

🔥 Thème III. L'énergie : conversions et transferts (Thermodynamique) TD n°18 Deuxième principe. Bilans d'entropie

Exercice n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Capacités									
Définir un système fermé et établir pour ce système un bilan d'entropie.	🔥	🔥	🔥	🔥	🔥	🔥	🔥	🔥	🔥
Utiliser l'expression fournie de la fonction d'état entropie.	🔥	🔥	🔥	🔥	🔥	🔥	🔥	🔥	🔥
Analyser le cas particulier d'un système en évolution adiabatique.						🔥	🔥	🔥	🔥
Exploiter l'extensivité de l'entropie.						🔥	🔥	🔥	
Relier l'existence d'une entropie créée à une ou plusieurs causes physiques de l'irréversibilité.	🔥	🔥	🔥	🔥	🔥	🔥	🔥	🔥	🔥
Connaître et utiliser la relation $\Delta h_{12}(T) = T\Delta s_{12}(T)$.			🔥	🔥			🔥	🔥	
Citer et utiliser la loi de Laplace et ses conditions d'application.	🔥					🔥			

Parcours possibles

- 🎵 Si vous avez des difficultés sur ce chapitre : n°1, n°2, n°3.
- 🎵 🎵 Si vous vous sentez moyennement à l'aise, mais pas en difficulté : n°1, n°4, n°5, n°6.
- 🎵 🎵 🎵 Si vous êtes à l'aise : n°4, n°5, n°7, n°7.

- Entropies molaires du gaz parfait :
 - $S_m(T, P) = C_{P,m} \ln\left(\frac{T}{T_{\text{ref}}}\right) - R \ln\left(\frac{P}{P_{\text{ref}}}\right) + S_{m,\text{ref}}$
 - $S_m(T, V) = C_{V,m} \ln\left(\frac{T}{T_{\text{ref}}}\right) + R \ln\left(\frac{V}{V_{\text{ref}}}\right) + S_{m,\text{ref}}$
 - $S_m(P, V) = C_{V,m} \ln\left(\frac{P}{P_{\text{ref}}}\right) + C_{P,m} \ln\left(\frac{V}{V_{\text{ref}}}\right) + S_{m,\text{ref}}$
- Entropie massique d'une phase condensée : $s(T) = c \ln\left(\frac{T}{T_{\text{ref}}}\right) + s_{\text{ref}}$
- Capacité massique de l'eau liquide : $c_\ell = 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$

I Exercices d'application directe du cours

Exercice n°1 Deux transformations différentes 🎵

On étudie la compression monotherme d'un gaz parfait dans une enceinte diathermane de section $S = 9,81 \text{ cm}^2$, en contact avec un thermostat de température $20 \text{ }^\circ\text{C}$. L'état initial du gaz est $P_0 = 1,0 \text{ bar}$, $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ et $V_0 = 50 \text{ cm}^3$, et l'état d'équilibre final tel que $V_f = \frac{V_0}{2}$. On envisage deux transformations :

- cas 1 : compression très lente par ajouts successifs de grains de sable, qui assure l'équilibre thermique à chaque instant.
- cas 2 : compression brutale par ajout d'une masse $M = 10 \text{ kg}$.

- Q1. Déterminer l'état final du système dans les deux cas.
- Q2. Déterminer les variations de l'énergie interne et de l'entropie.
- Q3. Cas 1 : Déterminer l'entropie échangée et l'entropie créée, en fonction de P_0 , V_0 et T_0 . Commenter.
- Q4. Cas 2 : Déterminer l'entropie échangée et l'entropie créée, en fonction de P_0 , V_0 et T_0 . Commenter.
- Q5. Comparer numériquement le travail à fournir dans le cas 2 par rapport au cas 1. Commenter.
- Q6. 🎵 🎵 Vérifier que $W_{\text{cas 2 non rév}} - W_{\text{cas 1 rév}}$ et $T_{\text{ext}} S_{\text{créée, cas 2}}$ sont égaux. Interpréter alors le terme d'entropie créée.

Exercice n°2 Échauffement d'un solide 🎵

On chauffe, à l'aide d'une source thermique de température $T_s = 600$ K, une mole de cuivre solide, de telle sorte que le matériau passe de la température ambiante $T_a = 293$ K à la température finale $T_f = 320$ K. Sa variation de volume est négligeable, et sa capacité thermique molaire est égale à $3R$.

Q1. Effectuer le bilan entropique :

- Exprimer la variation d'entropie ΔS du système (le morceau de cuivre),
- Exprimer l'entropie échangée avec la source de chaleur.
- En déduire l'entropie créée dans la transformation. Faire les applications numériques et commenter.

On considère maintenant que le solide (initialement à T_a) est laissé en contact avec le thermostat jusqu'à l'équilibre thermique à la température T_s .

Q2. Montrer que quelque soit les valeurs de T_a et T_s , l'entropie créée est positive. On pourra poser $x = \frac{T_a}{T_s}$ et s'aider d'une représentation graphique (éventuellement précédée d'une étude de fonction).

Exercice n°3 Vaporisation 🎵

On considère la transformation faisant passer un kilogramme d'eau, par voie monobare (sous 1 bar) et monotherme à T_D , de l'état liquide E ($P_E = 1,0$ bar ; $T_E = 300$ K) à l'état gazeux D ($P_D = 1,0$ bar ; $T_D = 600$ K).

- Pourquoi peut-on utiliser le premier principe enthalpique ici ?
- Quelle propriété de l'enthalpie permet de calculer sa variation le long d'un chemin fictif ?
- Proposer un chemin fictif permettant le calcul de ΔH entre E et D ?
- Exprimer ΔH , et en déduire le transfert thermique reçu par le kilogramme d'eau au cours de cette transformation.
- Exprimer la variation d'entropie sur la transformation $E \rightarrow D$.
- Exprimer l'entropie échangée reçue par le système.
- En déduire l'entropie créée et commenter.

On donne l'enthalpie massique de vaporisation à $T_v = 373$ K : $\Delta_{\text{vap}}h(T_v) = 2,26 \cdot 10^3$ kJ · kg⁻¹ et la capacité thermique massique à pression constante de l'eau vapeur : $c_P = 1,94$ kJ · K⁻¹ · kg⁻¹.

II Exercices d'approfondissement

Exercice n°4 Congélation 🎵 🎵

On étudie la congélation d'une masse $m = 1,0$ kg d'aliments, assimilée au changement d'état liquide/solide.

Données :

- Température extérieure : $T_i = 20$ °C ; température intérieure $T_f = -18$ °C
- Capacité thermique massique des aliments décongelés : $c_d = 3,6$ kJ · K⁻¹ · kg⁻¹
- Capacité thermique massique des aliments congelés : $c_c = 1,5$ kJ · K⁻¹ · kg⁻¹
- Enthalpie massique de fusion des aliments à $T_{\text{fus}} = 0$ °C : $\ell_{\text{fus}} = 2,5 \cdot 10^2$ kJ · kg⁻¹

- Que vaut la variation d'entropie lorsqu'on congèle un kilogramme d'aliments dans un congélateur ?
- Sachant que le refroidissement des aliments se fait grâce à un fluide frigorigène à la température $T_{\text{fr}} = -30$ °C, déterminer l'entropie échangée lors de la congélation. *L'utilisation du 1^{er} principe sera nécessaire.*
- En déduire l'entropie créée lors de la congélation d'un kilogramme d'aliments.
Faire l'application numérique. Commenter.

Exercice n°5 Effet Joule 🎵 🎵

On considère un conducteur ohmique de résistance $R = 1,0 \text{ k}\Omega$, de capacité thermique $C_R = 77 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$, parcouru par un courant d'intensité constante $I = 1,0 \text{ A}$, qui permet de maintenir constante la température d'un volume d'eau (baignoire, piscine, bain thermostaté en chimie).

La température de l'eau constante est égale à $T_0 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$.

La température extérieure est $T_{\text{ext}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ et la pression extérieure constante $P_{\text{ext}} = 1,0 \text{ bar}$.

On note Δt la durée d'utilisation.

On considère le système constitué de l'eau liquide, du réservoir (de capacité thermique négligée) et de la résistance, modélisés par des phases condensées idéales.

Q1. Exprimer le travail électrique reçu par le système.

Q2. Exprimer le transfert thermique reçu par le système. Interpréter le signe.

En déduire l'entropie échangée par le système.

Q3. Exprimer l'entropie créée pendant une durée de fonctionnement Δt , en fonction de R , I , Δt et T_{ext} .

Q4. Quelles sont les causes d'irréversibilité qui donnent lieu à cette entropie créée ?

Q5. Montrer que $T_{\text{ext}} S_{\text{créée}}$ est égal au travail électrique dégradé (donc au travail électrique consommé et dissipé sous forme de chaleur).

Exercice n°6 Équilibre d'une enceinte à deux compartiments 🎵 🎵

Une enceinte indéformable aux parois calorifugées est séparée en deux compartiments par une cloison d'aire S étanche, diatherme et mobile sans frottement. Les deux compartiments contiennent un même gaz parfait. Dans l'état initial, la cloison est maintenue au milieu de l'enceinte.

Le gaz du compartiment 1 est dans l'état (T_0, P_0, V_0) et le gaz du compartiment 2 dans l'état $(T_0, 2P_0, V_0)$. On laisse alors la cloison bouger librement jusqu'à ce que le système atteigne un état d'équilibre.

Q1. Que peut-on dire des pressions et des températures à l'état d'équilibre final ? Déterminer les volumes V_1 et V_2 des deux enceintes à l'état d'équilibre final.

Q2. Par application du premier principe, déterminer les températures et pressions finales.

Q3. Réaliser un bilan d'entropie sur le système complet. On exprimera toutes les grandeurs en fonction de P_0 , V_0 et T_0 . Commenter.

Exercice n°7 Préparation d'un thé glacé 🎵 🎵

On souhaite réaliser du thé glacé, en mettant un volume $V_1 = 500 \text{ mL}$ d'eau liquide à $t_1 = 20,0 \text{ }^\circ\text{C}$ dans un thermos avec 4 glaçons de $8,0 \text{ g}$ à $t_2 = -18 \text{ }^\circ\text{C}$.

Données :

— Enthalpie massique de fusion de l'eau à $T_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$: $\Delta_{\text{fus}} h(T_0) = 335 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

— Capacité thermique massique de l'eau solide (glace) : $c_g = 2,09 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$

Q1. Déterminer la température finale T_f du système.

Q2. Réaliser le bilan d'entropie : exprimer et calculer ΔS (utiliser l'extensivité de l'entropie et choisir un chemin permettant le calcul) , $S_{\text{éch}}$, $S_{\text{créée}}$. Commenter le signe de $S_{\text{créée}}$.

On ajoute maintenant 15 glaçons de 8 g .

Q3. Réaliser à nouveau le bilan d'entropie.

Exercice n°8 Détente isentropique de l'eau (D'après CCINP MP) 🎵 🎵

On considère l'équilibre entre l'eau liquide et sa vapeur. On désigne par P la pression du système liquide - vapeur et ν son volume massique.

Cet équilibre est caractérisé à différentes températures T par les données suivantes où P_{sat} est la pression de vapeur saturante à la température T , ν_L le volume massique du liquide saturant, h_L l'enthalpie massique du liquide saturant, ν_V le volume massique de la vapeur saturante et h_V l'enthalpie massique de la vapeur saturante.

T (°C)	P_{sat} (bar)	ν_L (m ³ · kg ⁻¹)	h_L (kJ · kg ⁻¹)	ν_V (m ³ · kg ⁻¹)	h_V (kJ ⁻¹ kg ⁻¹)
50	0,123	$1,01 \cdot 10^{-3}$	208,96	12,04	2587,42
100	1,013	$1,04 \cdot 10^{-3}$	418,42	1,673	2671,44

Q1. Soit un cylindre indéformable, muni d'un piston et dont les parois sont calorifugées. Initialement le piston est bloqué dans la position définissant un volume $V = 10$ L dans le cylindre. L'introduction d'une masse $m = 10$ g d'eau dans le cylindre permet d'obtenir un mélange liquide - vapeur en équilibre à la température $T_1 = 100$ °C. Calculer le titre massique en vapeur x_1 de ce système.

Q2. Déterminer l'enthalpie massique de vaporisation $l_v(T)$ pour les températures T_1 et T_2 .

Q3. On fait subir au mélange liquide - vapeur précédent une détente adiabatique réversible de la température $T_1 = 100$ °C à la température $T_2 = 50$ °C. Montrer qu'une détente adiabatique réversible est aussi isentropique.

Q4. On suppose que la capacité thermique massique de l'eau $c_L = 4,2$ kJ · kg⁻¹ · K⁻¹ reste constante au cours de cette détente. En décomposant la transformation en trois étapes qu'on représentera sur le diagramme de Clapeyron, calculer le titre massique en vapeur x_2 du mélange liquide - vapeur à la fin de la détente en fonction des températures, de c_L , de $l_v(T_1)$ et de $l_v(T_2)$. Donner sa valeur numérique.

Q5. On donne les entropies massiques associées à la vapeur saturante et au liquide saturant pour les températures T_1 et T_2 :

T (°C)	P_{sat} (bar)	s_L (kJ · kg ⁻¹ · K ⁻¹)	s_V (kJ · kg ⁻¹ · K ⁻¹)
$T_2 = 50$	0,123	0,704	8,076
$T_1 = 100$	1,013	1,307	7,355

Vérifier la cohérence de ces données en recalculant les enthalpies massiques de vaporisation aux températures T_1 et T_2 .

Q6. Retrouver le titre massique en vapeur x_2 grâce à ces données.

III Résolutions de problème

Exercice n°9 Bouilloire électrique

Déterminer l'entropie créée lorsqu'on fait bouillir de l'eau à l'aide de la bouilloire électrique dont les caractéristiques sont données ci-contre.

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES :

- 220-240 V / 50/60 Hz
- Puissance : 1850 - 2200 W
- Capacité : 1,7 L
- Dimensions : 21,5x14x26 cm