

# THERMODYNAMIQUE

## Exercices – partie 2

### LES PRINCIPES DE LA THERMODYNAMIQUE ET L'ÉTUDE DES CORPS PURS RÉELS

#### L'entropie et le second principe de la thermodynamique

##### Exercice 11 : Questions à choix multiples

- a) L'entropie est une forme d'énergie stockée dans le système :  vrai  faux
- b) Un système en équilibre possède nécessairement une entropie minimale :  vrai  faux
- c) L'entropie d'un système ne peut qu'augmenter :  vrai  faux
- d) La variation d'entropie d'un système entre deux états d'équilibre est identique que la transformation soit réversible ou irréversible :  vrai  faux
- e) L'entropie d'échange d'un système isolé est toujours nulle :  vrai  faux
- f) Une transformation caractérisée par une entropie produite négative est :  
 irréversible  impossible spontanément  réversible  adiabatique

##### Exercice 12 : Applications directes

(questions indépendantes)

- a) Quelle est la variation d'entropie d'un litre d'eau ( $c = 4186 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) se refroidissant de  $60^\circ\text{C}$  à  $20^\circ\text{C}$  ?
- b) Quelle est l'entropie d'échange d'un système recevant une quantité de chaleur  $Q = 10 \text{ kJ}$  d'une source de chaleur à  $50^\circ\text{C}$  ?
- c) Quelle est la création d'entropie d'un système dont la variation d'entropie est de  $50 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$  et l'entropie d'échange de  $80 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$  ? Cette transformation peut-elle se produire spontanément ?
- d) Une transformation caractérisée par une variation d'entropie du système de  $20 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$  et une entropie d'échange de  $10 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$  est-elle réversible ?

##### Exercice 13 : Masse d'eau en contact avec une source de chaleur constante

a) Une masse de 1 kg d'eau ( $c = 4180 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) à  $20^\circ\text{C}$  est mise en contact avec une source de chaleur à  $80^\circ\text{C}$ . Déterminer, lorsque l'eau atteint  $80^\circ\text{C}$ , la variation d'entropie de l'eau, l'entropie d'échange et la production d'entropie liée à cette transformation.

b) La même masse d'eau de 1 kg est cette fois-ci mise en contact d'abord avec une source de chaleur à  $50^\circ\text{C}$  puis, après avoir attendu l'équilibre thermique, avec une autre source de chaleur à  $80^\circ\text{C}$ . Quelle est la production d'entropie liée à cette nouvelle transformation ?

c) Expliquer le sens de l'écart entre les deux résultats précédents sachant que ces deux transformations ont le même état initial et le même état final. Imaginer comment pourrait-on chauffer cette eau de  $20^\circ\text{C}$  à  $80^\circ\text{C}$  en conservant l'entropie de l'univers à peu près constante.

#### Exercice 14 : Cycle d'un gaz parfait

---

Deux moles d'un gaz parfait subissent la succession de transformations suivante ( $R = 8,31 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ,  $C_{m,P} = 29,1 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ,  $C_{m,V} = 20,8 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ,  $\gamma = 1,4$ ) :

- une compression adiabatique et réversible AB, de  $P_A = 1 \text{ bar}$  jusqu'à  $P_B = 4 \text{ bars}$ . Au terme de la compression la température atteinte est  $\theta_B = 200^\circ\text{C}$  ;
- une détente isotherme BC ;
- un refroidissement isobare CA pour revenir à l'état initial.

Dans les deux parties qui suivent, on se propose d'abord d'étudier le cycle d'un point de vue énergétique, puis de l'analyser d'un point de vue entropique pour déterminer s'il peut être réalisé.

##### 1 – Étude énergétique du cycle.

- a) Calculez la température  $T_A$  du gaz dans l'état initial (avec **3 chiffres significatifs**), puis représentez ce cycle dans un diagramme  $P(V)$ . Précisez, en le justifiant, s'il s'agit d'un cycle moteur ou récepteur.
- b) Calculez les quantités de chaleur et de travail échangées respectivement au cours des trois transformations mises en jeu durant ce cycle. **Vous exprimerez les résultats en kJ avec une seule décimale.**
- c) Déterminez la quantité de travail échangée au cours du cycle et précisez si cette quantité est globalement reçue ou fournie par le gaz.

##### 2 – Étude entropique du cycle.

Au cours du cycle les échanges thermiques (quantités de chaleur) ont lieu entre le système et une seule source de chaleur consistant en un thermostat à la température  $\theta_0 = 200^\circ\text{C}$ .

**Pour les résultats des calculs entropiques vous ne conserverez que trois chiffres significatifs.**

- a) Déterminez, en le justifiant, la variation d'entropie du gaz entre A et B.
- b) Calculez la variation d'entropie du gaz au cours de la transformation isotherme BC, puis son entropie d'échange. Montrez que cette transformation BC est réversible.
- c) De même, calculez la variation d'entropie du gaz et l'entropie d'échange au cours du refroidissement isobare CA. En déduire l'entropie créée entre C et A.
- d) En déduire l'entropie créée au cours du cycle ABCA. Le cycle proposé est-il réalisable ? Dans l'affirmative, précisez s'il s'effectue de manière réversible ou irréversible ?

---

#### Exercice 15 : Mélange de deux fluides identiques

(questions indépendantes)

a) On mélange, sans fournir de chaleur et à pression constante, une masse  $m = 1$  kg d'eau **liquide** ( $c = 4180 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) à  $25^\circ\text{C}$  avec une même masse d'eau liquide à  $5^\circ\text{C}$ . Calculez la température d'équilibre et la variation d'entropie du système. Montrez que la production d'entropie est positive et en déduire le type de transformation subi par le système.

b) Un récipient est divisé en deux compartiments de même volume  $V = 10$  L contenant chacun le même **gaz parfait** ( $R = 8,31 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ). L'ensemble est en équilibre thermique à la température  $T_0 = 300$  K. Dans le premier compartiment, la pression du gaz est  $P_1 = 1$  bar et dans le deuxième compartiment, la pression est  $P_2 = 2$  bars. On supprime la séparation et l'on attend que le nouvel équilibre soit atteint. Déterminez la pression finale  $P_3$  du gaz et calculez la production d'entropie de cette transformation. En déduire le type de transformation subi par le système.

### Exercice 16 : Contact des deux corps solides à températures différentes

Deux masses égales  $m$  d'un même corps solide (capacité thermique  $c$ ), initialement à deux températures différentes  $T_1$  et  $T_2 > T_1$ , sont mises en contact.

a) En supposant le système constitué par ces deux masses comme thermiquement isolé, montrer que ces deux masses atteignent une température finale  $T_F$  dont on donnera l'expression littérale en fonction des données du problème.

b) Déterminer la variation d'entropie  $\Delta S$  de l'ensemble des deux masses en détaillant votre raisonnement (on demande la démonstration). En déduire l'expression littérale de la création d'entropie  $S_p$  caractérisant cette transformation en fonction de  $T_1, T_2, m$  et  $c$ .

c) Le signe de  $S_p$  renseigne sur le sens d'évolution temporelle de la transformation. Indiquer le type d'évolution temporelle associé respectivement aux trois cas suivants :  $S_p > 0$ ,  $S_p < 0$  et  $S_p = 0$ .

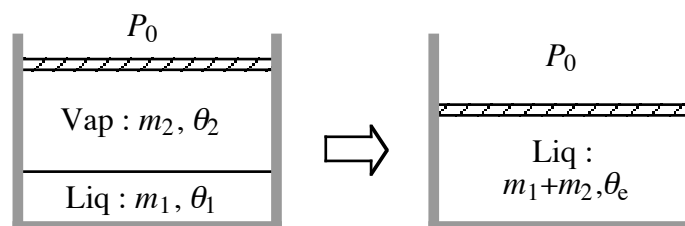
d) Déterminer les différentes conditions sur  $T_1$  et  $T_2$  conduisant à chacun des trois cas précédents. En déduire le type d'évolution temporelle effectivement attendu lors de la mise en contact des deux masses décrites plus haut.

e) On suppose maintenant que les températures  $T_1$  et  $T_2$  sont très proches l'une de l'autre en notant  $T_2 = T_1(1+\varepsilon)$ . Exprimer alors  $S_p$  en fonction de  $\varepsilon$ . En remarquant que si  $\varepsilon \ll 1$  alors  $(1+\varepsilon)^n \approx 1 + n\varepsilon$ , que peut-on conclure de l'évolution temporelle de cette dernière transformation ?

### Exercice 17 : Eau chaude – eau froide

Une enceinte calorifugée, dont une paroi est mobile (paroi sans masse, sans frottement et libre de ses mouvements) contient une masse d'eau  $m_1 = 100$  kg d'eau liquide à  $\theta_1 = 15^\circ\text{C}$  et  $P_0 = 1,013$  bar. On souhaite produire de l'eau chaude en mélangeant cette eau froide à de la vapeur d'eau que l'on introduit à une température  $\theta_2 = 150^\circ\text{C}$ , sous une pression et  $P_0 = 1,013$  bar.

a) Décrire les différentes étapes de la transformation subie par la masse  $m_1$  d'eau initialement sous forme liquide à  $15^\circ\text{C}$  (préciser pour chaque étape, l'état physique et la température d'équilibre). Même question pour la masse  $m_2$  d'eau initialement sous forme de vapeur à  $150^\circ\text{C}$ .



b) Déterminer la masse  $m_2$  de vapeur que l'on doit introduire dans cette enceinte pour obtenir une masse totale d'eau liquide à  $60\text{ °C}$  à l'équilibre thermodynamique à pression  $P_0$ .

c) Calculer la variation d'entropie  $\Delta S_1$  de la masse d'eau  $m_1$  initialement sous forme liquide ainsi que la variation d'entropie  $\Delta S_2$  de la masse d'eau  $m_2$  initialement sous forme vapeur.

d) En déduire la valeur de la création d'entropie  $S_p$  et conclure sur le type d'évolution temporelle subie par ces deux masses d'eau.

*Données :*

Capacité thermique massique de l'eau liquide :  $c = 4,18\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

Capacité thermique massique de la vapeur d'eau à pression constante :  $c_p = 1,87\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

Enthalpie massique de vaporisation de l'eau :  $L_v = 2257\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

### **Exercice 18 : Prédiction de l'état d'un mélange eau - glace**

---

On place dans un récipient calorifugé, une masse  $m_1 = 1\text{ kg}$  d'eau liquide à la température  $\theta_1 = 20\text{ °C}$  et une masse  $m_2 = 0,5\text{ kg}$  de glace à la température  $\theta_2 = 0\text{ °C}$ .

a) La pression étant maintenue constante, posez deux hypothèses réalistes sur l'évolution du système et validez-les en déterminant la composition et la température à l'équilibre.

b) Déterminer la variation d'entropie de la masse d'eau initialement à l'état liquide et celle de la glace initialement à l'état de glace.

c) En déduire si la transformation est réversible ou non.

On donne la capacité thermique massique de l'eau liquide  $c = 4,186\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  et l'enthalpie de fusion de la glace  $L_f = 335\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

## Réponses aux exercices

### Deuxième principe :

11. a) F, b) V, c) F, d) V, e) V, f) impossible spontanément ;

12. a)  $-536 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$ , b)  $+31 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$ , c)  $-30 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$ , non, d) non ;

13. a)  $779 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$ ,  $711 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$ ,  $68 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1} > 0$ , b)  $778,7 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$ ,  $743,5 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$ ,  $35,2 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1} > 0$ , c) transformation très lente ;

14. 1. a)  $551 \text{ K}$ ,  $175 \text{ K}$ , b)  $-13,4 \text{ kJ}$ ,  $0 \text{ kJ}$ ,  $6,2 \text{ kJ}$ ,  $-21,9 \text{ kJ}$ ,  $0 \text{ kJ}$ ,  $29,1 \text{ kJ}$ , c)  $-7,2 \text{ kJ} < 0$  moteur ; 2. a)  $0 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$ , isentropique, b)  $-67,1 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$ ,  $-57,9 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$ , c)  $66,9 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$ ,  $33,6 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$ , d)  $91,5 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$ , réalisable, irréversible ;

15. a)  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $5 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1} > 0$  irréversible, b)  $1,5 \text{ bar}$ ,  $6,9 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1} > 0$ , irréversible ;

16. c) irréversible, impossible spontanément, réversible, d)  $(T_2 - T_1)^2 > 0$  : toujours vrai,  $(T_2 - T_1)^2 < 0$  : jamais vérifié,  $T_2 = T_1$  : pas le cas donc irréversible, e) réversible ;

17. a)  $m_1$  : Liq ( $15^\circ\text{C}$ )  $\rightarrow$  Liq ( $60^\circ\text{C}$ ) ;  $m_2$  : Vap ( $150^\circ\text{C}$ )  $\rightarrow$  Vap ( $100^\circ\text{C}$ )  $\rightarrow$  Liq ( $100^\circ\text{C}$ )  $\rightarrow$  Liq ( $60^\circ\text{C}$ ), b)  $7,47 \text{ kg}$ , c)  $60,7 \text{ kJ}\cdot\text{K}^{-1}$  et  $-50,5 \text{ kJ}\cdot\text{K}^{-1}$ , d)  $10,2 \text{ kJ}\cdot\text{K}^{-1}$ , irréversible ;

18. a)  $0,25 \text{ kg}$  glace,  $1,25 \text{ kg}$  eau,  $0^\circ\text{C}$ , b)  $308 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$ , c)  $11 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1} > 0$ .