

# THERMODYNAMIQUE

## Exercices – partie 3

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

#### Gaz réels

##### Exercice 19 : Questions à choix multiples

- a) Le modèle des gaz parfaits n'est plus valable approximativement pour une pression :  
 < 1 bar       < 5 bars       > 5 bars       > 50 bars
- b) Les nuages sont formés de *vapeur d'eau* :  vrai     faux
- c) Le domaine d'existence d'un *équilibre liquide / solide / vapeur* s'appelle :  
 le point critique       le point triple       le point de sublimation
- d) Il est possible de passer directement un corps d'une phase solide à une phase gazeuse sans passer par une phase liquide :  vrai     faux
- e) La quantité de chaleur échangée par un gaz réel lors d'une *transformation isotherme* est :  
  $m (u_2 - u_1)$         $m T_0 (s_2 - s_1)$         $m (h_2 - h_1)$

##### Exercice 20 : Applications directes de la table des variables thermodynamiques de l'eau

En utilisant la table de la vapeur d'eau, déterminer :

- le volume massique de la vapeur d'eau à 300 °C sous 1 bar.
- la pression de la vapeur d'eau de volume massique  $0,05665 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$  à 500 °C.
- L'énergie interne massique de la vapeur d'eau à 200 °C sous 1 bar.
- L'enthalpie massique de la vapeur d'eau à 600 °C sous 100 bars.
- L'entropie massique de la vapeur d'eau à 1200 °C sous 500 bars.
- La pression de la vapeur d'eau à 600 °C dont l'énergie interne massique est de  $3288 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

##### Exercice 21 : Fuite de vapeur

On introduit 800 g de vapeur d'eau dans un cylindre de 23,8 litres surmonté d'un piston.

a) Le cylindre est à une température de 450 °C. Déterminer, à l'aide des tables, la pression dans le cylindre. Comparer ce résultat à la pression calculée en considérant la vapeur d'eau comme un gaz parfait.

b) Grâce au piston, on porte la pression à 200 bars tout en maintenant la température constante à 450 °C. Calculer le volume occupé par la vapeur d'eau.

c) Au moyen d'une soupape, on ramène alors la pression à 25 bars en maintenant à la fois la température et le volume constants. Déterminer la masse de vapeur d'eau qui s'échappe du cylindre.

### Exercice 22 : Interpolations linéaires

---

a) Déterminer le volume massique de la vapeur d'eau à 435 °C sous 250 bars.

b) Déterminer la pression de la vapeur d'eau de volume massique  $1,50 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$  à 250 °C.

c) Déterminer la pression de la vapeur d'eau de volume massique  $0,0273 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$  à 400 °C.

d) Déterminer la pression de la vapeur d'eau de volume massique  $0,015 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$  à 420 °C.

### Exercice 23 : Transformations isothermes de la vapeur d'eau

---

1. Un cylindre muni d'un piston à un volume de 15 litres et contient 750 g de vapeur d'eau à une pression de 125 bars.

a) Déterminer (grâce aux tables) la température à laquelle ces conditions sont réalisées.

b) On désire ramener la pression de cette vapeur d'eau à une valeur de 26 bars, tout en maintenant la température constante. Quel sera le volume occupé par la vapeur d'eau ?

c) Évaluer l'erreur sur le volume (en %) que l'on ferait en utilisant le modèle des gaz parfaits.

2. Dans un réservoir, on comprime de façon isotherme de la vapeur d'eau à partir des conditions suivantes :  $V_1 = 100$  litres,  $P_1 = 10$  bars et  $\theta_1 = 250$  °C.

a) Quelle masse de vapeur y a-t-il dans le réservoir ?

b) Quelle est la pression dans le réservoir lorsque le volume n'est plus que de 42 litres ?

### Exercice 24 : Réservoir indéformable

---

Un réservoir indéformable de 70 litres contient de la vapeur d'eau à 350 °C sous 100 bars.

a) Déterminer, à l'aide des tables, la masse de vapeur d'eau contenue dans ce réservoir.

b) La température de ce réservoir est maintenant portée à 800 °C. Calculer avec précision, la pression réelle de la vapeur d'eau dans le réservoir

c) Aborder les deux questions précédentes en assimilant la vapeur d'eau à un gaz parfait. Évaluer l'erreur (en %) que l'on fait sur la détermination de la pression finale (à 800 °C) et *conclure*. On rappelle que  $R = 8,31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  et  $M = 18 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ .

### Exercice 25 : Transformations successives d'un gaz réel (vapeur d'eau)

---

On considère un récipient fermé par un piston contenant de la vapeur d'eau considérée comme un gaz réel. Au départ (état initial A), la vapeur d'eau est à une pression  $P_1 = 4$  bars, une température  $\theta_1 = 150$  °C et occupe un volume  $V_1 = 2$  litres. Elle subit les trois transformations successives suivantes :

— un chauffage ( $A_1A_2$ ) à pression constante (4 bars) portant sa température à  $\theta_2 = 900$  °C,

— une compression ( $A_2A_3$ ) à température constante (900 °C) portant sa pression à  $P_3 = 25$  bars,

— un refroidissement ( $A_3A_4$ ) à volume constant ramenant sa pression à  $P_4 = 10$  bars.

Déterminer, grâce aux tables thermodynamiques :

- a) La masse  $m$  de vapeur d'eau dans le récipient,
- b) Le volume  $V_2$  occupé par la vapeur d'eau à la fin du chauffage  $A_1A_2$ ,
- c) Le volume  $V_3$  occupé par la vapeur d'eau à la fin de la compression  $A_2A_3$ ,
- d) La température  $\theta_4$  occupé par la vapeur d'eau à la fin du refroidissement  $A_3A_4$ .
- e) Rassembler les résultats obtenus dans un tableau récapitulatif et comparer-les à ceux obtenus, dans les mêmes conditions, pour l'exercice 9 (gaz parfaits – semestre 1).

### Exercice 26 : Comparaison gaz réel – gaz parfait

---

Un réservoir fermé par une paroi mobile contient de la vapeur d'eau dans les conditions initiales suivantes :  $P_1 = 2$  bars,  $\theta_1 = 500$  °C et  $V_1 = 100$  litres. Cette vapeur d'eau subit alors une compression isotherme jusqu'à une pression de 200 bars.

1. En considérant la vapeur d'eau comme un *gaz réel*, c'est-à-dire en utilisant les tables, déterminer approximativement (sans calcul d'interpolation) :

- a) la masse  $m$  de vapeur contenue dans le réservoir,
- b) le volume  $V_2$  en fin de compression,
- c) le travail  $W_{12}$  et la quantité de chaleur  $Q_{12}$  échangés lors de cette compression.

2. Mêmes questions en considérant la vapeur d'eau comme un *gaz parfait* ( $M = 18$  g·mol<sup>-1</sup>,  $R = 8,31$  J·mol<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup> et  $\gamma = 1,34$ ), autrement dit déterminer :

- a) la masse  $m$  de vapeur contenue dans le réservoir,
- b) le volume  $V_2$  en fin de compression,
- c) le travail  $W_{12}$  et la quantité de chaleur  $Q_{12}$  échangés lors de cette compression,
- d) les erreurs commises (en %) sur les valeurs du volume  $V_2$ , du travail  $W_{12}$  et de la quantité de chaleur  $Q_{12}$  en prenant l'hypothèse du gaz parfait.

### Exercice 27 : Énergies échangées au cours d'une transformation

---

1. Dans un cylindre de volume initial  $V_1 = 100$  litres, on refroidit de la vapeur d'eau depuis une température  $\theta_1 = 400$  °C jusqu'à une température  $\theta_2 = 200$  °C à pression constante de  $P_0 = 5$  bars. Déterminer le travail et la quantité de chaleur échangés au cours de cette transformation.

2. Dans un réservoir (indéformable) de volume  $V_0 = 50$  litres, on chauffe de la vapeur d'eau à partir des conditions suivantes :  $P_1 = 10$  bars et  $\theta_1 = 250$  °C. En fin d'opération, la pression est de  $P_2 = 20$  bars.

- a) Quelle est la température de la vapeur en fin d'opération ?
- b) Quelle quantité de chaleur a-t-elle été nécessaire pour cette opération ?

### Exercice 28 : Compressions d'un gaz réel

---

De la vapeur d'eau est contenue dans un cylindre de volume initial de 25 litres. La température et la pression initiales sont de 300 °C et de 1 bar. On comprime alors de façon réversible, cette vapeur jusqu'à une pression de 60 bars.

1. Dans un premier temps, on considère un cylindre dont les parois permettent les échanges de chaleur avec le milieu extérieur et que la compression s'effectue de façon *isotherme* (transformation  $A_1A_2$ ).

a) En utilisant la table de la vapeur d'eau, déterminer le volume occupé par la vapeur en fin de compression.

b) Calculer le travail reçu par la vapeur lors de cette transformation.

**2.** Dans un deuxième temps, on considère un cylindre parfaitement *calorifugé*. On comprime la vapeur d'eau depuis le même état initial (25 litres, 300 °C, 1 bar) jusqu'à la même pression finale (60 bars, transformation  $A_1A_3$ ).

a) Déterminer, grâce aux tables, le volume occupé par la vapeur en fin de compression ainsi que la température atteinte par la vapeur.

b) Calculer le travail reçu par la vapeur lors de cette transformation.

c) Comparer les travaux échangés lors de ces deux compressions.

## Réponses aux exercices

### Gaz réels :

19. a)  $> 5$  bars, b) F, c) point triple, d) V, e) V, f)  $m T_0 (s_2 - s_1)$  ;
20. a)  $2,639 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ , b) 60 bars, c)  $2658,1 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ , d)  $3625,3 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ , e)  $7,3083 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , f) 25 bars ;
21. a) 100 bars, 112 bars (GP), b) 10,2 litres, c) 722 g ;
22. a)  $0,008393 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ , b) 1,75 bar, c) 97,5 bars, d) 163,7 bars ;
23. 1. a)  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ , b) 86,9 litres, c) 17 %, 2. a) 0,43 kg, b) 22,8 bars, c) 23,8 bars ;
24. a) 3,12 kg, b) 214 bars, c) 2,43 kg, 172 bars, 20 % ;
25. a) 4,25 g, b) 5,75 litres, c) 0,92 litres, d)  $218 \text{ }^\circ\text{C}$  ;
26. 1. a) 56,1 g, b) 0,83 litre, c) 92,4 kJ et - 102,9 kJ, 2. a) 56,04 g, b) 1 litre, c) 92 kJ et - 92 kJ, d) 20 %, 0,4 %, 10,6 % ;
27. 1. 15,6 kJ, - 67,5 kJ, 2. a)  $740 \text{ }^\circ\text{C}$ , b) 180 kJ ;
28. 1. a) 0,34 litre, b) 10,3 kJ ; 2. a)  $1073 \text{ }^\circ\text{C}$ , 0,98 litre, b) 13 kJ.