ?

**Q44.** On donne, **figure 3**, page 10, l'allure du diagramme d'équilibre pression-température du corps pur eau. Recopier ce diagramme et identifier les domaines. Préciser le nom du point d'intersection des trois courbes qui y apparaissent.

- Q.37. Le couvercle permet d'éviter la perte de matière par **évaporation**.
- Q.38. L'air est un mélange de gaz composé à près de 70% de diazote, gaz diatomique, on assimilant l'air uniquement au diazote, on peut donc le considérer comme un gaz diatomique.
- Q.39. D'après la loi des gaz parfaits

$$pV = nRT_o \quad ; \quad pV = \frac{m}{M_{\text{air}}} RT_o \quad ; \quad \frac{pM_{\text{air}}}{RT_o} = \frac{m}{V}$$

$$\mu_{\text{air}} = \frac{pM_{\text{air}}}{RT_o}.$$

- Q.40. D'après la loi fondamentale de la statique des fluides (6) donnée plus tôt, il vient que

$$\frac{dp}{dz} = -\mu_{\text{air}}g \quad ; \quad \frac{dp}{dz} = -\frac{pgM_{\text{air}}}{RT_o}$$

$$\frac{dp}{dz} + p\frac{gM_{\text{air}}}{RT_o} = 0.$$

On peut alors  $D$  telle que

$$D = \frac{RT_o}{gM_{\text{air}}}.$$

- Q.41. On étudie les unités de l'équation différentielle

$$\frac{dp}{dz} + \frac{p}{D} = 0 \quad ; \quad \frac{\text{Pa}}{\text{m}} + \frac{\text{Pa}}{[D]} = 0$$

$$[D] = \text{m}.$$

On étudie ensuite les unités des différentes grandeurs dans l'expression de  $D$

$$D = \frac{RT_o}{gM_{\text{air}}} \quad ; \quad [D] = \frac{\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1} \times \text{K}}{\text{m} \cdot \text{s}^{-2} \times \text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}}{\text{m} \cdot \text{s}^{-2} \times \text{kg}}$$

$$[D] = \text{m}.$$

en utilisant qu'une énergie est homogène à une masse fois une vitesse au carré  $\text{J} = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$  (comme on le sait d'après la définition de l'énergie cinétique  $E_c = \frac{1}{2}mv^2$ ).

$D$  correspond donc à une **distance caractéristique**.

- Q.42. On utilise l'équation différentielle obtenue plus tôt que l'on intègre

$$\frac{dp}{dz} + \frac{p}{D} = 0 \quad ; \quad \frac{1}{p} dp = -\frac{1}{D} dz \quad ; \quad \int_{p(z=0)}^{p(z)} \frac{1}{p} dp = -\frac{1}{D} \int_{z=0}^z dz$$

$$[\ln(z)]_{p(z=0)}^{p(z)} = -\frac{1}{D} [z]_{z=0}^z \quad ; \quad \ln(p(z)) - \ln(p_0) = -\frac{z}{D} \quad ; \quad \ln\left(\frac{p(z)}{p_0}\right) = -\frac{z}{D} \quad ; \quad \frac{p(z)}{p_0} = e^{-\frac{z}{D}}$$

$$p(z) = p_0 e^{-\frac{z}{D}}.$$

On constate que la pression diminue bien avec l'altitude.

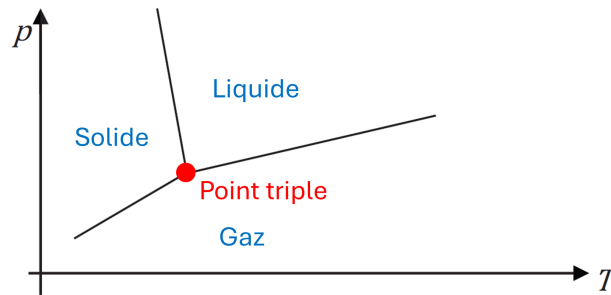
Q.43.

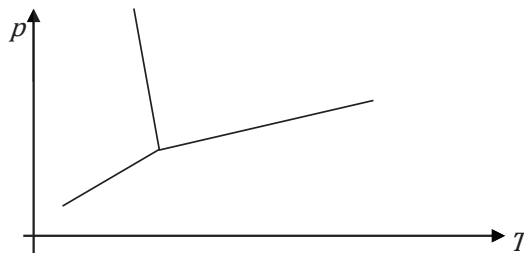
**A.N.**

$$p(z = 2 \text{ km}) = 1 \text{ bar} \times e^{-\frac{2 \text{ km}}{8 \text{ km}}} = 1 \text{ bar} \times e^{-0,25} = 1 \text{ bar} \times 0,8 = 8 \times 10^{-1} \text{ bar}$$

d'après l'annexe donnant le graphe  $f(x) = e^{-x}$ .

Q.44. On peut compléter le diagramme tel que représenté ci-dessous.

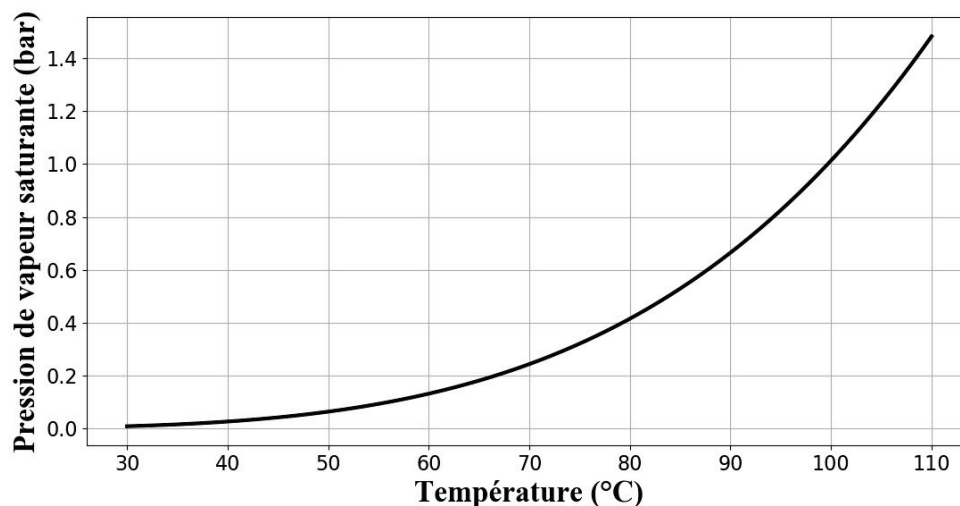




**Figure 3** - Diagramme pression – température du corps pur eau

**Q45.** On assimile l'ébullition à une vaporisation. Justifier à l'aide du diagramme de la **figure 3**, page 10 que la température d'ébullition diminue avec l'altitude.

On donne, **figure 4**, la courbe d'évolution de la pression de vapeur saturante en bar (ou pression d'équilibre liquide-vapeur) de l'eau en fonction de  $\theta$ , la température en degrés Celsius.



**Figure 4** - Graphe de  $p_s(\theta)$

**Q46.** Déterminer la température d'ébullition de l'eau à 2 km d'altitude. La cuisson des aliments dans l'eau bouillante va-t-elle être plus longue ou plus courte en altitude ?

### II.3 - Rendre l'eau potable

Plusieurs possibilités s'offrent au randonneur pour purifier l'eau de source trouvée en chemin, afin de pouvoir la consommer sans danger pour la santé. Il opte pour la solution d'alcool iodé.

- Q.45. Avec l'altitude la pression diminue. Comme la frontière entre les états gaz et liquide correspond à la pression d'équilibre liquide-vapeur en fonction de la température d'ébullition  $p(T_{\text{ébu}})$ , qui est modélisée par une fonction croissante, la température d'ébullition varie dans le même sens que la pression : **la température d'ébullition diminue aussi avec l'altitude.**
- Q.46. Pour obtenir la pression de vapeur saturante d'eau, en assimilant l'air à un mélange de gaz parfaits, il nous faudrait estimer la pression partielle de vapeur d'eau  $p_{\text{eau}}$  à partir de la fraction molaire de vapeur d'eau  $x_{\text{eau}}$  et de la pression totale du mélange  $p(z = 2 \text{ km})$

$$p_{\text{eau}} = x_{\text{eau}}p(z = 2 \text{ km}).$$

Cette pression partielle correspond à la pression de vapeur saturante d'eau. On devrait donc la repérer sur l'axe des ordonnées de la figure 4, et obtenir la valeur de température d'ébullition correspondante.

Malheureusement les données ici ne sont pas bonnes : le graphe correspond à **la pression totale de l'air en fonction de la température d'ébullition de l'eau**. Il fallait donc utiliser la pression totale de l'air  $p(z = 2 \text{ km})$  pour trouver une température d'ébullition de l'eau de près de  $95^\circ\text{C}$  : la cuisson des aliments est plus longue car la température de cuisson est plus basse.

Comme la question était mal posée, **les points sont accordées si l'étudiant a tenté de répondre à la question et cela quelque soit sa réponse.**

**Document 3 - L'eau en voyage, comment rendre l'eau potable (d'après le site routard.com)**

Quels sont les différents moyens dont un voyageur dispose pour traiter son eau ?

1) Ébullition

Selon les différents avis, il faut faire bouillir l'eau d'une à dix minutes. L'ébullition permet de désinfecter l'eau avant de la boire mais pas de la stériliser.

En altitude, n'oubliez pas que l'eau bout à une température plus basse et que les germes ont donc plus de chance de résister. Il est donc vivement conseillé de traiter votre eau ou de la filtrer.

2) Désinfection chimique

Les désinfectants chimiques du voyageur sont efficaces sur les bactéries. Parmi eux, certains éliminent également les virus et les parasites. Ils doivent toujours être utilisés avec une eau bien claire. Il est essentiel d'attendre un délai suffisant avant de la boire, de 15 minutes à 2 heures selon le produit utilisé.

Les différents désinfectants :

Le plus efficace est l'iode, disponible en France en pharmacie sous forme d'alcool iodé à 2 %. On l'utilise à dose de 5 à 10 gouttes par litre d'eau selon la turbidité (aspect trouble de l'eau) et avec un temps de contact de 30 minutes. Son utilisation doit pourtant rester ponctuelle, l'utilisation prolongée présentant un risque pour la thyroïde. Il existe aussi des résines iodées qui équipent certains systèmes pour le voyageur.

Les autres désinfectants de l'eau disponibles sont des agents dérivés du chlore. Le problème avec les agents chlorés, c'est que leur efficacité dépend beaucoup du pH de l'eau, ce que le voyageur ne peut contrôler.

Par ailleurs, tous ces désinfectants chimiques, alcool iodé et agents chlorés, ont une efficacité qui diminue lorsque l'eau est froide ( $<10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Il faut alors doubler le temps de contact.

3) Filtrage

Une micro-filtration de porosité absolue entre 0,2 et 0,4  $\mu\text{m}$  arrêtera efficacement les bactéries et les parasites, mais pas les virus, qui sont trop petits. Un avantage de ce procédé, c'est que l'eau peut être consommée immédiatement.

**Document 4 - D'après le guide « Antiseptiques et désinfectants » du centre de Coordination de la Lutte contre les Infections Nosocomiales de l'Inter-région Paris - Nord**

Les produits iodés sont bactéricides, virucides, fongicides et sporicides.

L'iode sous forme moléculaire (le diiode,  $\text{I}_2$ ) est capable de traverser rapidement la membrane cellulaire. Son action est due à son pouvoir oxydant, comme les autres halogénés, sur les protéines enzymatiques et membranaires.

Les produits iodés sont stables entre  $\text{pH} = 1$  et  $\text{pH} = 6$ .

Les matières organiques (protéines, sérum, sang...) diminuent l'activité des dérivés iodés.

**Document 5 - Alcool iodé à 1 % (d'après la fiche de l'Agence Nationale de Sécurité du médicament). Premier extrait.**

La préparation satisfait à la monographie Préparations liquides pour application cutanée (0927).

Définitions

a) Formule :

Composants	Quantité (g)	Fonction	Référentiel
Diode	1,00	Substance active	Ph. Eur.
Potassium (iodure de)	0,60	Solvant	Ph. Eur.
Éthanol à 96 % en volume	54,7	Excipient	Ph. Eur.
Eau purifiée q.s.p.	100,0	Excipient	Ph. Eur.

« q.s.p » signifie que l'on ajoute la quantité d'eau purifiée nécessaire pour obtenir 100,0 g d'alcool iodé.

Dans le cas d'utilisation d'éthanol à 90 % en volume, il convient de se référer au texte général Alcoométrie de la Pharmacopée française.

b) Teneur

Diode libre ( $I_2$ ) : de 0,95 % en masse à 1,05 % en masse.

Iodure de potassium ( $K^+$ ,  $I^-$ ) : de 0,57 % en masse à 0,63 % en masse.

Production (quantités du tableau)

Précaution : utilisez des récipients de verre pour la préparation.

Dissolvez l'iodure de potassium puis le diode dans 5 mL d'eau purifiée ; agitez et ajoutez la quantité d'alcool indiquée. Complétez avec de l'eau purifiée.

Caractères

Aspect : liquide limpide brun foncé.

Odeur d'éthanol et d'iode.

**Q47.** On souhaite préparer la solution d'alcool iodé en suivant le descriptif du **document 5**. Préciser le matériel le plus adapté à utiliser pour :

- obtenir les 5 mL d'eau purifiée,
- préparer les quantités adéquates de diode solide et d'iodure de potassium solide.

**Q48.** Le processus de désinfection de l'eau repose sur des réactions chimiques. Quelle est la nature de ces réactions chimiques d'après les **documents 3 et 4**, page 11 ? On ne demande pas d'équation bilan de réaction.



- Q.47. L'eau purifiée doit être introduite avec précision, on utilise donc une **pipette jaugée**. Les solides sont à pesés dans une coupelle avec une **balance de précision**.
- Q.48. On parle de pouvoir oxydant du diiode, il s'agirait donc de **réactions d'oxydo-réduction**.

**Q49.** Expliquer pourquoi il y a un délai entre l'utilisation du désinfectant et le moment où l'on peut consommer l'eau. Ce délai s'allonge lorsque la température diminue. Sur quel paramètre la température joue-t-elle ?

**Q50.** On parle de « pouvoir oxydant » dans le **document 4**, page 11. Justifier cette affirmation à l'aide de la notion de nombre d'oxydation. On s'intéressera au couple  $I_2 / I^-$ .

On s'intéresse maintenant au dosage du diiode.

**Document 6 - Alcool iodé à 1 % (d'après la fiche de l'Agence Nationale de Sécurité du médicament). Deuxième extrait.**

Dans une fiole conique, introduisez 10,00 g d'alcool iodé. Ajoutez 20 mL d'eau et 1 mL d'acide sulfurique dilué. Titrerez par le thiosulfate de sodium  $0,1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  en présence de solution d'amidon.

1 mL de thiosulfate de sodium  $0,1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  correspond à 12,69 mg de diiode.

Teneur (en g pour 100 g) en diiode :

$$\frac{V \times C \times 12,69}{m}$$

$V$  = volume versé en mL de thiosulfate de sodium  $0,1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$

$C$  = titre exact du thiosulfate de sodium  $0,1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$

$m$  = prise d'essai d'alcool iodé en grammes.

**Données 3**

Formules chimiques :

- Diiode :  $I_2$  solide ou en solution aqueuse
- Iodure de potassium : KI solide ou ( $K^+$ ,  $I^-$ ) en solution aqueuse
- Thiosulfate de sodium :  $Na_2S_2O_3$  solide ou ( $2 Na^+$ ,  $S_2O_3^{2-}$ ) en solution aqueuse
- Solution d'acide sulfurique :  $H_2SO_4$

Masse molaire de l'iode :  $M(I) = 126,9 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$

Masse volumique de l'eau liquide =  $\mu_{eau} = 1 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$

La solution d'amidon est bleue en présence de diiode et incolore sinon.

Potentiels standard d'oxydo-réduction à 25 °C :

- $E^\circ (I_2 / I^-) = 0,62 \text{ V}$
- $E^\circ (S_4O_6^{2-} / S_2O_3^{2-}) = 0,08 \text{ V}$

Volume moyen d'une goutte de solution aqueuse =  $V_g = 0,05 \text{ mL}$

**Q51.** Faire un schéma annoté du dosage avec la verrerie utilisée. Où met-on la solution d'alcool iodé ? Où met-on la solution de thiosulfate de sodium ?

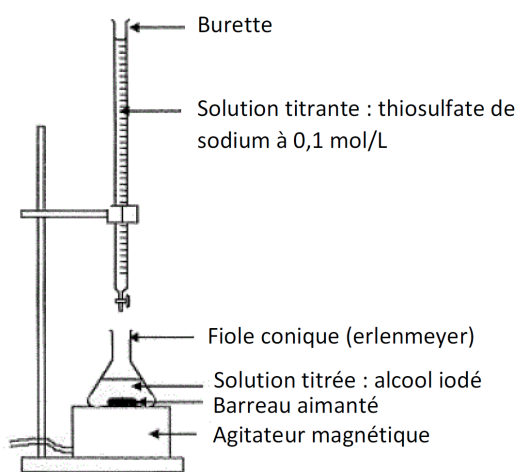
- Q.49. Ce délai correspond à la durée de **la réaction qui doit être lente**. La température joue sur **la cinétique de la réaction** : lorsqu'elle augmente, il en va de même pour la vitesse des réactions chimiques le plus souvent.
- Q.50. Le nombre d'oxydation de l'iode I dans le diiode  $I_2$  est  $NO(I) = 0$  car le nombre d'oxydation de  $I_2$  est nul, soit

$$NO(I_2) = 2NO(I) \quad ; \quad 0 = 2NO(I) \quad ; \quad NO(I) = 0.$$

Le nombre d'oxydation de l'iode I dans l'ion iodure  $I^-$  est  $NO(I) = -I$ .

Ainsi dans le couple  $I_2/I^-$ , **le diiode est l'oxydant** et l'ion iodure le réducteur, c'est pourquoi il est dit que le diiode a un pouvoir oxydant.

- Q.51. Voici le schéma annoté du dosage. La solution titrante, soit la solution de thiosulfate de sodium, se trouve dans la burette ; la solution titrée, soit la solution d'alcool iodé, se trouve dans la fiole conique.

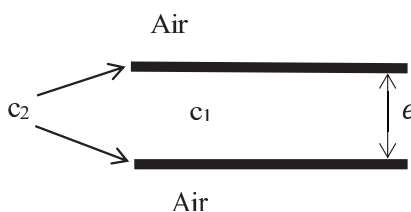


- Q52.** Dans l'alcool iodé, la substance qui réagit lors du dosage est le diiode. Écrire la réaction de dosage. Justifier qualitativement que cette réaction est totale.
- Q53.** Comment l'équivalence du dosage est-elle repérée dans le protocole présenté dans le **document 6**, page 13 ? Décrire en justifiant ce que l'on voit.
- Q54.** Établir le lien entre la quantité de matière  $n(\text{I}_2)$  de diiode présent dans la masse  $m$  d'alcool iodé dosé, le volume  $V'$  (en litres) de solution de thiosulfate de sodium versée à l'équivalence du dosage et la concentration  $C$  de la solution de thiosulfate de sodium.
- Q55.** Donner l'expression de la masse  $m'$  de diiode présent dans la masse  $m$  dosée en fonction de  $n(\text{I}_2)$  et de  $M(\text{I})$ , la masse molaire de l'iode.
- Q56.** Montrer avec soin que l'on retrouve l'expression de la teneur en diiode annoncée dans le **document 6**, page 13. On rappelle que la teneur correspond à un pourcentage.
- Lors du dosage d'une solution d'alcool iodé utilisée pour la désinfection, selon le protocole du **document 6**, page 13, on obtient un volume équivalent de thiosulfate de sodium de 10,1 mL.
- Q57.** Quelle est la masse de diiode contenue dans la prise d'essai ? On attend ici un résultat numérique avec deux chiffres significatifs.
- Q58.** Quelle masse approximative de diiode ingurgite-t-on lorsque l'on boit un litre d'eau dans laquelle on a mis une dizaine de gouttes de cet alcool iodé ?

### Partie III - Beauté de la nature

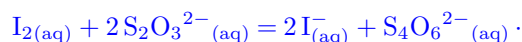
En se promenant, le randonneur peut observer des oiseaux, des insectes et les belles couleurs de leurs ailes (papillons), carapaces (coléoptères, mouches) ou plumes. Il constate que, souvent, la couleur observée est changeante selon l'angle de vue : on parle d'irisation. La simple présence d'un pigment coloré ne peut pas expliquer ces variations de couleurs. Il s'agit en effet d'une couleur liée à la structure microscopique de l'aile, la carapace ou la plume : certaines sont constituées d'un empilement régulier de couches de deux matériaux d'indices optiques différents. Le nombre de couches va de deux à plus de cent selon les cas.

On souhaite expliquer le phénomène optique responsable des irisations. On s'intéresse à une unique couche d'épaisseur  $e$  d'un matériau noté  $c_1$ , délimitée par deux couches d'épaisseur négligeable d'un autre matériau noté  $c_2$ . Ces trois couches sont plongées dans l'air comme illustré sur la **figure 5**. On note  $n_o$  l'indice optique de l'air et  $n$  l'indice optique du matériau  $c_1$ ,  $n$  et  $n_o$  étant différents.



**Figure 5** - Multicouche

- Q.52. D'après le paragraphe 3 de données, le diiode est oxydant du couple  $I_2/I^-$  et l'ion thiosulfate est réducteur du couple  $S_4O_6^{2-}/S_2O_3^{2-}$ , l'équation de la réaction est donc



On peut déterminer qualitativement si la réaction est totale en comparant les potentiels standards des deux couples oxydant-réducteur. Ici l'oxydant réactif est le diiode, dont le potentiel du couple est  $E^\circ(I_2/I^-) = 0,62 \text{ V}$ , et le réducteur réactif est le thiosulfate, dont le potentiel du couple est  $E^\circ(S_4O_6^{2-}/S_2O_3^{2-}) = 0,08 \text{ V}$ . **L'oxydant du couple avec le potentiel le plus haut réagit bien avec le réducteur du couple avec le potentiel le plus bas : la réaction peut être considérée comme totale.**

- Q.53. Le titrage est effectué en présence de solution d'amidon qui est bleue en présence de diiode et incolore sinon. Ainsi lorsque le diiode a totalement été consommée à l'équivalence, la solution titrée passe du bleu à l'incolore.
- Q.54. D'après l'équation de la réaction, à l'équivalence

$$\frac{n(I_2)}{1} = \frac{n(S_2O_3^{2-})}{2} \quad ; \quad n(I_2) = \frac{CV'}{2}$$

avec  $C$  la concentration de la solution de thiosulfate et  $V'$  le volume de cette solution versée à l'équivalence.

- Q.55. Pour obtenir la masse  $m'$  de diiode dosée en fonction de la quantité de matière  $n(I_2)$ , on utilise la relation impliquant la masse molaire de  $I_2$

$$m' = n(I_2) \times M(I_2) = n(I_2) \times 2M(I).$$

- Q.56. Exprimons la teneur de diiode dans une masse  $m$  d'alcool iodé : il s'agit du rapport entre la masse du diiode  $m'$  et la masse totale de l'alcool iodé  $m$  que l'on multiplie par 100 car il s'agit d'un pourcentage, soit

$$\begin{aligned} t &= \frac{m'}{m} \times 100 = \frac{n(I_2) \times 2M(I)}{m} \times 100 = \frac{2CV'M(I)}{2m} \times 100 \\ &= \frac{CV'M(I)}{m} \times 100. \end{aligned}$$

Le volume fourni dans le document 6 est le volume  $V$  exprimée en millilitres, ainsi  $V'$  en litres est égale à  $V \times 10^{-3}$  en litres également. Ainsi

$$t = \frac{CVM(I)}{m} \times 1 \times 10^{-1}.$$

En exprimant la masse molaire de l'iode en grammes par mole, il vient que

$$t = \frac{CV \times 126,9}{m} \times 1 \times 10^{-1} = \frac{CV \times 12,69}{m}.$$

- Q.57. On effectue l'application numérique à l'aide de l'expression du document 6 pour obtenir la teneur en iode

$$t = \frac{CV \times 12,69}{m} = \frac{0,1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \times 10,1 \text{ L} \times 12,69 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}}{10 \text{ g}} = 1,3\%.$$

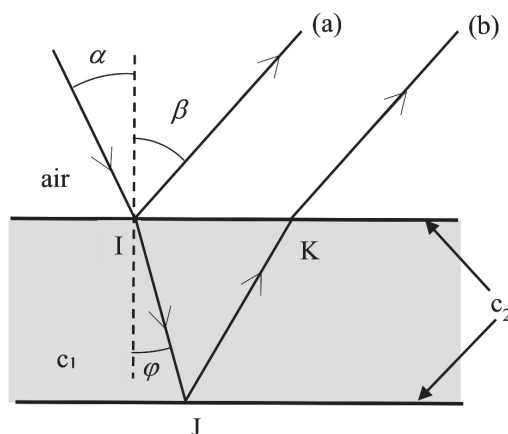
La masse d'alcool étant de 10 g, la masse de diiode contenue dans l'alcool correspond à 1,3% de cette masse,

soit  $m' = 13 \times 10^{-2} \text{ g}$ .

- Q.58. D'après les données le volume moyen d'une goutte de solution aqueuse est  $V_g = 0,05 \text{ mL}$ . Une dizaine de gouttes correspond donc à une masse  $m = 10 \times 0,05 \times 10^{-3} \text{ L} \times 1 \text{ kgL}^{-1} = 5 \times 10^{-4} \text{ kg} = 0,5 \text{ g}$ . La masse de diiode contenue dans cette masse d'alcool correspond à 1,3% de cette masse, soit à peu près

$$m' = 0,5 \times 10^{-2} \text{ g} = 5 \text{ mg}.$$

On considère un rayon lumineux incident supposé monochromatique ; on note  $\lambda$  sa longueur d'onde dans le vide. Le rayon lumineux se divise en un rayon transmis et un rayon (a) réfléchi dans l'air. Le matériau  $c_2$  constitue l'interface sur laquelle le rayon lumineux se divise. Le rayon transmis est lui-même réfléchi puis en partie transmis dans l'air. Le rayon qui ressort est noté (b). Les rayons (a) et (b) sont parallèles : voir la **figure 6**.



**Figure 6** - Trajet des rayons lumineux

**Q59.** Déterminer l'angle  $\beta$ . Justifier.

**Q60.** Pourquoi le rayon IJ change-t-il de direction par rapport au rayon incident ? Nommer le phénomène en jeu.

**Q61.** Les deux rayons (a) et (b) interfèrent. Expliquer en rappelant les conditions pour que le phénomène d'interférences apparaisse.

Les interférences ont lieu à l'infini, les rayons (a) et (b) étant parallèles.

On donne la différence de marche à l'infini entre les rayons (a) et (b) :

$$\delta = 2 n e \cos (\varphi) + \frac{\lambda}{2} . \quad (8)$$

**Q62.** Donner sans démonstration l'expression de l'intensité lumineuse résultant de la superposition des rayons (a) et (b). On introduira et définira les notations utiles. On supposera l'intensité lumineuse du rayon (a) pris seul identique à celle du rayon (b) pris seul.

**Q63.** Montrer que :

$$\delta = 2 e \sqrt{n^2 - n_0^2 \sin^2(\alpha)} + \frac{\lambda}{2} . \quad (9)$$

**Q64.** Démontrer que l'on voit de la lumière dans la direction  $\beta$  telle que  $\delta = p\lambda$  où  $p$  est un entier. Comment qualifie-t-on les interférences dans ce cas ?

En réalité la lumière incidente est une lumière blanche : c'est la lumière du soleil. Elle contient toutes les longueurs d'onde du spectre visible.

Q.59. D'après la loi de la réflexion de Snell-Descartes  $\alpha = -\beta$ , comme ici les angles ne sont pas orientés, on peut écrire

$$\alpha = \beta$$

Q.60. Le rayon IJ est réfracté du fait du changement d'indice entre l'air, d'indice  $n_o$ , et le matériau  $c_1$ , d'indice  $n_1$ . Ce phénomène s'appelle **la réfraction**.

Q.61. Pour interférer les deux rayons doivent avoir la même fréquence et leur différence de phase à l'origine doit être constante durant la durée d'observation : on dit que **les rayons sont cohérents**.

Q.62. L'expression de l'intensité lumineuse résultant des rayons (a) et (b) est

$$\begin{aligned} I(M) &= I_a + I_b + 2\sqrt{I_a I_b} \cos(\Delta\phi) = I_a + I_b + 2\sqrt{I_a I_b} \cos\left(2\pi \frac{\delta}{\lambda}\right) \\ &= I_a + I_b + 2\sqrt{I_a I_b} \cos\left(\frac{4\pi n e}{\lambda} \cos(\varphi) + \pi\right) \end{aligned}$$

avec  $\Delta\phi$  la différence de phase entre les deux rayons. Comme les intensités individuelles sont identiques, il vient que

$$I(M) = 2I_a + 2I_a \cos\left(\frac{4\pi n e}{\lambda} \cos(\varphi) + \pi\right)$$

$$I(M) = 2I_a \left(1 + \cos\left(\frac{4\pi n e}{\lambda} \cos(\varphi) + \pi\right)\right).$$

Q.63. On souhaite exprimer  $\cos(\varphi)$  en fonction de l'angle  $\alpha$ . D'après la loi de la réfraction de Snell-Descartes

$$\begin{aligned} n_o \sin(\alpha) &= n \sin(\varphi) \quad ; \quad \sin(\varphi) = \frac{n_o}{n} \sin(\alpha) \\ \sqrt{1 - \cos^2(\varphi)} &= \frac{n_o}{n} \sin(\alpha) \quad ; \quad 1 - \cos^2(\varphi) = \frac{n_o^2}{n^2} \sin^2(\alpha) \\ \cos^2(\varphi) &= 1 - \frac{n_o^2}{n^2} \sin^2(\alpha) \quad ; \quad \cos(\varphi) = \frac{1}{n} \sqrt{n^2 - n_o^2 \sin^2(\alpha)} \\ n \cos(\varphi) &= \sqrt{n^2 - n_o^2 \sin^2(\alpha)}. \end{aligned}$$

On peut alors récrire la différence de marche  $\delta$

$$\delta = 2e \sqrt{n^2 - n_o^2 \sin^2(\alpha)} + \frac{\lambda}{2}.$$

Q.64. D'après l'expression de l'intensité totale, le maximum d'intensité est atteint si

$$\cos\left(2\pi \frac{\delta}{\lambda}\right) = 1 \quad ; \quad 2\pi \frac{\delta}{\lambda} = 2p\pi$$

$$\delta = p\lambda.$$

Dans ce cas les interférences sont **constructives**.

**Q65.** Expliquer alors que selon l'angle d'observation  $\beta$  de la structure, la lumière réfléchie observée n'a pas la même couleur.

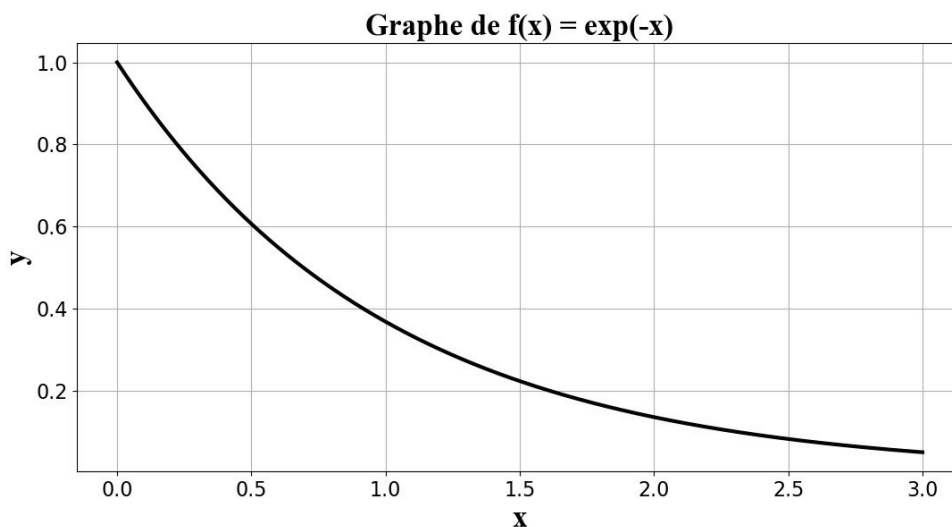
**Q66.** Supposons que la structure observée soit plongée dans l'eau : sur le schéma de la **figure 5**, page 14 l'air est remplacé par de l'eau. Quel paramètre est modifié ? Cela induit un changement de la couleur observée dans une direction donnée. Expliquer.

On suppose que l'on peut modéliser une aile de papillon par la structure multicouche étudiée précédemment.

**Q67.** On observe cette aile de papillon sous un angle de  $30^\circ$ . Dans l'air d'indice optique 1,0, l'aile a une couleur bleue. Plongée dans l'acétone d'indice optique 1,4, l'aile a une couleur verte. Montrer que cette observation permet d'estimer  $e$ , connaissant l'indice optique de la couche  $c_1$ . On ne demande pas de réaliser cette estimation.

**Q68.** Si l'épaisseur  $e$  est grande, il arrive que la structure devienne transparente : le phénomène d'interférences n'a plus lieu. Expliquer.

## ANNEXE



**FIN**



Q.65. On sait que  $\alpha = \beta$ , or

$$\delta = 2e\sqrt{n^2 - n_o^2 \sin^2(\alpha)} + \frac{\lambda}{2} = p\lambda$$

donc  $\alpha$  dépend de  $\lambda$ , donc  $\beta$  dépend de  $\lambda$  : **la direction d'interférences constructives dépend de la longueur d'onde** ce qui explique pourquoi la lumière observée pour différente d'une direction à une autre.

Q.66. Dans ce cas la nouvelle expression de la différence de marche est

$$\delta = 2e\sqrt{n_e^2 - n_o^2 \sin^2(\alpha)} + \frac{\lambda}{2} = p\lambda$$

avec  $n_e$  l'indice optique de l'eau. On voit que la condition d'interférence constructives change : il y a changement de couleur observée par rapport au cas précédent.

Q.67. Exprimons la condition d'interférences constructive dans le cas d'une immersion dans l'air

$$\begin{aligned}\delta_{\text{air}} &= 2e\sqrt{n^2 - n_o^2 \sin^2(30^\circ)} + \frac{\lambda_{\text{air}}}{2} = p\lambda_{\text{air}} \\ 2e\sqrt{n^2 - \frac{1}{4}} &= \left(p - \frac{1}{2}\right)\lambda_{\text{air}} \quad ; \quad p = \frac{2e}{\lambda_{\text{air}}}\sqrt{n^2 - \frac{1}{4}} + \frac{1}{2}.\end{aligned}$$

Exprimons la condition d'interférences constructive dans le cas d'une immersion dans l'acétone

$$\begin{aligned}\delta_{\text{acé}} &= 2e\sqrt{n^2 - n_{\text{acé}}^2 \sin^2(30^\circ)} + \frac{\lambda_{\text{acé}}}{2} = p'\lambda_{\text{acé}} \\ 2e\sqrt{n^2 - 1,4^2\frac{1}{4}} &= \left(p' - \frac{1}{2}\right)\lambda_{\text{acé}} \quad ; \quad p' = \frac{2e}{\lambda_{\text{acé}}}\sqrt{n^2 - 1,4^2\frac{1}{4}} + \frac{1}{2}.\end{aligned}$$

Afin de conclure il faudrait la valeur des ordres d'interférences  $p$  et  $p'$ , ce qui manque. On aurait alors pu écrire

$$\begin{aligned}p - p' &= 2e\left(\frac{1}{\lambda_{\text{air}}}\sqrt{n^2 - \frac{1}{4}} - \frac{1}{\lambda_{\text{acé}}}\sqrt{n^2 - 1,4^2\frac{1}{4}}\right) \\ e &= \frac{p - p'}{2\left(\frac{1}{\lambda_{\text{air}}}\sqrt{n^2 - \frac{1}{4}} - \frac{1}{\lambda_{\text{acé}}}\sqrt{n^2 - 1,4^2\frac{1}{4}}\right)}.\end{aligned}$$

Les points à cette question sont donnés si l'étudiant a effectué un début de travail.

Q.68. Si l'épaisseur de l'aile devient trop grande, alors la différence de marche  $\delta$  devient trop importante : la durée de parcours de la lumière avant interférence devient trop grande devant le temps de cohérence, **la différence de phase à l'origine varie alors de manière aléatoire, il n'y a plus de terme d'interférence.**