

THERMODYNAMIQUE

CALCULATRICES AUTORISÉES

I. Plongée sous-marine *Les différentes parties sont indépendantes.*

I.1. Plongée en apnée

L'eau où le plongeur évolue est considérée comme un liquide homogène et incompressible, de masse volumique $\rho = 1,0 \times 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$, en équilibre dans le champ de pesanteur \vec{g} uniforme avec $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$. La surface libre de l'eau (cote $z=0$) est en contact avec l'atmosphère, de pression constante $p_{\text{atm}} = 1,013 \times 10^5 \text{ Pa}$. On prendra l'axe Oz vertical ascendant.

1. Rappeler l'équation locale d'équilibre des fluides et en déduire l'expression de la pression $p(z)$ dans l'eau en un point de cote $z \leq 0$. Tracer le graphe de $p(z)$ (pour $z > 0$ et $z < 0$), en vous limitant à une altitude faible devant la hauteur d'échelle pour $z > 0$.

On assimile l'air contenu dans les poumons du plongeur à un gaz parfait et on note la constante des gaz parfaits $R = 8,31 \text{ J.K}^{-1}\text{mol}^{-1}$. Cet air est caractérisé par une pression $p(z)$ identique à celle de l'eau à la cote z , un volume $V(z)$ (capacité pulmonaire) variable car la cage thoracique se déforme sous l'effet de la pression, et enfin une température T constante et indépendante de la profondeur.

2. Calculer la capacité pulmonaire du plongeur à une cote z sachant que celui-ci, avant de plonger, gonfle ses poumons à leur capacité maximale $V_M = 4,0 \text{ L}$ puis bloque sa respiration. Quelle est la valeur de $V(z)$ à $z = -20 \text{ m}$?
3. On définit le poids apparent du plongeur \vec{P}_{app} comme la résultante des forces s'exerçant sur le plongeur (on néglige tout frottement). On définit la flottabilité F par $\vec{P}_{\text{app}} = +F\vec{u}_z$. Expliquer qualitativement comment varie la flottabilité lorsque la profondeur augmente.

Afin de faciliter leur descente lors des premiers mètres, les plongeurs utilisent souvent un lest, plaque de plomb de volume négligeable, accroché à une ceinture et facilement largable. Ce lest ne doit pas être trop lourd car un surlestage peut inciter à descendre à une profondeur excessive. On note m la masse du plongeur, $V^*(z)$ le volume de son corps et V_0 le volume de son corps hors celui de la cage thoracique, de sorte que $V^*(z) = V_0 + V(z)$.

4. Quelle masse m_1 de lest choisir si l'on adopte comme règle de sécurité que le plongeur doit avoir une flottabilité nulle à 5 mètres de profondeur ? A.N. : $V_0 = 0,079 \text{ m}^3$ et $m = 80 \text{ kg}$.

I.2. Plongée avec bouteille : utilité du détendeur

La pression dans une bouteille de plongée peut varier de 100 à 200 bars en début de plongée jusqu'à 3 à 5 bars en fin de plongée : la réserve de sécurité est caractérisée par la pression de seuil p_s . Le gaz contenu dans les bouteilles de plongée sera considéré comme un gaz parfait.

Il faut ramener la pression de l'air sortant de la bouteille à la pression ambiante, pression de l'air respiré par le plongeur. Le détendeur assure cette fonction. Ce dispositif, inséré entre la bouteille d'air et la bouche du plongeur, fournit de l'air à la demande de ce dernier. Le détendeur possède ainsi plusieurs fonctions :

- il réduit la pression de l'air issu de la bouteille à la pression $p(z)$ de l'endroit où se trouve le plongeur ;
- il fournit la quantité d'air nécessaire à la respiration du plongeur à la pression $p(z)$;
- il se bloque lorsque la pression p_b de l'air dans la bouteille devient de l'ordre de la pression seuil p_s . Le plongeur est alors averti qu'il doit passer sur la réserve et remonter.

5. Au début de la plongée, la bouteille, de volume V_b , est remplie d'air à la température T_b égale à la température T_a de l'atmosphère, sous une pression p . En profondeur ou en surface, la bouteille et son contenu prennent instantanément la température T_e , constante, de l'eau environnante. Calculer la quantité de matière d'air contenu dans la bouteille, d'une part au début de la plongée (n_i), d'autre part au moment où le détendeur se bloque (n_s).
A.N. : $p = 200\text{bar}$, $p_s = 4\text{bar}$, $V_b = 12\text{L}$, $T_a = 293\text{K}$ et $T_e = 288\text{K}$.
6. La respiration du plongeur est périodique, de fréquence f . Sous la pression locale $p(z)$ et à la température T_e , le volume moyen de l'air inspiré au cours de chaque cycle (avant d'être ensuite rejeté à l'extérieur) est Ω_0 . Calculer le temps $\Delta t_s(z)$ au bout duquel le détendeur se bloque ; pour simplifier les calculs on admettra que le temps de descente du plongeur à la profondeur z est négligeable, que ce dernier se maintient tout le temps $\Delta t_s(z)$ à la profondeur z et que le volume Ω_0 ne dépend pas de la profondeur.
A.N. : $z = -20\text{m}$, $\Omega_0 = 2\text{L}$, $f = 0,2\text{s}^{-1}$.
7. Comparer $\Delta t_s(z)$ au temps $\Delta t_s(0)$ mis par le détendeur pour se bloquer si le plongeur reste en surface, où $z = 0$ et $T = T_a$. Faire l'application numérique et comparer au cas où $z = -20\text{m}$.

I.3. Plongée avec bouteilles : hyperoxie et ivresse des profondeurs

DÉFINITION : Soit un mélange de plusieurs gaz parfaits (n_1 moles de gaz (1), n_2 moles de gaz (2), ...) occupant un volume V à une température T . On appelle pression partielle d'un des gaz constituant ce mélange la pression de ce gaz s'il occupait seul le même volume V à la température T .

L'air contenu dans les bouteilles de plongée est un mélange de gaz, dont la composition (molaire) est $x_{O_2} = 20\%$ et $x_{N_2} = 80\%$.

8. Exprimer p_1 puis p_2 en fonction de p et des fractions molaires du gaz (i) : $x_i = \frac{n_i}{n_1+n_2}$.
9. a) Le dioxygène inhalé devient toxique si sa pression partielle augmente trop (hyperoxie), à cause des radicaux libres pouvant altérer nos cellules. Il existe même un risque d'œdème pulmonaire quand la pression partielle atteint 1,5 bar. En déduire la profondeur maximale pouvant être atteinte sans danger par le plongeur.
- b) Lorsque la pression partielle de l'azote atteint 4,0 bar, la plongeur est victime de «l'ivresse des profondeurs», ou narcose à l'azote, entraînant des troubles du comportement tels qu'euphorie, angoisse, troubles de la vision, disparition de la notion de durée, amnésie, etc.... En déduire la nouvelle profondeur maximale.