

Devoir de Physique-Chimie n°7

Durée : 4 heures

Calculatrice autorisée

Ce sujet comporte 4 exercices totalement indépendants qui peuvent être traités dans l'ordre souhaité.

L'énoncé est constitué de 11 pages.

Consignes générales

- Lire la totalité de l'énoncé et commencer par les exercices les plus abordables.
- Un résultat d'une question précédente peut être admis pour poursuivre l'exercice.

Présentation de la copie

- **Encadrer** les expressions littérales et souligner les résultats numériques.
- **Numéroter les pages** sous la forme x/nombre total de pages.

Rédaction

- Faire des **schémas** grands, beaux, complets, lisibles.
- Justifier toutes vos réponses.
- Les **relations** doivent être **homogènes**.
Les résultats littéraux non homogènes entraîneront la perte de tous les points de la question.
- Applications numériques : avec 2 chiffres significatifs et avec **une unité**. Les résultats sans la bonne unité ne seront pas pris en compte.

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

Exercice 1 : Mesures thermodynamiques

(d'après ENSTIM 2008)

On rappelle que la variation d'enthalpie massique Δh d'un corps pur lors d'un changement d'état physique est aussi appelée « chaleur latente de changement d'état » et notée L .

Afin d'éviter les confusions, on notera le temps t , la température absolue T et la température en degrés Celsius θ ; pour les applications numériques : $T = \theta + 273$.

A. Expressions du premier principe

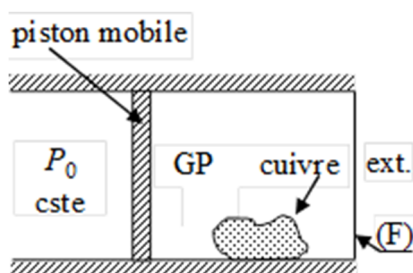
Q1. Rappeler l'expression du premier principe de la thermodynamique, entre deux états d'équilibre quelconques d'un système fermé globalement immobile dans le référentiel d'étude.

Expliquer très simplement la différence entre « travail » et « transfert thermique ».

Q2. On s'intéresse à des systèmes de variables d'état (P, V, T) , pour lesquels le seul travail est celui des forces pressantes ; à partir de l'expression précédente, démontrer la relation entre la variation d'enthalpie du système et le transfert thermique dans le cas particulier de transformations isobares.

B. Calorimétrie adiabatique

Le système étudié, constitué de n moles d'air assimilé à un gaz parfait et d'une masse m de cuivre solide, est contenu dans un cylindre schématisé ci-dessous ; on précise que :



- le piston est mobile sans frottement, les autres parois sont fixes ;
- les éléments hachurés sont athermanes (*i.e.* imperméables aux transferts thermiques), tandis que la paroi (F) permet ces transferts.

Données :

- coefficient de Laplace du gaz : $\gamma = 7/5$; $R = 8,314 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$; $n = 1 \text{ mol}$;
- capacité thermique massique du cuivre : $c = 385 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$; $m = 269 \text{ g}$;
- P_0 est constante ; les valeurs de γ et de c sont ici indépendantes de la température ;

Q3. Comment définit-on les capacités thermiques C_V et C_P d'un système thermodynamique ? Simplifier ces expressions dans le cas du gaz parfait et établir dans ce cas les expressions des capacités molaires $C_{V,M}$ et $C_{P,M}$ en fonction du coefficient γ et de la constante R des gaz parfaits.

Q4. La température extérieure étant restée très longtemps égale à T_0 , le fond (F) du cylindre est mis en contact avec une source (ou thermostat) à la température T_1 ; on laisse le système atteindre l'équilibre. Le volume V occupé par le gaz subit une diminution relative de 5 % à partir de la valeur initiale V_0 . En déduire la température Celsius finale si $\theta_0 = 27^\circ\text{C}$.

Q5. En fonction des températures et des données, exprimer la variation d'enthalpie du système lors de la transformation décrite ci-dessus, sous la forme $\Delta H = C' \cdot \Delta T$. Quelles propriétés essentielles de l'enthalpie utilise-t-on pour établir cette expression ?

Q6. En déduire l'expression du transfert thermique Q algébriquement reçu par le système à travers (F). Faire l'application numérique et interpréter son signe.

Q7. Exprimer et calculer la variation d'énergie interne ΔU du système.

Interpréter la différence entre ΔU et ΔH dans le cadre du premier principe.

On rappelle des expressions usuelles de la fonction d'état entropie S :

➤ $S_{GP}(T, V) = n.C_{V,M} \cdot \ln(T) + n.R \cdot \ln(V) + \text{cste}$ ou $S_{GP}(T, P) = n.C_{P,M} \cdot \ln(T) - n.R \cdot \ln(P) + \text{cste}$;

➤ $S_{\text{phase condensée}}(T) = C \cdot \ln(T) + \text{cste}$ pour une phase condensée de capacité thermique C .

Q8. En fonction des températures et de C' , exprimer l'entropie créée lors de la transformation. Faire l'application numérique et conclure.

C. Calorimètre à basse température

Sous pression atmosphérique, la température d'équilibre liquide-gaz du diazote est $T_e = 77,4$ K. Il est commode de conserver l'azote liquide dans un « vase de Dewar », c'est-à-dire un récipient bien isolé thermiquement (mais non parfaitement) et communiquant avec l'atmosphère : le faible apport d'énergie à travers le vase entretient une lente ébullition du liquide qui s'évapore lentement. On dispose ainsi d'une « source de froid » commode et économique.

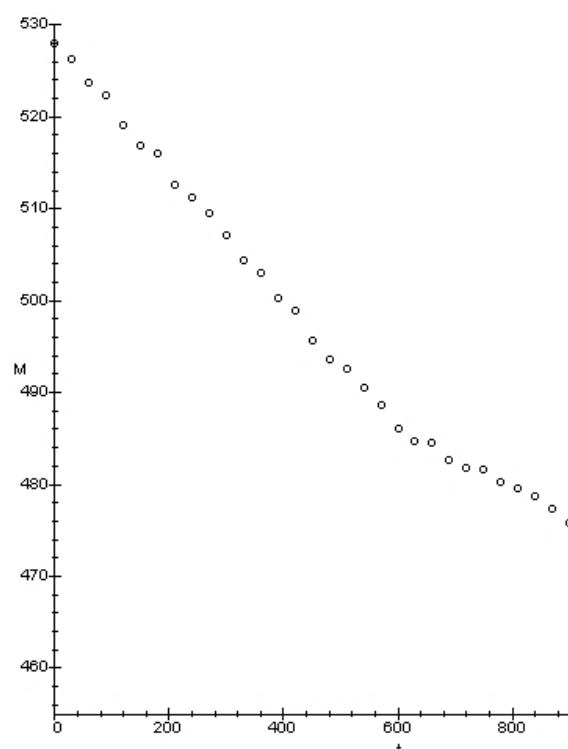
Afin de mesurer la chaleur latente L_v de vaporisation de l'azote sous pression constante, on place sur une balance électronique un vase Dewar ouvert contenant de l'azote liquide : la diminution de la masse mesurée M au cours du temps traduit l'évaporation de l'azote.

Le mode opératoire est le suivant :

phase (1) : entre $t = 0$ et $t = t_1$, on alimente une résistance R plongée dans le calorimètre : tension U et intensité I constantes ;

phase (2) : le chauffage est coupé à $t_1 = 10$ minutes.

La masse M mesurée en grammes est enregistrée à intervalles réguliers de $t = 0$ à $t_2 = 15$ minutes (figure ci-contre : t en secondes) ; on précise qu'à tout instant il reste de l'azote liquide dans le récipient.



Q9. Comment évolue la température du liquide supposé homogène (justifier) ?

Q10. Pourquoi la masse diminue-t-elle même en l'absence de chauffage ?

Pourquoi est-il difficile de l'empêcher ?

Q11. Pour chaque phase de l'expérience, estimer la masse d'azote évaporé (m_1 et m_2). Calculer le rapport noté r des vitesses d'évaporation (phase1/phase2).

Q12. On désigne par P_J la puissance apportée par effet Joule et par P celle des autres transferts thermiques, puissances algébriquement reçues par l'azote et supposées constantes. Établir pour chaque phase de l'expérience une relation entre m_1 , m_2 , L_v , P_J , P et les dates nécessaires.

Q13. En déduire une expression littérale de L_v indépendante de P , puis calculer sa valeur numérique si $U = 8,5$ V et $R = 10 \Omega$.

Exercice 2 : Composition chimique du gong

(D'après E3A PSI 2024)

Le gong désigne une variété d'instruments de musique de percussion en métal, originaires de l'Asie du Sud-Est. Sa sonorité est, entre autres, liée au matériau utilisé pour sa fabrication : le bronze, alliage de cuivre Cu et d'étain Sn . Cette sonorité dépend du pourcentage d'étain constituant le bronze. Le cuivre pur cristallise dans le système cubique faces centrées.

- Q1.** Représenter la maille conventionnelle, puis déterminer le nombre d'atomes de cuivre par maille. En adoptant le modèle des sphères dures indéformables, expliciter la relation entre le paramètre de maille a et le rayon métallique R_{Cu} .
- Q2.** Exprimer la masse volumique du cuivre ρ en fonction des données, puis calculer sa valeur.
- Q3.** Repérer puis dénombrer les sites octaédriques dans cette structure. Evaluer numériquement le rayon R_o d'un atome étranger pouvant occuper un tel site.
- Q4.** Le bronze est-il un alliage d'insertion ou de substitution ?

On propose un protocole expérimental permettant de mesurer le pourcentage massique d'étain du bronze constituant le gong. On plonge un échantillon du gong de masse $m = 3,00\text{ g}$ dans une solution aqueuse d'acide chlorhydrique ($H_3O^+_{(aq)} + Cl^-_{(aq)}$) de volume $V = 0,50\text{ L}$ et de concentration molaire $C = 0,10\text{ mol.L}^{-1}$. Un gaz se dégage ; son volume est mesuré grâce à un tube à dégagement introduit dans une éprouvette graduée remplie d'eau.

La figure 1 représente le diagramme E-pH de l'étain, tracé à 25°C pour une concentration totale en espèces dissoutes $c_T = 10^{-3}\text{ mol.L}^{-1}$. Il fait intervenir les espèces $SnO_{2(s)}$, $Sn_{(s)}$, $Sn^{2+}_{(aq)}$, $Sn^{4+}_{(aq)}$, $SnO^{2-}_{3(aq)}$ et $HSnO^-_{2(aq)}$.

- Q5.** Calculer le nombre d'oxydation de l'élément étain Sn dans les différentes espèces, puis attribuer à chacune d'elles son domaine d'existence ou de prédominance indiqué en chiffre romain dans le diagramme $E - pH$.
- Q6.** En utilisant le diagramme et la valeur de c_T , estimer la valeur du potentiel standard du couple $Sn^{2+}_{(aq)}/Sn_{(s)}$. Comparer à la valeur donnée en fin d'exercice.
- Q7.** Déterminer la pente séparant les domaines d'existence de $Sn_{(s)}$ et $SnO_{2(s)}$.

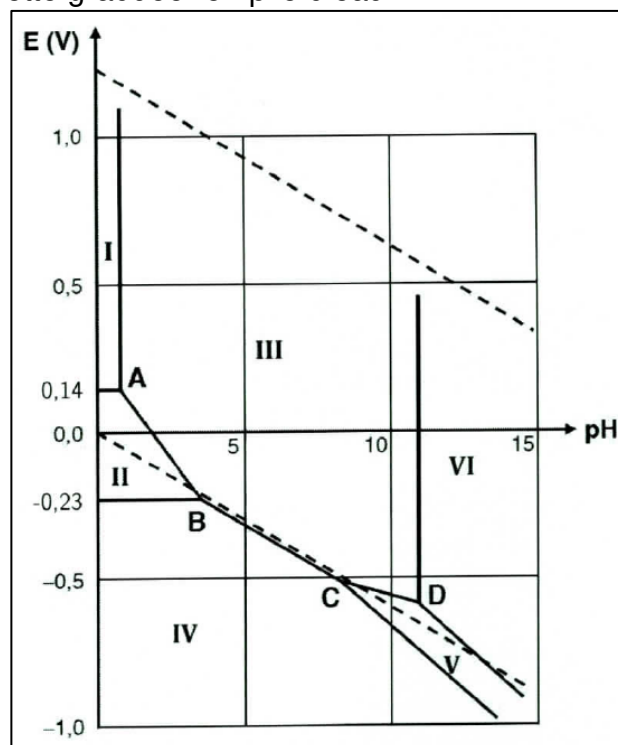


Figure 1: Diagramme E-pH de l'étain

On superpose au diagramme $E - pH$ de l'étain celui de l'eau, en traits pointillés (cf. figure 1), tracé à 25°C pour une pression totale en espèces gazeuses $P_T = 1\text{ bar}$.

- Q8.** Que peut-on dire des domaines de stabilité de $Sn_{(s)}$ et $H_2O_{(l)}$? En déduire l'équation de la réaction qui va se produire si on introduit un morceau d'étain $Sn_{(s)}$ dans une solution aqueuse très acide et identifier le gaz qui s'en échappe.

Par un raisonnement équivalent, on admet que l'introduction d'un morceau de cuivre $Cu_{(s)}$ dans une solution aqueuse très acide ne provoque aucune transformation chimique : le cuivre solide est stable dans l'eau en milieu acide.

Q9. Exprimer le volume molaire V_m d'un gaz supposé parfait en fonction de sa température T et de sa pression P . Calculer numériquement V_m à $T = 293\text{ K}$ et $P = 1,013\text{ bar}$.

Q10. En appliquant le protocole proposé, on mesure en fin d'expérience un volume de gaz $V_f = 153\text{ mL}$. En détaillant votre raisonnement, déterminer la masse d'étain m_{Sn} dans l'échantillon de bronze étudié, puis son titre massique d'étain w_{Sn} .

Données :

Nombre d'Avogadro : $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}\text{ mol}^{-1}$

Constante des gaz parfaits : $R = 8,314\text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$

Propriétés atomiques :

Élément	Cu	Sn
Rayon métallique (pm)	128	151
Masse molaire ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$)	63,5	118,7

Potentiels standard :

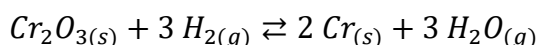
	$\text{Sn}_{(aq)}^{2+}/\text{Sn}_{(s)}$	$\text{O}_{2(g)}/\text{H}_2\text{O}_{(l)}$	$\text{H}_{(aq)}^+/\text{H}_{2(g)}$
$E^\circ (\text{V})$	-0,137	1,23	0

Exercice 3 : Divers exercices de chimie

(D'après Banque PT 2023)

Partie A : réduction de l'oxyde de chrome par le dihydrogène

Le premier réducteur utilisé pour réduire l'oxyde de chrome (III) Cr_2O_3 en chrome métallique solide fut le dihydrogène qui est alors oxydé en vapeur d'eau selon la réaction :



Dans un récipient de volume $V = 10$ L, initialement vide, on introduit 0,1 mol de dihydrogène gazeux et $5,0 \cdot 10^{-4}$ mol de Cr_2O_3 solide. Le récipient est porté à 1300 K. La constante d'équilibre K° de la réaction est alors égale à $1 \cdot 10^{-9}$.

- Q1.** Comment peut-on qualifier cette réaction au vu de la valeur de sa constante d'équilibre ?
- Q2.** Donner les deux couples oxydant/réducteur qui interviennent dans cette réaction et donner la demi-équation associée à chacun.
- Q3.** Donner l'expression du quotient réactionnel en fonction des pressions partielles.
- Q4.** Etablir le tableau d'avancement de la réaction.
- Q5.** Calculer, à l'équilibre, l'avancement de la réaction et le nombre de moles de chrome formé.

Partie B : étude thermodynamique d'une pile

On considère deux solutions aqueuses :

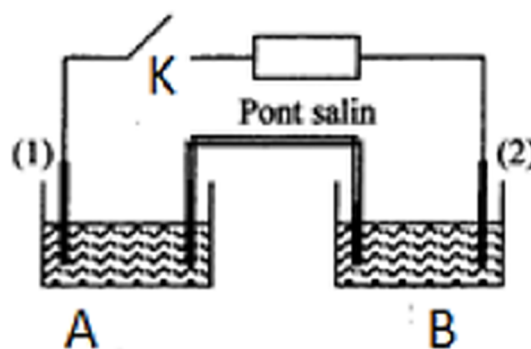
- Une solution A contenant des ions Fe^{3+} et des ions Fe^{2+} de concentrations égales et ayant pour valeurs $0,06 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.
- Une solution B acidifiée contenant des ions $Cr_2O_7^{2-}$ et des ions Cr^{3+} de concentrations égales chacune à $0,06 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, le pH de cette solution étant égal à 0 (le pH est maintenu constant grâce à une solution tampon).

Données :

- On prendra $\frac{RT}{F} \ln X = 0,06 \log X$
- $E_1^\circ(Cr_2O_7^{2-}/Cr^{3+}) = 1,33 \text{ V}$
- $R = 8,3 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- $E_2^\circ(Fe^{3+}/Fe^{2+}) = 0,77 \text{ V}$

On constitue à l'aide de ces solutions une pile grâce à un pont salin. On néglige toutes surtensions aux électrodes ainsi que le potentiel de jonction du pont salin. Chaque compartiment a un volume de 1 litre.

On réalise le circuit présenté sur la figure ci-contre. La pile est insérée dans un circuit contenant une résistance et un interrupteur.



- Q6.** Déterminer le potentiel d'électrode de chaque électrode. Quelle est la polarité de la pile ? Calculer sa force électromotrice.
- Q7.** On ferme l'interrupteur K. Donner l'équation de la réaction qui a lieu. Préciser l'anode et la cathode.
- Q8.** Quel est le rôle du pont salin ?
- Q9.** Calculer la constante d'équilibre de cette réaction d'oxydoréduction.
- Q10.** Déterminer la concentration des différentes espèces présentes en quantité notable dans les solutions lorsque la pile est « usée ».

Partie C : étude d'une solution contenant du laiton dissous

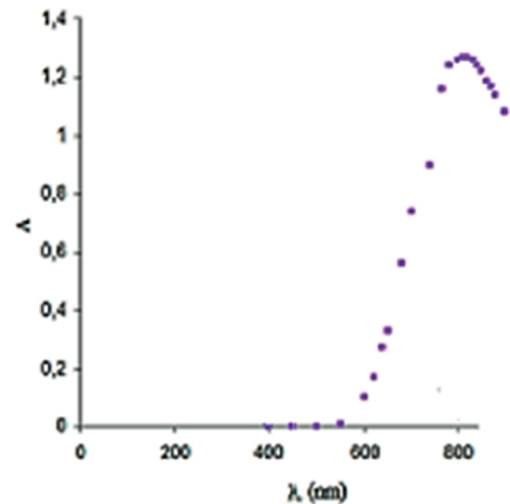
Les laitons sont des alliages à base de cuivre et de zinc, contenant de 5 à 45 % en masse de zinc. En modifiant la teneur en zinc, on peut moduler les propriétés physiques des laitons (températures de changement d'état, conductivités thermiques et électriques, dureté...).

On se propose dans cette partie de déterminer le pourcentage massique en zinc d'un laiton.

On dispose de 5 mL d'une solution aqueuse dans laquelle ont été préalablement dissous 24 mg d'un laiton. Cette solution est étiquetée « laiton dissous ». Les ions cuivre Cu^{2+} forment un complexe coloré avec l'eau, de formule $\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_6^{2+}$. Le complexe $\text{Zn}(\text{H}_2\text{O})_6^{2+}$ avec les ions Zn^{2+} est quant à lui incolore.

Donnée : $M_{\text{Cu}} = 64 \text{ g.mol}^{-1}$

On trace le spectre d'absorption des ions cuivre. On obtient le graphe de la figure ci-contre :

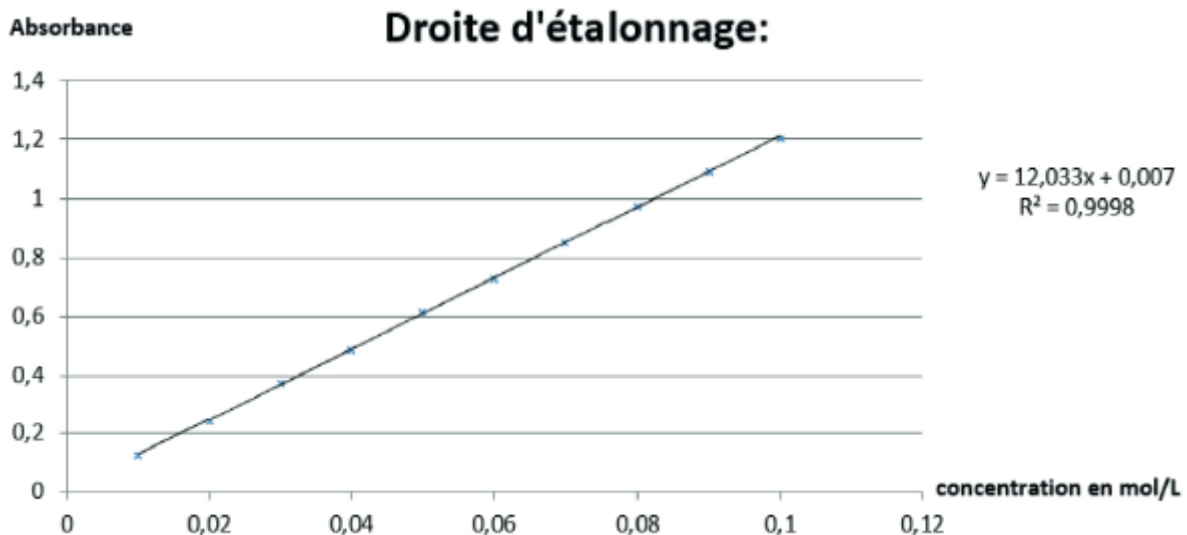


Q11. On décide de travailler à une longueur d'onde de 808 nm. Justifier ce choix.

Pour déterminer la concentration de la solution inconnue, on réalise une série de mesures d'absorbance à différentes concentrations. On obtient le tableau de mesures suivant :

$c \text{ (mol.L}^{-1}\text{)}$	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1
A	0,122	0,242	0,375	0,488	0,616	0,728	0,851	0,974	1,089	1,203

On trace alors le graphe $A = f(c)$ dont l'allure est donnée sur la figure ci-dessous.



Q12. Justifier l'allure de ce graphe à l'aide d'une loi que l'on précisera.

Q13. L'absorbance mesurée pour la solution de laiton est de 0,62. En déduire la concentration approximative de la solution en ions cuivre.

Q14. Quels sont les pourcentages massiques de cuivre et de zinc de ce laiton ? Conclure.

Exercice 4 : Sous-marins

(D'après CCINP TSI 2012)

Partie A : Question de cours

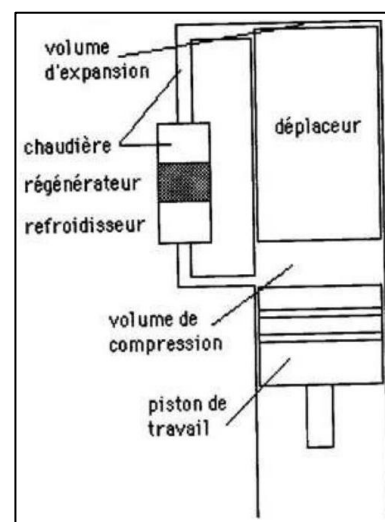
- Q1.** Proposer un schéma de principe pour un moteur ditherme.
- Q2.** Donner l'expression du rendement pour ce moteur ditherme.
- Q3.** Ecrire le 1^{er} principe et le 2^{ème} principe de la thermodynamique pour ce système. En déduire l'inégalité de Clausius dans ce cas.
- Q4.** Etablir alors l'expression du rendement de Carnot pour un moteur ditherme.
- Pour pouvoir atteindre le rendement de Carnot, les échanges thermiques avec les deux sources sont alors nécessairement isothermes (pour assurer la réversibilité). Lorsque le fluide n'est pas en contact avec les sources, l'évolution est forcément adiabatique réversible (et donc isentropique).
- Q5.** Représenter le cycle correspondant, appelé cycle de Carnot, pour un gaz parfait dans un diagramme de Watt (P, V). Justifier l'allure des différentes étapes sur le diagramme.

Partie B : Moteur Stirling

Le moteur Stirling a été développé au XIX^e siècle et a rapidement été délaissé au profit des moteurs à combustion interne (à essence et diesel) ; il pourrait cependant connaître un essor significatif dans le futur compte-tenu, entre autres, des avantages qu'il présente en matière de protection de l'environnement. Par exemple, le sous-marin civil SAGA développé dans les années 80 et destiné à l'industrie pétrolière offshore est équipé d'un moteur Stirling.

La structure du moteur est représentée sur la figure ci-contre.

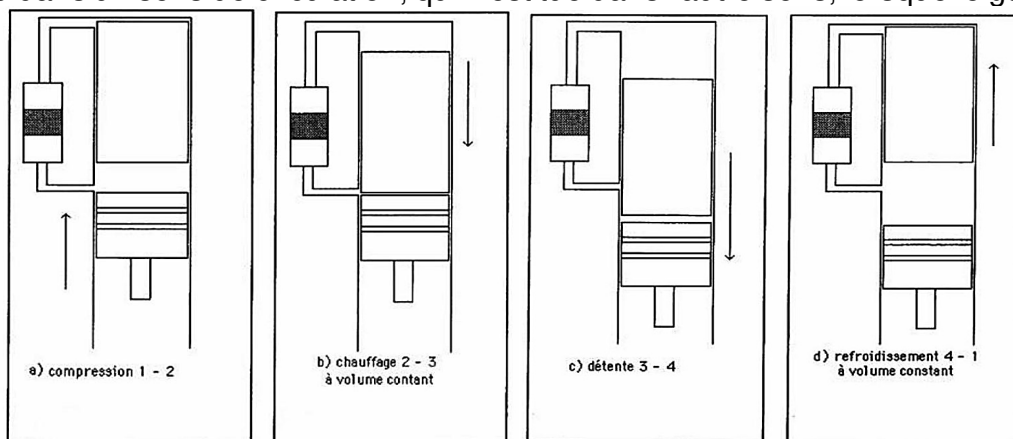
Dans une enceinte principale, peuvent se mouvoir d'une part un piston de travail et d'autre part un déplaceur, dont le rôle est de transvaser le fluide de travail depuis le volume de compression (zone froide) vers le volume d'expansion (zone chaude) et réciproquement ; lors du transvasement, le fluide parcourt dans un sens ou dans l'autre la chaudière à la température T_3 , le régénérateur et le refroidisseur à la température T_1 .



Le fluide de travail décrit le cycle constitué des 4 phases suivantes :

- pendant la phase de compression 1-2, le déplaceur se trouve en position haute et le fluide, entièrement situé dans la zone froide, est comprimé par le piston de travail dans sa course vers le haut.
- Au point 2, le piston est au point mort haut et le déplaceur est ramené en position basse, ce qui a pour effet de transvaser le fluide comprimé, qui passe pendant la phase 2-3 de la zone froide vers la zone chaude, commençant par se réchauffer dans le régénérateur puis recevant un transfert thermique de la chaudière.
- Pendant la phase de détente 3-4, le fluide se détend dans le volume d'expansion où il continue d'être chauffé par les tubes de la chaudière. Cette détente a pour effet de repousser le déplaceur et le piston de travail vers le bas.
- Pendant la phase 4-1, après que le piston ait atteint le point mort bas, le déplaceur est ramené en position haute, ce qui a pour effet de transvaser le fluide de la zone chaude (volume d'expansion) vers la zone froide (volume de compression). Au cours de ce transfert, le fluide commence par céder un transfert thermique au régénérateur, puis il est refroidi par le refroidisseur.

En pratique, le régénérateur est un échangeur de chaleur : il reçoit un transfert thermique du gaz chaud dans un sens de circulation, qu'il restitue dans l'autre sens, lorsque le gaz est froid.



Cycle du moteur Stirling

Nous étudierons le cycle de Stirling idéal ; au cours de celui-ci, n mol de gaz parfait de rapport $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ subissent les évolutions suivantes :

- compression 1-2 isotherme réversible à la température $T_1 = 300$ K,
- échauffement 2-3 isochore jusqu'à l'état 3 de température $T_3 = 600$ K,
- détente 3-4 isotherme réversible à la température T_3 ,
- refroidissement 4-1 isochore jusqu'à l'état 1.

Il n'y a pas de travail autre que celui des forces de pression. On rappelle que $C_v = \frac{nR}{\gamma-1}$.

- Q6.** Représenter l'allure du cycle dans le diagramme (P, V) . Justifier l'allure des différentes étapes sur le diagramme. Comment peut-on savoir, sans calcul, si le cycle proposé est celui d'un moteur ou d'un récepteur ?
- Q7.** Exprimer le travail reçu par le fluide au cours de la compression W_{12} en fonction de n, R, T_1 et du rapport de compression $\rho = \frac{V_1}{V_2}$. En déduire le transfert thermique Q_{12} reçu par le fluide au cours de cette compression en fonction de n, R, T_1 et ρ . Préciser les signes de W_{12} et Q_{12} .
- Q8.** Exprimer le transfert thermique Q_{23} reçu par le fluide au cours de l'échauffement en fonction de n, R, T_1, T_3 et γ . Préciser son signe.

On rappelle que la variation d'entropie d'un gaz parfait est donnée par :

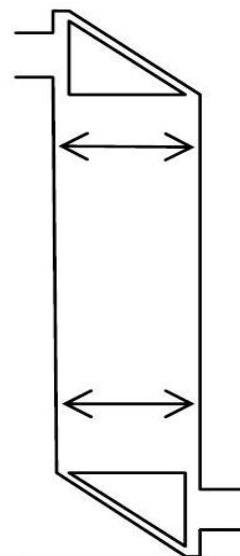
$$\Delta S(T, V) = C_v \cdot \ln\left(\frac{T_f}{T_i}\right) + n \cdot R \cdot \ln\left(\frac{V_f}{V_i}\right)$$

- Q9.** Déterminer l'entropie créée au cours de l'échauffement isochore. Conclure.
- Q10.** Exprimer le travail reçu par le fluide au cours de la détente W_{34} en fonction de n, R, T_3 et ρ . En déduire le transfert thermique Q_{34} reçu par le fluide au cours de cette détente en fonction de n, R, T_3 et ρ . Préciser les signes de W_{34} et Q_{34} .
- Q11.** Exprimer le transfert thermique Q_{41} reçu par le fluide au cours du refroidissement en fonction de n, R, T_1, T_3 et γ . Préciser son signe.
- Q12.** Le régénérateur étant idéal, on a $Q_{23} + Q_{41} = 0$. Quelle est alors, sur le plan énergétique, la grandeur coûteuse (pour l'utilisateur) de ce système sur un cycle ? La grandeur énergétique utile est le travail fourni par le fluide sur le cycle. En déduire l'expression du rendement η en fonction de T_1 et T_3 . Commenter puis faire l'application numérique.

Partie C : PériscopeDonnée :

- Relation de conjugaison de Descartes : $\frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA} = \frac{1}{f'}$
- Relation de conjugaison de Newton : $\overline{FA} \cdot \overline{F'A'} = -f'^2$

En immersion peu profonde, le sous-marin peut utiliser un périscope pour examiner la surface de la mer. Nous nous proposons dans cette partie d'en étudier le fonctionnement simplifié. La figure 9 représente le principe général du périscope étudié, constitué de deux prismes identiques.



Les deux prismes du périscope sont identiques, seule leur orientation diffère ; ils sont constitués d'un verre d'indice $n = 1,5$ et sont plongés dans l'air d'indice 1 (figure 1) :

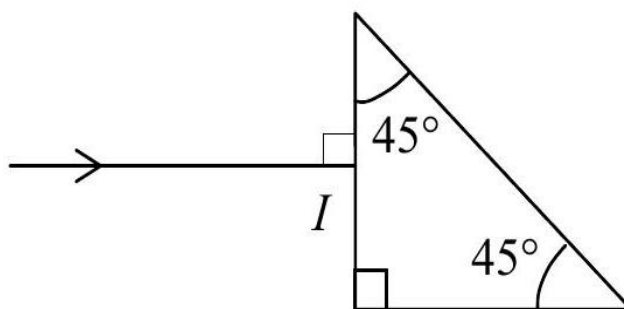


Figure 1 : prisme du périscope

- Q13.** On considère le rayon incident arrivant sous incidence normale sur la face d'entrée de l'un des prismes. Refaire sur la copie le schéma de la figure 1 en le complétant (dessiner la « suite » du rayon). Justifier soigneusement par un calcul les constructions au niveau de chaque interface.
- Q14.** Dans la suite et par souci de simplification, nous remplacerons les prismes par des miroirs plans inclinés à 45° . Le schéma équivalent du périscope est fourni dans le document réponse 1. Représenter sur ce schéma l'image A_1B_1 de l'objet AB par le miroir M_1 , puis l'image A_2B_2 de A_1B_1 par la lentille L_1 de centre O_1 , puis l'image A_3B_3 de A_2B_2 par la lentille L_2 de centre O_2 et enfin l'image $A'B'$ de A_3B_3 par le miroir M_2 .

On rappelle que le document réponse 1 doit être joint à la copie.

On donne les longueurs algébriques (ces longueurs ne correspondent pas au schéma du document réponse 1) :

$\overline{AM_1} = 100 \text{ m}$; $\overline{O_1M_1} = -30 \text{ cm}$; $f'_1 = 50 \text{ cm}$; $\Delta = \overline{F'_1F_2} = 20 \text{ cm}$; $f'_2 = 40 \text{ cm}$; $\overline{O_2M_2} = 90 \text{ cm}$. M_1 et M_2 sont les centres des miroirs.

- Q15.** Calculer les positions des images : $\overline{O_1A_2}$, $\overline{O_2A_3}$ et $\overline{M_2A'}$ ainsi que le grandissement du périscope $\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}}$. L'image finale est-elle de même sens que l'objet ou renversée ?

- Q16.** Citer une méthode expérimentale pour mesurer la distance focale d'une lentille convergente et expliquer rapidement son principe.

NOM :

Prénom :

Document réponse à rendre avec la feuille