DEVOIR SURVEILLÉ 9 (2 HEURES)

Conseils de rédaction

- Le sujet, constitué de 2 exercices et 1 problème, comporte 5 pages, dont 1 page **ANNEXE** à rendre avec la copie.
- Les raisonnements doivent être **méthodiques** et **justifiés**.
- La **calculatrice** est autorisée.

Expressions des variations d'entropie valables pour tout le sujet :

- Variation d'entropie pour une masse m de phase condensée de capacité thermique massique c lorsque la température passe de T_I à T_F :

$$\Delta S_{IF} = mc\ln\left(\frac{T_F}{T_I}\right)$$

- Variation d'entropie pour une masse m de gaz parfait passant de l'état (T_I, p_I, V_I) à l'état (T_F, p_F, V_F) :

$$\Delta S_{IF} = mc_V\ln\left(\frac{T_F}{T_I}\right) + nR\ln\left(\frac{V_F}{V_I}\right) = mc_P\ln\left(\frac{T_F}{T_I}\right) - nR\ln\left(\frac{p_F}{p_I}\right)$$
$$= mc_V\ln\left(\frac{p_F}{p_I}\right) + mc_P\ln\left(\frac{V_F}{V_I}\right)$$

c_V , c_P : capacités thermiques massiques à volume constant, à pression constante

Exercice 1 – Bouteille congelée (≈ 30 mn)

Afin d'être dégustée rapidement, on place une bouteille de vin blanc, initialement à la température $T_a = 19{,}0\ \mathrm{C}$, au congélateur pour la refroidir. Celle-ci étant oubliée, elle se retrouve complètement gelée, à la température $T_c = -18{,}0\ °\mathrm{C}$ du congélateur.

La masse de vin est $m = 750\ \mathrm{g}$. La masse de la bouteille, supposée indéformable, est $m_b = 450\ \mathrm{g}$ On assimilera les propriétés thermodynamiques du vin à celle de l'eau. La pression extérieure est $P_e = 1{,}00\ \mathrm{bar}$.

Données :

Enthalpie massique de fusion de la glace à 0 °C : $\Delta_{fus}h = 3{,}33.10^2\ \mathrm{kJ.kg^{-1}}$

Capacité thermique massique de l'eau liquide : $c_l = 4{,}18\ \mathrm{kJ.K^{-1}.kg^{-1}}$

Capacité thermique massique de la glace : $c_g = 2{,}06\ \mathrm{kJ.K^{-1}.kg^{-1}}$

Capacité thermique massique du verre : $c_{verre} = 7{,}20.10^2\ \mathrm{J.K^{-1}.kg^{-1}}$

Masse volumique de l'eau liquide sous $P_e = 1{,}00\ \mathrm{bar}$: $\rho_l = 1{,}00.10^3\ \mathrm{kg.m^{-3}}$

Masse volumique de la glace sous $P_e = 1{,}00\ \mathrm{bar}$: $\rho_g = 9{,}17.10^2\ \mathrm{kg.m^{-3}}$

1. Définir le système thermodynamique. Préciser son état final (état physique, température) et qualifier la transformation subie par celui-ci.
2. Déterminer la quantité de chaleur échangée par le système avec le milieu extérieur au cours de son évolution (expression littérale puis A.N.). Commenter le signe.
3. Déterminer la variation d'énergie interne du système.
4. Exprimer la variation d'entropie du système. Effectuer l'application numérique.
5. Effectuer un bilan d'entropie et conclure sur la nature réversible ou irréversible de la transformation. Identifier la ou les causes d'irréversibilité le cas échéant.

Exercice 2 – Transformations d'un gaz parfait (≈ 45 mn)

Une masse constante de gaz parfait, dont le rapport des capacités thermiques à pression et volume constants est $\gamma = 1{,}4$, décrit le cycle de la FIGURE 1. On rappelle la relation de Mayer : $C_P - C_V = nR$

Le gaz initialement dans l'état d'équilibre A : $P_A = 1{,}0.10^5$ Pa, $V_A = 4{,}14.10^{-4}$ m^3, $T_A = 144{,}4$ K subit une compression adiabatique réversible qui l'amène à la température $T_B = 278{,}8$ K.

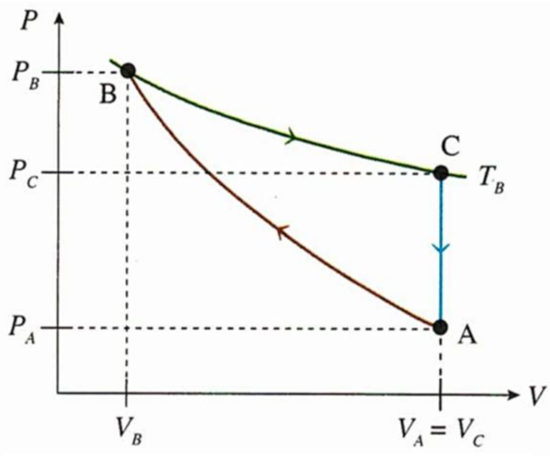

FIGURE 1 : Cycle du gaz parfait

Le gaz est mis en contact avec une source à la température T_B : il subit une détente isotherme réversible, qui ramène son volume à la valeur initiale V_A.

Le gaz dans l'état d'équilibre C est mis en contact avec un thermostat de température T_A tandis que son volume est maintenu constant à la valeur V_A.

1. Rappeler les conditions d'utilisation de la loi de Laplace et les trois relations.
2. Exprimer la pression P_B et le volume V_B de l'état d'équilibre B, en fonction de P_A, V_A, T_A, T_B et γ. Effectuer les applications numériques.
3. Établir une relation entre la pente de l'adiabatique et la pente de l'isotherme au point B.
4. Exprimer puis calculer la pression P_C dans l'état C.
5. Exprimer puis calculer le travail échangé $W_{B\to C}$. Commenter son signe.
6. Exprimer puis calculer le transfert thermique $Q_{C\to A}$. Commenter son signe.
7. Exprimer puis calculer les variations d'entropie ΔS_{BC} et ΔS_{CA}.
8. En déduire l'entropie créée $S^{cr}_{C\to A}$ et l'entropie créée S^{cr}_{cycle} sur le cycle. Préciser le cas échéant les transformations irréversibles et les causes d'irréversibilité.
9. Représenter le cycle sur un diagramme entropique, où la température T est représentée en fonction de l'entropie S.

Problème 3 – L'ammoniac comme fluide réfrigérant

(≈ 40 mn) (*Agro-Véto 2017*)

L'ammoniac, nommé aussi R717, est un fluide réfrigérant qui trouve principalement une application dans le froid industriel, grâce notamment à sa grande efficacité énergétique.
De nombreuses patinoires canadiennes utilisent l'ammoniac pour la fabrication de la glace. Pour obtenir une qualité de glace optimale, la patinoire doit être réfrigérée. On fait ainsi circuler près de 50 tonnes d'ammoniac dans une centaine de kilomètres de canalisations pour assurer 10 cm de glace à -10°C sur l'ensemble de la piste.
Pour la modélisation, on considère une masse $m = 1$ kg d'ammoniac, dont la phase gazeuse est supposée parfaite, qui suit un cycle composé de quatre phases :

- $A \to B$ est une compression adiabatique réversible : l'ammoniac, constitué uniquement de vapeur, est comprimé de la pression de vapeur saturante $P_A = 2{,}8$ bar à la pression $P_B = 12$ bar. Il passe de la température $T_A = -10$ °C à la température T_B.
- $B \to C$ est une transformation isobare : le gaz est refroidi de manière isobare jusqu'à l'état *B'* (vapeur saturante) puis se liquéfie complètement, à la température $T_C = 30$ °C. La pression est maintenue constante : $P_C = P_B$
- $C \to D$ est une détente adiabatique : l'ammoniac est détendu jusqu'à la pression $P_D = P_A$. On note x le titre massique en vapeur obtenu en *D*.
- $D \to A$ est une vaporisation isobare : sous la piste de la patinoire, l'ammoniac liquide se vaporise totalement sous la pression P_A.

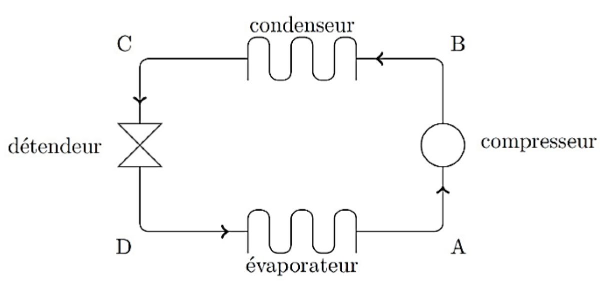

FIGURE 2 : Éléments constitutifs de la machine frigorifique

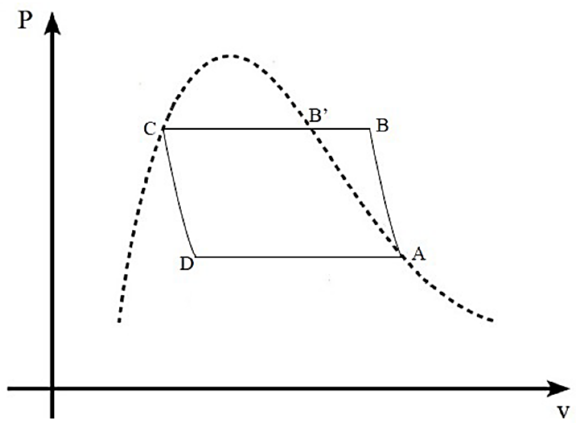

FIGURE 3 : Diagramme de Clapeyron de l'ammoniac

On donne dans le diagramme de Clapeyron (FIGURE 3) où figurent le volume *V* en abscisse et la pression *P* en ordonnée, la position des points *A*, *B*, *B'*, *C* et *D*.

1. Sur le diagramme de Clapeyron de la **FIGURE 3 en ANNEXE**, compléter le tracé des isothermes aux températures T_C et T_A. Préciser l'état physique de l'ammoniac dans les différentes zones. Nommer la courbe en pointillés.
2. Calculer les transferts thermiques Q_{AB} et Q_{CD}.
3. Montrer que la température T_B vaut 95°C.
4. Exprimer puis calculer le transfert thermique $Q_{BB'}$ entre les états B et B' en fonction des données.
5. Exprimer le transfert thermique $Q_{B'C}$ entre les états B' et C en fonction des données. En déduire le transfert thermique Q_{BC} entre les états B et C. Faire l'application numérique. Commenter le signe.

Lors de la détente $C \to D$, l'enthalpie reste constante.

6. En déduire que le titre massique en vapeur au point D vaut $x = \dfrac{c_\ell\left(T_C - T_D\right)}{\Delta_{vap}h\left(263\text{ K}\right)}$.

   Faire l'application numérique.
7. En déduire le transfert thermique Q_{DA} lors de l'évaporation sous la piste de la patinoire. Faire l'application numérique. Commenter le signe.
8. Par application du premier principe, calculer le travail total W échangé par le fluide lors du cycle. Commenter son signe.
9. Définir, en justifiant soigneusement, l'efficacité e de la machine frigorifique puis l'exprimer en fonction de Q_{DA} et Q_{BC}. Faire l'application numérique.
10. Montrer que l'efficacité maximale e_{max} d'une machine frigorifique ditherme vaut $e_{\max} = \dfrac{T_A}{T_C - T_A}$. Donner le nom du cycle qui permet d'atteindre cette efficacité et préciser de quelles transformations il est composé.
11. On définit le rendement r comme le rapport de l'efficacité de la machine sur l'efficacité maximale. Calculer le rendement de la machine. Expliquer pourquoi il est inférieur à 1.

<u>Données</u> :

Pressions de vapeur saturante de l'ammoniac à 30°C et -10°C :

$P_{sat}\left(303\text{ K}\right) = P_{B'} = 12\text{ bar}$ et $P_{sat}\left(263\text{ K}\right) = P_A = 2{,}8\text{ bar}$

Enthalpies massiques de vaporisation de l'ammoniac à 30°C et -10°C :

$\Delta_{vap}h\left(303\text{ K}\right) = 1{,}2.10^3\text{ kJ.kg}^{-1}$ et $\Delta_{vap}h\left(263\text{ K}\right) = 1{,}3.10^3\text{ kJ.kg}^{-1}$

Capacité thermique massique à pression constante de l'ammoniac gazeux :

$c_P = 2{,}1\text{ kJ.K}^{-1}\text{.kg}^{-1}$

Capacité thermique massique de l'ammoniac liquide : $c_\ell = 4{,}7\text{ kJ.K}^{-1}\text{.kg}^{-1}$

Coefficient de l'ammoniac gazeux : $\gamma = \dfrac{c_P}{c_V} = 1{,}3$

ANNEXE (à rendre avec la copie)

NOM :

Problème 3 – Question 1

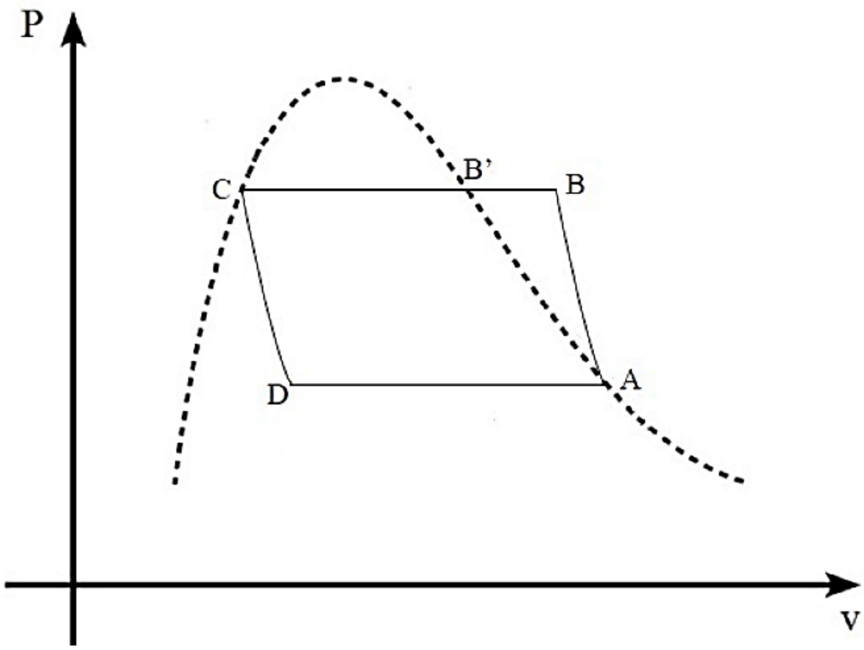

FIGURE 3 : Diagramme de Clapeyron de l'ammoniac