

# Physique Générale A

## Série d'exercices 8: Fin gaz parfaits, Transferts de chaleur, changements d'état, transformations, Gaz dissous - corrigé - 9 décembre 2025

### 1.) QCM A: Mélange de gaz

Les deux gaz sont des gaz parfaits, donc ils se comportent chacun comme s'ils étaient seuls. On peut donc les traiter indépendamment.

On considère d'abord le gaz 1:

Quand les deux gaz sont divisés (avant que les deux réservoirs soient mis en communication), le gaz 1 occupe le volume  $V_1$  et il a pression  $P$  et température  $T$ , donc l'équation d'état des gaz parfaits donne

$$PV_1 = n_1RT$$

où  $n_1$  est le nombre de moles du gaz 1.

Après que les deux réservoirs soient mis en communication, le gaz 1 (qui est encore constitué de  $n_1$  moles à température  $T$ ) utilise tout le volume disponible  $V_1 + V_2$  et l'équation d'état donne la pression partielle  $P'_1$  du gaz 1:

$$P'_1 = \frac{n_1RT}{V_1 + V_2}.$$

En combinant les deux relations dessus on a

$$P'_1 = \frac{V_1}{V_1 + V_2}P.$$

On peut procéder de la même façon pour le gaz 2:

Quand les deux gaz sont divisés, le gaz 2 occupe le volume  $V_2$  et il a pression  $P$  et température  $T$ , donc l'équation d'état des gaz parfaits donne

$$PV_2 = n_2RT$$

où  $n_2$  est le nombre de moles du gaz 2.

Après que les deux réservoirs soient mis en communication, le gaz 2 (qui est encore constitué de  $n_2$  moles à température  $T$ ) utilise tout le volume disponible  $V_1 + V_2$  et l'équation d'état donne la pression partielle  $P'_2$  du gaz 2:

$$P'_2 = \frac{n_2RT}{V_1 + V_2}.$$

En combinant les deux relations dessus pour le gaz 2 on a

$$P'_2 = \frac{V_2}{V_1 + V_2}P.$$

La pression totale  $P'_{\text{tot}}$  du mélange des gaz parfaits 1 et 2 est donnée par la somme des pressions partielles des gaz (loi de Dalton), donc

$$P'_{\text{tot}} = P'_1 + P'_2 = \frac{V_1}{V_1 + V_2}P + \frac{V_2}{V_1 + V_2}P = \frac{V_1 + V_2}{V_1 + V_2}P = P.$$

La pression totale du mélange est  $P$  et elle ne dépend pas des volumes  $V_1$  et  $V_2$ . La réponse correcte est la C.

Remarque: Les pressions partielles de chacun des deux gaz du mélange dépendent bien des volumes  $V_1$  et  $V_2$ , notamment de leur rapport  $r = V_1/V_2$ . Avec cette définition de  $r$  on a

$$P'_1 = \frac{r}{r+1}P, \quad P'_2 = \frac{1}{r+1}P.$$

## 2.) QCM K': Vitesse moyenne des molécules

A. Vrai. La vitesse moyenne des molécules est donnée par

$$\bar{v} = \sqrt{3 \frac{k_B T}{m}},$$

où  $T$  est la température,  $m$  est la masse d'une molécule et  $k_B$  est la constante de Boltzmann. Nous voulons voir s'il est possible d'exprimer ce résultat en fonction de la pression  $P$  et de la masse volumique  $\rho$  que l'on connaît.

Pour un volume  $V$  de gaz contenant  $N$  molécules (et donc  $n = N/N_A$  moles, où  $N_A$  est le nombre d'Avogadro), l'équation d'état des gaz parfaits  $PV = nRT$  peut être réécrite comme

$$PV = \frac{N}{N_A}RT = Nk_B T,$$

parce que  $k_B = R/N_A$ . Donc on a

$$k_B T = \frac{PV}{N},$$

qui est utile pour le numérateur de  $\bar{v}$ .

Pour le dénominateur, la masse  $m$  d'une molécule est donnée par la masse  $\rho V$  de gaz dans le volume  $V$  divisé par le nombre  $N$  des molécules dans le même volume:

$$m = \frac{\rho V}{N}.$$

Alors on obtient

$$\frac{k_B T}{m} = \frac{PV/N}{\rho V/N} = \frac{P}{\rho}$$

et la vitesse moyenne des molécules

$$\bar{v} = \sqrt{3 \frac{k_B T}{m}} = \sqrt{3 \frac{P}{\rho}}$$

peut être déterminée en connaissant seulement la pression et la masse volumique du gaz.

B. Faux. En utilisant le résultat dessus, si  $\rho$  est constante et  $P$  double alors  $\bar{v}$  devient  $\sqrt{2}$  fois plus grand.

C. Vrai. Si  $P$  est constante et  $\rho$  est 4 fois plus grand, alors la vitesse moyenne  $\bar{v}$  devient  $\sqrt{4} = 2$  fois plus petite.

D. Vrai. Dans ce cas  $\bar{v} = \sqrt{3 \times \frac{10^5 \text{ Pa}}{1.2 \text{ kg/m}^3}} = 500 \text{ m/s}$ .

### 3.) QCM K': Sauna, humidité et température du bulbe humide

- A. **Vrai.** Avec une puissance du poêle constante, une partie de l'énergie est utilisée pour *évaporer* l'eau (chaleur latente). Cela réduit la quantité d'énergie disponible pour chauffer l'air : la température de l'air *baisse légèrement* ou reste stable, mais n'augmente pas. L'humidité, en revanche, augmente fortement.
- B. **Faux.** Ajouter de l'eau augmente l'humidité du sauna. Une humidité plus élevée signifie que l'air est plus proche de la saturation, c'est-à-dire de la quantité maximale de vapeur d'eau qu'il peut contenir. Dans un air proche de la saturation, il faut donc *davantage d'énergie* pour évaporer de l'eau. La température atteinte par une surface mouillée (le bulbe humide) est alors plus élevée : la température du bulbe humide *augmente*.
- C. **Vrai.** Lorsque l'humidité augmente, l'air accepte moins de vapeur d'eau provenant de la transpiration. L'évaporation est donc moins efficace. Pour éliminer la même puissance métabolique (donc se refroidir autant), la personne doit *transpirer davantage*. C'est pour cela qu'un sauna humide paraît beaucoup plus "chaud" qu'un sauna sec à la même température.
- D. **Vrai.** Si la température du bulbe humide atteint la température de la peau (environ 35°C), l'évaporation ne permet plus d'extraire de chaleur. La régulation thermique devient impossible et la température interne de la personne commence à augmenter.

### 4.) Or dans l'eau

C. Lorsqu'on les met en contact, le corps le plus chaud (l'or) cède de la chaleur au corps le plus froid (l'eau), jusqu'à ce qu'ils atteignent une température commune  $T=14,66^\circ\text{C}$ . L'or et l'eau reçoivent respectivement les quantités de chaleur :  $Q_{\text{Or}} = m_{\text{Or}}c_{\text{Or}}(T - T_{i,\text{Or}})$  et  $Q_{\text{eau}} = m_{\text{eau}}c_{\text{eau}}(T - T_{i,\text{eau}})$ . Comme la chaleur est échangée entre l'or et l'eau, on a  $Q_{\text{Or}} = -Q_{\text{eau}}$ , soit  $m_{\text{Or}}c_{\text{Or}}(T - T_{i,\text{Or}}) = -m_{\text{eau}}c_{\text{eau}}(T - T_{i,\text{eau}})$ . Par ailleurs 300 K correspond à 26,85°C.

Ainsi, en isolant  $c_{\text{Or}}$

$$c_{\text{Or}} = -\frac{m_{\text{eau}}c_{\text{eau}}(T - T_{i,\text{eau}})}{m_{\text{Or}}(T - T_{i,\text{Or}})} = -\frac{1 \times 4185 \times (14,66 - 10)}{12,4 \times (14,66 - 26,85)}$$

Finalement, on obtient  $c_{\text{Or}} = 129 \text{ J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1} = 30,8 \text{ cal.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$

### 5.) Mélange Glace-Mercure

- A. **Faux.** Par définition de la chaleur, lorsqu'on les met en contact, le corps le plus chaud cède de la chaleur au corps le plus froid, jusqu'à ce qu'ils atteignent une température commune,  $T$ . Ici le mercure cède de la chaleur à la glace avec  $Q_{\text{cédée,Hg}} > 0$  et inversement  $Q_{\text{reçue,Hg}} < 0$ .
- B. **Faux.** Puisque la glace a entièrement fondu, la chaleur cédée par le mercure est nécessairement supérieure ou égale à la chaleur à fournir pour la fusion de 40 g glace.
- C. **Vrai.** Si la température finale atteint  $0^\circ\text{C}$  et que la glace a entièrement fondu alors la chaleur cédée par le mercure doit nécessairement être égale à la chaleur à fournir pour la fusion de la glace. On peut le vérifier par le calcul:

La chaleur cédée par le mercure est:

$$Q_{\text{cédée,Hg}} = -Q_{\text{reçue,Hg}} = -m_{\text{Hg}}c_{\text{Hg}}(T - T_{i,\text{Hg}}) = -1 \times 133,6 \times (0 - 100) = 133,6 \times 10^2 \text{ J.}$$

Et la chaleur à fournir pour la fusion est:

$$Q_{\text{fusion,eau}} = mL_f = 0,04 \times 334 \times 10^3 = 133,6 \times 10^2 \text{ J.}$$

On a bien  $Q_{\text{cédée,Hg}} = Q_{\text{fusion,eau}}$ .

- D. **Vrai.** Avec une masse de glace plus petite, la chaleur cédée par le mercure serait supérieure à la chaleur à fournir pour la fusion et le surplus serait utilisé pour chauffer l'eau liquide à une température supérieure à  $0^\circ\text{C}$ .

### 6.) Compression adiabatique

- A. Vrai. La transformation est adiabatique donc  $Q = 0$  et  $\Delta U = W + 0 = W$  : la variation d'énergie interne correspond au travail reçu par le gaz  $W=200$  J donc  $U$  augmente de 200 J
- B. Faux. (cf réponse A)
- C. Faux. (cf réponse A)
- D. Faux. La transformation est adiabatique donc  $Q = 0$
- E. Faux. Idem réponse D.

### 7.) Transformations d'un gaz parfait

- A. Faux. Du point 1 au point 2, le gaz subit bien une transformation isotherme, mais son volume augmente: c'est une détente, et non une compression. De même, l'étape suivante est une compression, et non une détente.
- B. Faux. Du point 1 au point 2, le volume du gaz décroît à température constante: c'est bien une compression isotherme. La dernière transformation du point 3 au point 4 est aussi fidèle, car le gaz augmente son volume à pression constante, et c'est donc bien une transformation isobare qui le ramène à son volume initial. Toutefois, la transformation du point 2 au point 3, bien qu'elle soit une détente, ne peut être adiabatique. En effet, d'après le 1er principe de la thermodynamique, en l'absence de transfert de chaleur  $Q$ , la variation d'énergie interne  $\Delta U$  du gaz est égale au travail  $W$  reçu par ce gaz au cours de la transformation. Comme le volume du gaz augmente, alors  $W < 0$ , donc son énergie interne diminue. Pour un gaz parfait, on a  $U = \frac{3}{2}nRT$ , donc la température diminue. Lors d'une détente adiabatique, le gaz ne peut donc que refroidir, ce qui n'est pas le cas de la transformation de 2 à 3 où le gaz s'échauffe.
- C. Faux. On a ici une détente suivie d'une compression, et non d'une compression suivie d'une détente.
- D. Vrai. Comme pour le graphe B, Du point 1 au point 2 on a bien une compression isotherme. De même, la dernière transformation du point 3 au point 1 est bien une transformation isobare, et où le gaz retourne bien à son volume initial. Il reste la transformation de 2 à 3, qui comme pour le graphe B est bien une détente. En faisant le même raisonnement, on constate que cette fois le gaz se refroidit comme attendu, ce qui est cohérent avec une détente adiabatique.

### 8.) QCM K': Travail d'un gaz sur un diagramme $P-V$

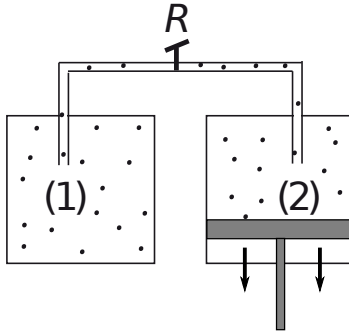
- A. **Vrai.** Le travail est donné par l'aire sous la courbe dans le diagramme  $P-V$ . Le segment  $B \rightarrow C$  se fait à une pression plus élevée que  $A \rightarrow D$ , donc l'aire (et donc le travail) est plus grande pour  $A \rightarrow B \rightarrow C$ .
- B. **Vrai.** Lors d'un segment vertical, le volume est constant, donc  $W = \int P dV = 0$ .
- C. **Vrai.** Le chemin diagonal se situe entre les deux chemins horizontaux: son aire est donc intermédiaire. On a  $W_{ADC} < W_{\text{diag}} < W_{ABC}$ .
- D. **Vrai.** Pour un gaz idéal, l'énergie interne dépend uniquement de la température, donc uniquement de l'état. Puisque les trois chemins relient les mêmes états, la variation d'énergie interne  $\Delta U$  est la même.

### 9.) Énergie interne

- B. Vrai. Le deuxième récipient étant vide, le gaz ne rencontre aucune pression lors de sa détente. Le gaz G ne fournit donc aucun travail pour se détendre:  $\rightarrow W = P\Delta V = 0$ . De plus, les parois sont thermiquement isolantes  $\rightarrow Q = 0$ , donc

$$\Delta U = Q + W = 0$$

Note: pour mieux visualiser le travail du gaz, on peut imaginer que la paroi inférieure du deuxième récipient est remplacée par un piston. Si ce piston ne présente aucune résistance au mouvement, alors on est dans la même situation que dans l'exercice et le gaz ne doit fournir aucun travail pour pousser le piston et se détendre. À l'inverse, si le piston présente une résistance au mouvement, alors le gaz doit fournir un travail pour pousser le piston.



10.) **Désorption :**

C. Vrai. Le soda contient 3.6 g de  $\text{CO}_2$  par litre. En buvant 0.5 litre de soda, la personne ingurgite 1.8 g de  $\text{CO}_2$ . Dans l'estomac la pression est de 1 atm de  $\text{CO}_2$ . Il faut calculer la masse de  $\text{CO}_2$  restant dans le soda sous 1 atm à  $37^\circ\text{C}$ :

$$\begin{aligned} \frac{m_{\text{CO}_2}^{\text{soda}}}{V_{\text{soda}}} &= K_{\text{CO}_2}^{\text{eau}}(37^\circ\text{C}) \cdot P_{\text{CO}_2}^{\text{gaz}} \\ m_{\text{CO}_2}^{\text{soda}} &= V_{\text{soda}} \cdot K_{\text{CO}_2}^{\text{eau}}(37^\circ\text{C}) \cdot P_{\text{CO}_2}^{\text{gaz}} \\ m_{\text{CO}_2}^{\text{soda}} &= 0.5 \text{ litre} \cdot 1.1 \frac{\text{g}}{\text{litre} \cdot \text{atm}} \cdot 1 \text{ atm} = 0.55 \text{ g} \end{aligned}$$

Il est donc sorti du liquide  $m_{\text{CO}_2}^{\text{gaz}} = 1.8 \text{ g} - 0.55 \text{ g} = 1.25 \text{ g}$  de  $\text{CO}_2$  qui se retrouve dans le gaz. Cela représente un nombre de moles en phase gazeuse de :

$$n_{\text{CO}_2}^{\text{gaz}} = \frac{m_{\text{CO}_2}^{\text{gaz}}}{M_{\text{CO}_2}^{\text{mol}}} = \frac{1.25 \text{ g}}{44 \text{ g/mol}} = 0.0284 \text{ mol}$$

A  $37^\circ\text{C}$ , une mole occupe un volume de 25.4 litres. Donc le volume de  $\text{CO}_2$  gazeux sera de 0.72 litre.

11.) **QCM K': Diffusion et dissolution d'un gaz dans un liquide**

A. **Vrai.** La cinétique de diffusion vers une nouvelle concentration de saturation s'écrit

$$c_A^B(t) = c_{A,i}^{B,\text{sat}} + (c_{A,f}^{B,\text{sat}} - c_{A,i}^{B,\text{sat}}) \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t\right) \right].$$

Pour  $t = T_{1/2}$ ,

$$1 - \exp(-\ln 2) = 1 - \frac{1}{2} = \frac{1}{2},$$

donc

$$c_A^B(T_{1/2}) = c_{A,i}^{B,\text{sat}} + \frac{1}{2}(c_{A,f}^{B,\text{sat}} - c_{A,i}^{B,\text{sat}}),$$

soit la moitié de l'écart entre les valeurs initiale et finale.

B. **Vrai.** Le demi-temps caractéristique de diffusion est proportionnel à  $L^2$ :

$$T_{1/2} \propto \frac{L^2}{D_{AB}}.$$

Si  $L$  est multiplié par 3, on obtient

$$T'_{1/2} = \frac{(3L)^2}{D_{AB}} = 9 \frac{L^2}{D_{AB}} = 9T_{1/2}.$$

C. **Faux.** La distance de diffusion est donnée par

$$d = \sqrt{2D_{AB}t}.$$

Pour  $D_{AB} = 1.0 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  et  $t = 1000 \text{ s}$ ,

$$d = \sqrt{2 \times 10^{-9} \times 1000} = \sqrt{2 \times 10^{-6}} \approx 1.4 \times 10^{-3} \text{ m} = 1.4 \text{ mm}.$$

La distance caractéristique est donc du *millimètre*, pas du micromètre.

D. **Vrai.** Un coefficient de diffusion plus grand signifie que les molécules se déplacent plus rapidement dans le liquide. La distance  $d = \sqrt{2D_{AB}t}$  croît plus vite, et le demi-temps de diffusion  $T_{1/2} \propto L^2/D_{AB}$  diminue. La nouvelle concentration de saturation est donc atteinte plus rapidement.

## 12.) Moteur de Stirling

A. Lors des transformations BC et AD, le volume est constant : ce sont les transformations isovolumentiques. Les transformations AB et CD se font à températures constantes : ce sont les transformations isothermes. Identifions maintenant ces 2 isothermes. L'isotherme  $T_2$  est au dessus de l'isotherme  $T_1$ , donc  $T_2 = T_C$  et  $T_1 = T_F$ . Ainsi, le chemin CD correspond à l'étape 2, et le chemin AB à l'étape 4. Sur l'isotherme  $T_C$ , le gaz subit une détente, le chemin CD est donc parcouru de gauche à droite. Sur l'isotherme  $T_F$ , le gaz subit une compression, le chemin AB est donc parcouru de droite à gauche. On en conclut que le cycle est parcouru dans le sens horaire (ABCD). La transformation BC chauffe donc le gaz de la température  $T_1 = T_F$  à la température  $T_2 = T_C$  : c'est donc l'étape 1. Enfin la transformation AD refroidit le gaz de la température  $T_2 = T_C$  à la température  $T_1 = T_F$  : c'est l'étape 3.

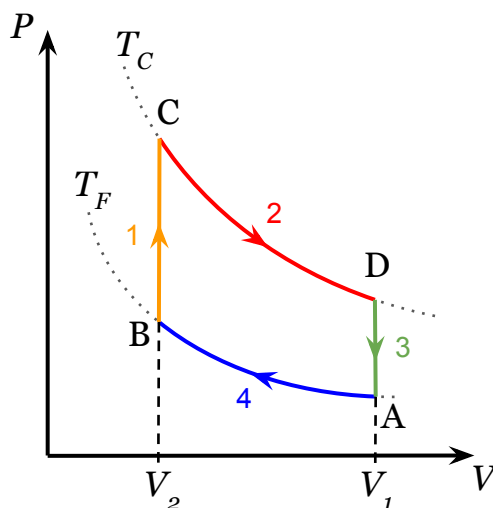


Figure 1: Diagramme PV montrant le cycle d'un moteur de Stirling.

B. L'énergie interne pour un gaz parfait monoatomique est donnée par l'expression  $U = \frac{3}{2}nRT$ . Lors d'une transformation isotherme, la température reste constante, c'est donc aussi le cas de l'énergie interne. Ainsi, lors des transformations CD et AB,  $\Delta U_{CD} = \Delta U_{AB} = 0$ . Lors de la transformation BC, on a  $\Delta U_{BC} = \frac{3}{2}nR(T_C - T_F) = 15\text{kJ}$ . Lors de la transformation 3, on a  $\Delta U_{DA} = \frac{3}{2}nR(T_F - T_C) = -15\text{kJ}$ . Au total sur tout le cycle, la variation d'énergie interne vaut:

$$\Delta U_{BCDAB} = \Delta U_{BC} + \Delta U_{CD} + \Delta U_{DA} + \Delta U_{AB} = 0. \quad (1)$$

Ce résultat est attendu, car l'état final du gaz est le même que son état initial. Comme l'énergie interne est une fonction d'état, elle a donc la même valeur pour l'état final et l'état initial, donc  $\Delta U_{BCDAB} = 0$ .

C. Lors de la transformation BC, le volume de varie pas, donc le travail reçu  $dW = -PdV$  est nul. D'après le premier principe de la thermodynamique, on a alors  $\Delta U_{BC} = Q_{BC}$ , la variation d'énergie interne est égale au transfert de chaleur. D'après la question précédente, on a donc  $Q_{BC} = 15\text{kJ}$ .

D. En suivant le même raisonnement sur la transformation DA, on trouve que le travail est lui aussi nul, et que le transfère de chaleur vaut  $Q_{DA} = -15\text{kJ}$ .

E. Lors de la transformation CD, le gaz se détend, donc son volume augmente. On a donc  $dW = -PdV < 0$ : le gaz fournit un travail. Lors de la transformation AB, le gaz est comprimé, donc son volume diminue. On a alors  $dW = -PdV > 0$ : le gaz reçoit un travail.

F. Le travail total sur le cycle est la somme des travaux sur toutes les étapes:

$$\begin{aligned} W_{BCDAB} &= W_{BC} + W_{CD} + W_{DA} + W_{AB} \\ &= 0 + W_{CD} + 0 + W_{AB} \\ &= W_{CD} + W_{AB}. \end{aligned} \quad (2)$$

Pour connaître le signe du travail total, il nous faut donc savoir lequel des travaux  $W_{CD}$  et  $W_{AB}$  est le plus grand en valeur absolue. Or on sait que pour un transformation d'un état initial  $I$  à un état final  $F$ , le travail vaut:

$$W_{I \rightarrow F} = - \int_I^F P(V) dV \quad (3)$$

donc le travail sur la transformation  $I \rightarrow F$  vaut l'opposé de l'aire (algébrique) sous la courbe correspondant à cette transformation dans le diagramme PV. Or, on voit dans le diagramme PV du moteur de Stirling que l'aire sous la courbe de la transformation CD est plus grande que l'aire sous la courbe de la transformation AB, donc  $|W_{CD}| > |W_{AB}|$ . Comme  $W_{CD} < 0$ , on a donc:

$$W_{BCDAB} = W_{CD} + W_{AB} < 0. \quad (4)$$

Le gaz fournit donc du travail au cours d'un cycle du moteur de Stirling.

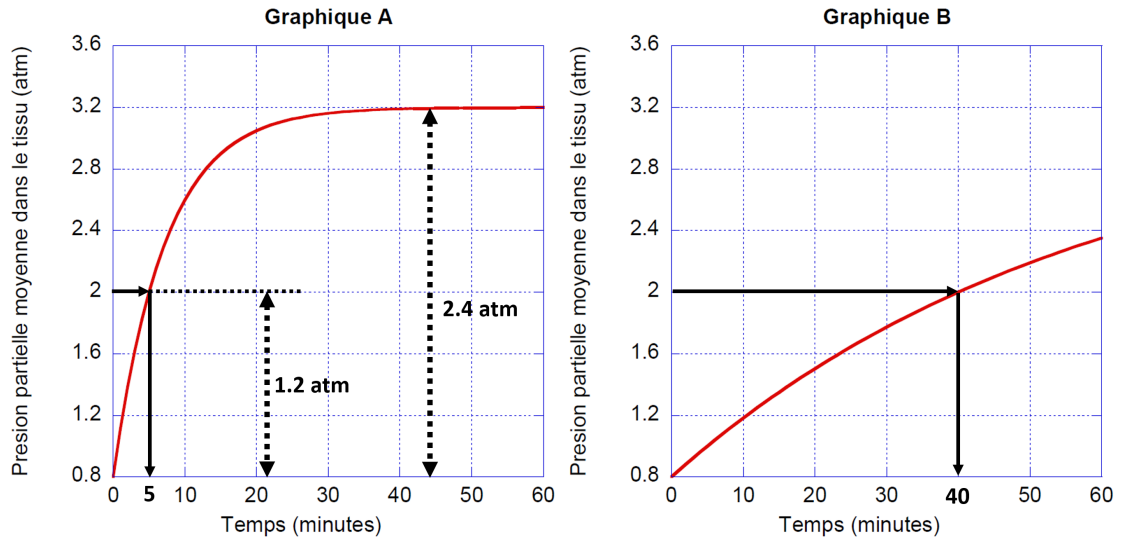
G. Le premier principe de la thermodynamique donne  $\Delta U_{BCDAB} = W_{BCDAB} + Q_{BCDAB}$ . Or on sait d'après la question B que  $\Delta U_{BCDAB} = 0$ . On a donc  $-W_{BCDAB} = Q_{BCDAB}$ . Ainsi, le travail fourni par le gaz est égal au total des transferts thermiques ayant lieu durant tout le cycle. Le moteur de Stirling converti donc ces transferts thermiques en travail. En d'autres mots, le moteur de Stirling génère de l'énergie mécanique à partir de l'énergie issue d'un différentiel thermique entre deux sources de chaleur.

### 13.) Plongée sous-marine :

- A. La pression partielle sur le graphique A évolue bien plus rapidement dans le temps que le graphique B, il correspond donc à la diffusion de  $N_2$  dans le cerveau, où le temps caractéristique  $T_{1/2}$  est plus court.
- B.  $T_{1/2}$  correspond au temps nécessaire pour atteindre la moitié de la variation entre situation initiale et finale.

Ici, sur le graphique A on observe que la pression tend à se stabiliser à 3.2 atm, il s'agit donc de la pression partielle de  $N_2$  à l'équilibre. Le point de départ, à la surface, est une pression partielle de  $N_2$  :  $P_{N_2}^{\text{tissu}}(t = 0) = 0.8P_{\text{atm}} = 0.8 \text{ atm}$  (cette valeur est confirmée sur le graphique pour  $t = 0$  min) en considérant 80% d'azote dans l'air. L'augmentation de la pression partielle  $P_p$  est donc de  $3.2 \text{ atm} - 0.8 \text{ atm} = 2.4 \text{ atm}$ .

La moitié de la variation entre situation initiale et finale correspond ainsi à une augmentation de 1.2 atm, soit  $P_{N_2}^{\text{tissu}}(t = T_{1/2}) = 0.8 + 1.2 = 2 \text{ atm}$ . Celle-ci est atteinte à  $t = T_{1/2} = 5 \text{ min}$  pour le cerveau (graphique A) et  $t = T_{1/2} = 40 \text{ min}$  pour la peau (graphique B), comme illustré sur les graphiques suivants:



Remarque: attention, la moitié de la pression de saturation  $\frac{1}{2}P_{\text{sat}}$  est différente de la moitié de la saturation (ou variation entre situation initiale et finale), qui est la moitié du chemin! Le chemin "démarré" de 0.8 atm, la moitié du chemin pour arriver à 3.2 atm se trouve bien à 2 atm (et non à  $\frac{3.2}{2} = 1.6$ ).

- C. La pression partielle d'azote atteint 3.2 atm à l'équilibre. Sachant que l'azote représente 80% de l'air standard, la pression absolue atteint  $P_{\text{abs}} = \frac{3.2}{0.8} = 4$  atm. La pression sous une colonne d'eau de hauteur  $h$  vaut  $P_{\text{abs}} = P_{\text{atm}} + P_{\text{eau}} = P_{\text{atm}} + \rho gh$ , donc :

$$h = \frac{P_{\text{abs}} - P_{\text{atm}}}{\rho g} = \frac{4 \cdot 10^5 - 1 \cdot 10^5}{10^3 \times 10} = 30 \text{ m}$$

Remarque: attention à bien convertir la pression en unités SI avant le calcul, c'est à dire en Pa, où 1 atm = 101325 Pa  $\simeq 10^5$  Pa.

- D. Oui, étant donné que sa pression partielle d'azote (3.2 atm) dépasse 3 atm.  
 E. Au bout de  $t = T_{1/2} = 10$  min, la pression partielle atteint la moitié de la saturation (moitié du chemin), soit :

$$P_{\text{N}_2}^{\text{tissu}}(t = 10 \text{ min}) = \frac{P_{\text{sat}} - P_{\text{N}_2}^{\text{tissu}}(t = 0)}{2} + P_{\text{N}_2}^{\text{tissu}}(t = 0) = \frac{3.2 \text{ atm} - 0.8 \text{ atm}}{2} + 0.8 \text{ atm} = 2 \text{ atm}$$

Remarque: au bout de  $t = T_{1/2}$  pour chaque tissu (5 min pour le cerveau, 40 min pour la peau et 10 min pour un tissu de moelle épinière), la pression partielle d'azote est identique, 2 atm.

Au bout de  $T_{1/2} = 10$  min, le coefficient  $R$  atteint  $R = \frac{P_{\text{N}_2}^{\text{tissu}}}{P_{\text{N}_2}^{\text{gaz}}} = \frac{2 \text{ atm}}{3.2 \text{ atm}} = 0.625$ , où  $P_{\text{N}_2}^{\text{gaz}}$  correspond à la pression partielle d'azote dans l'air délivrée par le détendeur.

- F. Une fois l'équilibre atteint,  $P_{\text{N}_2}^{\text{tissu}} = 3.2$  atm, alors  $R = 1$ .  
 Remarque: à l'équilibre, le coefficient  $R$  atteint toujours 1, c'est à dire qu'on a laissé suffisamment de temps à la pression partielle dans le tissu pour s'équilibrer avec le gaz.  
 G. Dans cette situation,  $R$  n'atteint jamais 2! Nous sommes en phase de plongée, si bien qu'avant l'équilibre  $R < 1$  (sous-saturation) et à l'équilibre  $R = 1$  (saturation). Le régime de sur-saturation  $R > 1$  ne peut être atteint que dans la phase de remontée, où la pression du gaz fournie par le détendeur va diminuer plus vite que la pression partielle du gaz dissous.  
 H. Comme expliqué dans la réponse G, la phase de plongée correspond à un régime de sous-saturation ( $R \leq 1$ ) car le plongeur va vers des pressions plus élevées, en opposition la phase de remontée correspond à un régime de sur-saturation ( $R \geq 1$ ) car le plongeur va vers des pressions plus

basses. À l'équilibre,  $R$  atteint 1 dans toutes les situations : c'est là l'intérêt de remonter en effectuant des paliers pour laisser le temps au coefficient  $R$  de se rapprocher de 1 et d'éviter une sur-saturation trop importante.

- I. Le régime de sur-saturation est dangereux pour le plongeur car il y a un risque de formation de bulles d'azote dans les vaisseaux. Les bulles qui commencent à se former ne sont plus écrasées par la pression ambiante, elles peuvent donc se développer (comme dans le cas de l'ébullition). On parle de décompression brutale, cela peut se produire lors de la phase de remontée si elle est trop rapide.
- J. Après la remontée,  $P_{N_2}^{\text{tissu}} \leq P_{N_2, \text{max}}^{\text{tissu}}$  où  $P_{N_2, \text{max}}^{\text{tissu}}$  correspond à la pression atteinte en profondeur. Le cas extrême d'une remontée très rapide (instantanée) correspond alors au cas où la pression partielle dans le tissu n'a pas eu le temps de se stabiliser : une fois le plongeur remonté elle est donc encore égale à la pression dans le tissu lorsque le plongeur était en profondeur. Pour évaluer les conditions à risque, on cherche à déterminer la profondeur où le coefficient de saturation  $R_{\text{max}}$  (qui correspond à une pression dans le tissu maximale) peut dépasser 2. Alors:

$$R_{\text{max}} > 2$$

$$\frac{P_{N_2, \text{max}}^{\text{tissu}}}{P_{N_2}^{\text{gaz}}} > 2$$

$$P_{N_2, \text{max}}^{\text{tissu}} > 2P_{N_2}^{\text{gaz}}$$

En surface,  $P_{N_2}^{\text{gaz}} = 0.8 \text{ atm}$ ,  $R_{\text{max}} > 2$  correspond donc à  $P_{N_2, \text{max}}^{\text{tissu}} > 1.6 \text{ atm}$ . Cela correspond à une pression d'air délivrée par le détendeur en profondeur (sachant qu'il y a 80% d'azote) de  $\frac{1.6}{0.8} = 2 \text{ atm}$ . Cette pression est atteinte à 10 m de profondeur (voir calcul détaillé en C pour 30 m), si bien qu'au delà le coefficient de saturation est susceptible d'être supérieur à 2 dans le cas d'une remontée rapide.