



# Révisions de thermodynamique

## Questions de cours

- Donner l'ordre de grandeur de la constante d'Avogadro.
- Qu'est-ce qu'un système fermé? un système isolé?
- Définir le modèle du gaz parfait monoatomique (GPM).
- Quelle est l'équation d'état des gaz parfaits?
- Donner l'ordre de grandeur du volume molaire d'un gaz.
- Quel est l'ordre de grandeur du volume massique de l'eau?
- Donner l'expression de l'énergie interne du GPM.
- Définir la capacité thermique à volume constant d'un système thermodynamique.
- Citer la première loi de Joule.
- Donner le diagramme  $(P, T)$  de l'eau, et positionner les phases dans ce diagramme.
- Dans le cas de l'équilibre liquide-vapeur, donner le diagramme de Clapeyron  $(P, v)$ .
- Qu'est-ce qu'une transformation isochore? Une évolution isotherme?
- Qu'est-ce qu'une transformation quasi-statique? et une transformation réversible?
- Comment qualifie-t-on une transformation se faisant à pression extérieure constante?
- Donner l'expression du travail des forces de pression ( $P_{ext}$  uniforme) lors d'une transformation entre deux états d'équilibre 1 et 2.
- Pour une transformation quasi-statique et mécaniquement réversible, quel graphique nous permet d'avoir une représentation du travail des forces de pression? À quoi correspond alors le travail?
- Établir l'expression du travail des forces de pression pour les transformations suivantes : transformation isochore, une transformation monobare, une transformation isobare réversible, une transformation isotherme réversible d'un gaz parfait.
- Le travail des forces de pression entre deux états d'équilibre dépend-il de la transformation suivie?
- Qu'appelle-t-on transfert thermique?
- Définir ce qu'est un thermostat.
- Que signifie transformation adiabatique?
- Énoncer le premier principe de la thermodynamique.
- Définir l'enthalpie d'un système thermodynamique. Quelle est son unité?
- Définir la capacité thermique massique à pression constante d'un système thermodynamique.
- Pour un gaz parfait, établir la relation de Mayer.
- Pour un gaz parfait, établir l'expression des capacités thermiques molaires en fonction de  $R$  et de  $\gamma$ .
- Énoncer les deux lois de Joule.
- Définir l'enthalpie massique transition de phase.
- Énoncer le deuxième principe de la thermodynamique.
- Comment qualifie-t-on une transformation réversible et adiabatique?
- À quelle condition un transfert thermique avec un thermostat peut-il être réversible?
- Donner les lois de Laplace ainsi que les conditions d'application.
- Quel est le lien entre l'enthalpie massique de transition de phase et l'entropie massique de transition de phase?

## Applications directes du cours

- 1 Soit un récipient de volume constant  $V = 10$  L. Il contient un GPM (de l'hélium) à une pression  $p = 2,1$  bar et à la température  $T = 300$  K.

On donne :  $R = 8,31$  J.mol<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>, la constante des gaz parfaits,  $k_B = \frac{R}{N_A} = 1,38 \cdot 10^{-23}$  J.K<sup>-1</sup>, la constante de Boltzmann et  $M(\text{He}) = 4,0$  g.mol<sup>-1</sup> la masse molaire de l'hélium.

Exprimer en fonction des données puis calculer :

- La masse  $m$  d'hélium contenue dans le récipient et la densité particulaire  $n^*$  des atomes dans le récipient.
- L'énergie cinétique totale  $E_c$  du gaz enfermé puis l'énergie cinétique moyenne par atome  $\langle e_c \rangle$  et la vitesse quadratique moyenne  $u$  des atomes.
- Par suite d'une fuite de gaz, la pression passe à  $p' = 1,4$  bar et la température à  $T' = 290$  K. Calculer la

masse du gaz échappé  $\Delta m$ .

- 2 On considère de l'eau pure contenue dans un récipient de volume  $V = 10$  L, à la température de  $70^\circ\text{C}$ . Déterminer le titre en vapeur  $x_v$  quand la phase liquide occupe la moitié du volume total. Données : volume massique de l'eau liquide saturant à  $70^\circ\text{C}$  :  $v_\ell = 1,02 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$  ; volume massique de l'eau vapeur saturante à  $70^\circ\text{C}$  :  $v_v = 5,04 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ .
- 3 On veut préparer un bain de volume  $V_{tot} = 120$  L d'eau à  $\theta_0 = 35^\circ\text{C}$  en mélangeant un volume  $V_1$  d'eau chaude à  $\theta_1 = 75^\circ\text{C}$  et un volume  $V_2$  d'eau froide à  $\theta_2 = 16^\circ\text{C}$ . On négligera les échanges thermiques avec l'atmosphère et la baignoire. Déterminer  $V_1$  et  $V_2$ .
- 4 1. Montrer qu'« il n'existe pas de moteur monotherme ».  
2. Montrer qu'« aucun système décrivant une évolution cyclique ne peut réaliser un transfert thermique parfait d'une source froide à une source chaude ».
- 5 Dans le cas du réfrigérateur ditherme, le système ( $\Sigma$ ) reçoit un transfert thermique de la part de la source froide.
1. Montrer que le système reçoit alors un travail et cède un transfert thermique à la source chaude.
  2. Définir l'efficacité thermodynamique du réfrigérateur.
  3. Montrer que

$$e \leq \frac{T_f}{T_c - T_f}.$$

4. Calculer l'efficacité maximale obtenue dans le cas d'une machine réversible.
  5. Donner l'allure du cycle (cycle de Carnot) dans un diagramme (T,S).
- 6 Un moteur réel, fonctionnant entre deux sources de chaleur, l'une à  $T_f = 400$  K et l'autre à  $T_c = 650$  K, produit 500 J par cycle, pour 1500 J de transfert thermique fourni.
1. Comparer son rendement à celui d'une machine de Carnot fonctionnant entre les deux mêmes sources.
  2. Calculer l'entropie créée par cycle, notée  $S_c$ .
  3. Montrer que la différence entre le travail fourni par la machine de Carnot et la machine réelle est égale à  $T_f S_c$ , pour une dépense identique.

- 1 a.  $m = 3,37$  g,  $n^* = 5,07 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-3}$ , b.  $U = \frac{3}{2}nRT$ ,  $U = 3,15$  kJ,  $\langle e_c \rangle = \frac{3}{2}k_B T$ ,  $\langle e_c \rangle = 6,21 \cdot 10^{-21}$  J,  $v^* = 1,37 \cdot 10^3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , c.  $\Delta m = 1,05$  g. 2  $x_v = \frac{v_\ell}{v_\ell + v_v}$  ;  $x_v = 2,0 \cdot 10^{-4}$ . 3  $V_1 = 39$  L et  $V_2 = 81$  L. 4 Cours. 5 Cours. 6 1.  $\eta = 0,33$  et  $\eta_C = 0,38$ , 2.  $S_c = 0,19 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ , 3.  $T_f S_c = W - W_C$ .

## Exercices

### 1. Gonflage de pneus

Dans cet exercice, l'air est assimilé à un gaz parfait.

1. Un pneu sans chambre, de volume supposé constant, est gonflé à froid, à la température  $T_1 = 20^\circ\text{C}$ , sous la pression  $P_1 = 2,1$  bar. Après avoir roulé un certain temps, le pneu affiche une pression  $P_2 = 2,3$  bar ; quelle est alors sa température ?
2. Un pneu de volume  $V_1 = 50$  L est gonflé au moyen d'air comprimé contenu dans une bouteille de volume  $V_0 = 80$  L à la pression initiale  $P_0 = 15$  bar. Si la pression initiale dans le pneu est nulle et la pression finale  $P_p = 2,6$  bar, déterminer la pression  $P_1$  dans la bouteille à la fin du gonflage d'un pneu, puis le nombre de pneus que l'on peut gonfler, l'opération se passant à température constante.

### 2. Dissociation d'un gaz

1. Quel est le volume  $V_0$  occupé par 1 g de dibrome à  $\theta_0 = 600^\circ\text{C}$  sous la pression standard ( $P^o = 1$  bar), en assimilant la vapeur à un gaz parfait.

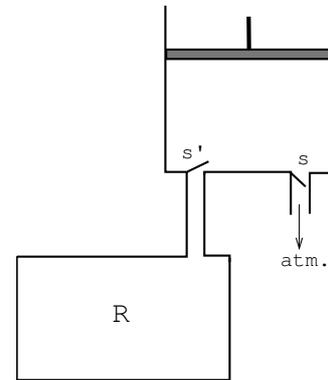
2. Que devient ce volume (noté  $V_1$ ) à  $\theta_1 = 1600^\circ\text{C}$  ?
3. L'expérience montre que ce volume est en fait  $V_1' = 1,19$  L. Montrer que ce résultat peut s'expliquer en admettant qu'une partie des molécules de  $\text{Br}_2$  s'est dissociée en atomes de brome Br. Calculer le coefficient de dissociation.

Données : masse molaire du brome :  $M(\text{Br}) = 80 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ ,  $R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ .

### 3. Pompe à vide primaire

On utilise comme pompe à vide primaire le système représenté sur la figure ci-contre.

Un piston se meut dans un récipient cylindrique qui communique par des soupapes  $s$  et  $s'$  respectivement avec l'atmosphère (pression  $P_a$ ) et le récipient à vider  $R$  (qui contient initialement de l'air sec considéré comme un gaz parfait à la pression  $P_{R,0} \leq P_a$ ). Le volume de ce récipient, compte tenu des canalisations nécessaires, est  $V_R$ . Le volume offert au gaz dans le cylindre  $V$  varie entre un maximum  $V_M$  et un minimum  $V_m$ , volume nuisible résultant de la nécessité d'allouer un certain espace à la soupape  $s'$ .



La soupape  $s$  est fermée pendant la montée du piston. Lorsque la pression atmosphérique  $P_a$  devient inférieure à la pression  $P$  dans le cylindre  $\mathcal{C}$  la soupape  $s$  s'ouvre.

La soupape  $s'$  s'ouvre lorsque la pression dans le cylindre  $P$  devient inférieure à celle du gaz dans le réservoir  $P_R$  et se ferme pendant la descente du piston.

Au départ, le piston est dans sa position basse (la plus proche du fond du cylindre);  $s'$  est fermée, le volume  $V_m$  est rempli d'air à la pression  $P_a$ .

1. (a) En supposant que le piston se déplace suffisamment lentement pour que l'air subisse des transformations isothermes, calculer  $V_1$  le volume offert au gaz dans le cylindre quand  $s'$  s'ouvre en fonction de  $P_{R,0}$ ,  $P_a$  et  $V_m$ .  
 (b) Calculer la pression  $P_{R,1}$  dans le réservoir lorsque  $s'$  se referme.  
 (c) Exprimer  $V_1'$  le volume offert au gaz quand  $s$  s'ouvre.  
 (d) Peut-on d'ores et déjà montrer que l'on ne pourra faire descendre la pression dans  $R$  au-dessous d'une valeur limite  $P_\ell$ ? Exprimer  $P_\ell$  en fonction des données.
2. Calculer la pression  $P_{R,n}$  dans le réservoir après  $n$  allers et retours du piston.
3. Donner la valeur limite de  $P_n$  lorsque  $n \gg 1$ . Comparer cette limite avec  $P_\ell$ .
4. Applications numériques : calculer  $P_{R,1}$  et  $P_\ell$ .

Données :  $V_R = 5,0 \text{ dm}^3$ ,  $V_M = 250 \text{ cm}^3$ ,  $V_m = 5,0 \text{ cm}^3$ ;  $P_{R,0} = P_a = 1,01 \text{ bar}$ .

### 4. Vapeur sèche ou saturée

On introduit  $m = 4,00 \text{ g}$  d'eau (masse molaire  $M = 18,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ ) dans un récipient de volume  $V = 10,0 \text{ L}$ , maintenu à la température  $T_1 = 70,0^\circ\text{C}$ , initialement vide d'air.

1. Expliquer, de manière qualitative, ce qu'il se passe.
2. En faisant l'hypothèse que toute l'eau est vaporisée (assimilée à un gaz parfait), calculer la pression de la vapeur d'eau au sein du récipient. Commenter.
3. La valeur tabulée du volume massique de la vapeur d'eau saturée, à  $70,0^\circ\text{C}$ , est  $5,0396 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ . Calculer la masse maximale de vapeur que peut contenir le récipient. Commenter.
4. On porte le récipient à  $100^\circ\text{C}$ , quelle est la nouvelle pression ?

Données : Pressions de vapeur saturante de l'eau :  $P_{s1} = P_s(T_1 = 70,0^\circ\text{C}) = 0,312 \text{ bar}$  et  $P_{s2} = P_s(T_2 = 100^\circ\text{C}) = 1,013 \text{ bar}$ .

## 5. Travail reçu par un gaz pour différents chemins suivis

L'état initial d'une mole de gaz parfait est caractérisé par  $P_0 = 2 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ ,  $V_0 = 14 \text{ L}$ . On fait subir successivement à ce gaz les transformations réversibles suivantes :

- une détente isobare qui double son volume ;
- une compression isotherme qui le ramène à son volume initial ;
- un refroidissement isochore qui le ramène à l'état initial.

1. À quelle température s'effectue la compression isotherme ? En déduire la pression maximale atteinte.
2. Représenter le cycle de transformations dans le diagramme  $(P, V)$
3. Calculer les travaux et transferts thermiques échangés par le système au cours du cycle, soient  $W_1, W_2, W_3, Q_1, Q_2$  et  $Q_3$  en fonction de  $P_0, V_0$  et  $\gamma = \frac{C_P}{C_V} = 1,4$  (supposé constant dans le domaine de températures étudié).
4. Vérifier  $\Delta U = 0$  pour le cycle.

## 6. Transformations d'un gaz

Un récipient de volume  $V_1 = 10 \text{ L}$  contient de l'air sous la pression  $P_1 = 1,0 \text{ bar}$  à la température  $T_1 = 20^\circ\text{C}$ .

1. On fait subir à ce gaz une compression isotherme réversible jusqu'à la pression  $P_2 = 10,0 \text{ bar}$ . Quels sont les échanges de travail et les transferts thermiques du gaz avec le milieu extérieur ?
2. On ramène le gaz à sa pression initiale  $P_1$  par une détente adiabatique réversible  $(PV^\gamma)$ . Quelle est la température finale ? Quel est le travail fourni par le gaz ?
3. Le gaz est enfin ramené à son état initial à pression constante. Quels sont les échanges de travail et les transferts thermiques avec le milieu extérieur ?

On assimilera l'air à un gaz parfait. On donne  $\gamma = 1,4$ .

## 7. Gaz dans un cylindre

Une mole d'un gaz parfait de capacité thermique à volume constant  $C_V = 5R/2$  est contenue dans un cylindre vertical calorifugé comportant un piston mobile calorifugé de section  $S = 0,01 \text{ m}^2$  et de masse négligeable, en contact avec une atmosphère extérieure à pression constante  $p_0 = 10^5 \text{ Pa}$ . Initialement, la gaz est en équilibre et sa température vaut  $T_0 = 300 \text{ K}$ .

On donne  $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$ .

1. On pose sur le piston une masse  $M = 102 \text{ kg}$  et on laisse le système évoluer. Déterminer sa pression  $p_1$  et sa température  $T_1$  lorsqu'on atteint un nouvel état d'équilibre (1).
2. L'état d'équilibre (1) étant atteint, on supprime la masse  $M$  et on laisse le système évoluer. Déterminer sa pression  $p_2$  et sa température  $T_2$  lorsqu'on atteint un nouvel état d'équilibre (2). Commenter.

## 8. Capacité thermique d'un métal

1. Un calorimètre contient une masse  $m_1 = 95 \text{ g}$  d'eau à  $T_1 = 20^\circ\text{C}$ . On ajoute une masse  $m_2 = 71 \text{ g}$  d'eau à  $T_2 = 50^\circ\text{C}$ . Quelle serait la température d'équilibre si l'on pouvait négliger la capacité thermique du vase et des ses accessoires ?
2. La température d'équilibre observée est  $T_e = 31,3^\circ\text{C}$ . En déduire la « valeur en eau » notée  $m_e$  du vase et de ses accessoires.
3. Le même calorimètre contient maintenant  $m_3 = 100 \text{ g}$  d'eau à  $T_3 = 15^\circ\text{C}$ . On y plonge un échantillon métallique pesant  $m = 25 \text{ g}$  sortant d'une étuve à  $T = 95^\circ\text{C}$ . La température d'équilibre étant  $T_0 = 16,7^\circ\text{C}$ , calculer la capacité thermique massique du métal.

Pour l'eau :  $c_0 = 1 \text{ cal.g}^{-1}.\text{K}^{-1} = 4,18 \text{ J.g}^{-1}.\text{K}^{-1}$ .

*Rappel : la « valeur en eau » d'un calorimètre et de ses accessoires est la masse d'eau  $m_e$  qui aurait la même capacité thermique que le vase calorimétrique et ses accessoires.*

## 9. Variation d'enthalpie

Une masse  $M_s = 1,00$  kg de glace, initialement à la température  $\theta_1 = -20^\circ\text{C}$ , est au contact d'un thermostat de température  $T_0 = 0^\circ\text{C}$ . En fin de transformation, la masse  $M_s$  est entièrement liquide.

Calculer la variation d'enthalpie de la masse  $M_s$  au cours de cette transformation.

Données : Chaleur latente massique de fusion de la glace  $\ell_f(P_0 = 1,0 \text{ bar}, T_0) = 334 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; capacité thermique de la glace  $c = 2,09 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ .

## 10. Chauffage de l'aluminium à basse température

Entre 30 K et 45 K, la chaleur massique de l'aluminium est donnée en fonction de la température absolue par :  $c = aT^3$ ;  $a = 1,11 \cdot 10^{-3}$  S.I.

On se propose d'échauffer un cylindre de ce métal, pesant 36 g, de 30 K à 45 K; on utilise l'effet Joule d'un courant d'intensité 0,6 A parcourant une résistance pratiquement constante  $R = 2,72 \Omega$  et de capacité calorifique négligeable devant celle du bloc d'aluminium.

1. En précisant clairement le système choisi, faire un bilan des échanges énergétiques.
2. Déterminer la durée du chauffage.
3. Calculer la variation d'entropie du bloc d'aluminium lors de ce processus.

Donnée :  $s(T) = c \times \ln\left(\frac{T}{T_{\text{ref}}}\right) + s(T_{\text{ref}})$

## 11. Mesure d'une chaleur latente de fusion

Un calorimètre, de capacité thermique  $C = 84 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ , contient une masse  $m_1 = 500$  g d'eau liquide à la température  $T_1 = 25^\circ\text{C}$ . On y introduit une masse  $m_2 = 50$  g de glace à la température  $T_2 = 0^\circ\text{C}$ . La température d'équilibre mesurée est  $T_f = 15,8^\circ\text{C}$ .

Exprimer puis calculer la chaleur latente massique de fusion de l'eau sous la pression atmosphérique.

Données : capacité thermique de l'eau liquide  $c_{\text{eau}} = 4,18 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ .

## 12. Variation d'entropie d'un gaz parfait

On étudie 3 transformations de  $n = 1,0$  mol de gaz parfait de coefficient  $\gamma = 1,4$  passant de l'état initial (pression  $P_0 = 1,0 \cdot 10^5$  Pa, volume  $V_0 = 24$  L) à l'état final de pression  $P_1 = 5,0 \cdot 10^5$  Pa.

- une transformation adiabatique réversible (a);
- une transformation isochore (b);
- une transformation isotherme (c).

1. Pour chaque transformation déterminer l'état final.
2. Représenter ces 3 transformations sur un même diagramme de Watt.
3. Déterminer pour chaque transformation la variation d'entropie, l'entropie créée et l'entropie échangée.

Données :  $R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ ;  $S_m(T, P)$ , entropie molaire du gaz parfait,  $S_m(T, P) = S_m(T_0, P_0) + \mathcal{C}_{Pm} \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) - R \ln\left(\frac{P}{P_0}\right)$ .

## 13. Bilan entropique d'un chauffage

On chauffe 100 g d'eau de  $\theta_1 = 20^\circ\text{C}$  à  $\theta_2 = 90^\circ\text{C}$  dans une enceinte maintenue à  $\theta_2 = 90^\circ\text{C}$ .

1. Calculer la variation d'entropie de l'eau.
2. Calculer la variation d'entropie de l'enceinte.
3. Quelle a été la création d'entropie au cours du processus?

## 14. Changement d'état de l'eau

On donne le tableau de données thermodynamiques suivant relatif à l'eau :

	$\theta_1 = 80^\circ C$	$\theta_2 = 115^\circ C$
$P_{\text{sat}} (10^3 \text{ Pa})$	47,39	169,1
$v_{\text{liq}} (m^3 \cdot kg^{-1})$	$1,029 \cdot 10^{-3}$	$1,056 \cdot 10^{-3}$
$v_{\text{vap}} (m^3 \cdot kg^{-1})$	3,407	1,037
$h_{\text{liq}} (kJ \cdot kg^{-1})$	334,9	482,5
$h_{\text{vap}} (kJ \cdot kg^{-1})$	2644	2699
$s_{\text{liq}} (kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	1,075	1,473
$s_{\text{vap}} (kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	7,612	7,183

Un récipient indilatable de volume  $V = 1,00 \text{ m}^3$  contient une masse  $m = 1,0 \text{ kg}$  d'eau à la température  $\theta_1 = 80^\circ C$ .

1. Justifier le fait que le système est diphasé.
2. Calculer les masses de phase liquide  $m_{\text{liq}}$  et vapeur  $m_{\text{vap}}$ .  
On met le récipient en contact avec un thermostat à la température  $\theta_2$ .
3. Quel est l'état final du système? Calculer les nouvelles masses  $m'_{\text{liq}}$  et  $m'_{\text{vap}}$ .
4. Calculer le transfert thermique  $Q$  reçu par le système.
5. Calculer l'entropie créée.

## 15. Moteur Diesel

Inventé par l'ingénieur allemand Rudolf Diesel en 1893, le moteur diesel est un moteur à quatre temps.

- Premier temps : admission de l'air seul. Partant du point mort haut, le piston aspire l'air par la soupape d'admission. L'air est alors dans l'état 1, à la température  $T_1$  et à la pression  $P_1$ .
- Deuxième temps : compression isentropique de l'air admis dans le moteur (les deux soupapes sont fermées) jusqu'au volume  $V_2$ .
- Troisième temps : le combustible est injecté sous pression dans le cylindre. Au contact de l'air chaud, il s'enflamme spontanément et le mélange subit une combustion isobare à la pression  $P_2$  (volume  $V_3$ ), au cours de laquelle il reçoit la chaleur  $Q_2$ . Puis détente adiabatique jusqu'au volume  $V_4$ .
- Quatrième temps : échappement. Détente isochore des produits de combustion puis évacuation.

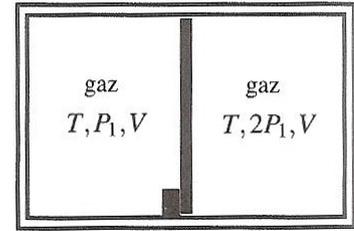
On appelle  $\gamma$  le rapport des capacités thermiques molaires  $C_{pm}/C_{vm}$ ; on considère que toutes les transformations de ce cycle sont réversibles; on définit  $a = V_1/V_2$  et  $b = V_4/V_3$ . On assimile l'air à un gaz parfait.

1. Représenter le cycle sur un diagramme de Clapeyron ( $P, V$ ). Donner les expressions de la pression, du volume et de la température pour les états 2, 3 et 4 en fonction de  $P_1, V_1, \gamma, a$  et  $b$ . Calculer numériquement ces valeurs.
2. Calculer les travaux et les chaleurs reçus par le système gazeux pour toutes les transformations subies. Préciser notamment le sens des échanges.
3. Proposer une expression pour le rendement en fonction de  $\gamma, a$  et  $b$ . Calculer cette valeur et la vérifier.

Données :  $\gamma = 1,4$ ;  $a = 9$ ;  $b = 3$ ;  $n = 10^{-2} \text{ mol}$ ;  $P_1 = 1,0 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ ;  $T_1 = 300 \text{ K}$ ;  $R = 8,314 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$ ;  $C_{vm} = 20,8 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$ .

## 16. Mise à l'équilibre

Une enceinte indéformable aux parois calorifugées est séparée en deux compartiments par une cloison étanche de surface  $S$ , mobile et diatherme. Les deux compartiments contiennent chacun un gaz parfait. Dans l'état initial, le gaz du compartiment 1 est dans l'état ( $T = 300$  K,  $P_1 = 1$  bar,  $V = 1$  L), le gaz du compartiment 2 dans l'état ( $T, 2P_1, V$ ). Une cale bloque la cloison mobile.



On enlève la cale et on laisse le système atteindre un état d'équilibre.

1. Déterminer l'état final.
2. Calculer l'entropie créée.

## 17. Contact avec N thermostats

1. Une masse  $m = 1$  kg d'eau liquide à  $T_0 = 273$  K est mise en contact avec un thermostat à  $T_f = 300$  K. La capacité thermique massique de l'eau est  $c = 4,18 \cdot 10^3$  J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>.  
Calculer l'entropie créée. Quelle est la cause de la création d'entropie ?
2. On suppose maintenant que l'eau est d'abord mise en contact avec un premier thermostat à la température  $T_1 = 285$  K jusqu'à ce qu'elle atteigne cette température, puis elle est mise en contact avec le thermostat à  $T_f$ .  
Calculer de nouveau l'entropie créée. Pourquoi trouve-t-on une valeur inférieure à celle de la question précédente ?
3. On opère maintenant en  $N$  étapes : l'eau, initialement à  $T_0 = 273$  K, est mise en contact avec  $N$  thermostats de température  $T_i$  vérifiant  $\frac{T_i}{T_{i-1}} = a = cte$  et  $T_N = T_f = 300$  K.  
Calculer l'entropie créée. Que devient-elle lorsque  $N$  tend vers l'infini ? Pourquoi ?

## 18. Moteur de Stirling

Un moteur fonctionne entre une source chaude de température  $T_C = 450$  K et une source froide de température  $T_F = 300$  K. L'agent thermique, constitué de  $n$  moles de gaz parfait de coefficient  $\gamma = \frac{C_P}{C_V} = 1,40$ , décrit de manière quasi-statique le cycle suivant :

- AB : compression à la température  $T_F$  de la source froide
- CD : détente à la température  $T_C$  de la source chaude
- BC et DA : isochores respectivement aux volumes  $V_1$  et  $V_2$

On donne  $R = 8,31$  J.k<sup>-1</sup>.mol<sup>-1</sup> et  $\alpha = \frac{V_2}{V_1} = 2,00$  (taux de compression).

1. Représenter le cycle de ce moteur en diagramme de Clapeyron.
2. Identifier les étapes non réversibles.
3. Calculer les différents transferts thermiques reçus par le gaz au cours du cycle.
4. Définir puis exprimer le rendement  $\eta$  du moteur.
5. Afin d'améliorer le rendement du moteur, on utilise un dispositif qui permet d'éviter les échanges thermiques avec l'extérieur en dehors des deux phases isothermes. Calculer le nouveau rendement du moteur  $\eta'$ . Commenter le résultat obtenu

## 19. Pompe à chaleur

La pompe à chaleur est un dispositif qui, en mode « chauffage » puise l'énergie thermique dans l'air, dans le sol ou dans l'eau des nappes phréatiques, pour la transférer vers le local à réchauffer. Elle est constituée d'un circuit fermé dans lequel circule un fluide caloporteur à l'état liquide, gazeux ou biphasé selon les éléments qu'il traverse. La circulation se fait en régime permanent ; on néglige les variations d'énergies cinétique et de pesanteur.

Le cycle de la pompe à chaleur se compose de quatre étapes, en dehors desquelles les échanges thermiques ou mécaniques sont supposés nuls :

- Compression 1-2 : le gaz subit au cours de sa circulation une compression adiabatique et réversible qui l'amène de l'état 1 ( $P_1, T_1$ ) à l'état 2 ( $P_2, T_2$ ). On note  $w'_{12} > 0$  le travail massique utile reçu par le fluide.
- Condensation 2-3 : le gaz se liquéfie totalement à pression constante  $P_2$  jusqu'à la température  $T_3$ . Il cède de l'énergie à la source chaude, et l'on note  $q_{23} < 0$  l'énergie massique échangée.
- Détente 3-4 : le fluide traverse un tuyau indéformable et ne permettant pas les échanges thermiques. La pression du fluide redescend jusqu'à  $P_1$  et sa température vaut alors  $T_4$ .
- Évaporation 4-1 : le liquide s'évapore totalement à pression constante  $P_1$  jusqu'à la température  $T_1$ . Il reçoit l'énergie massique  $q_{41} > 0$  de la source froide.

1. Montrer que la phase de détente est isenthalpique.
2. Quelle est relation liant les quantités  $q_{23}$ ,  $q_{41}$  et  $w'_{12}$  ?
3. Justifier la définition de l'efficacité de la pompe à chaleur  $e = -\frac{q_{23}}{w'_{12}}$  et montrer que  $e > 1$ .
4. On donne ci-après le diagramme de Mollier  $P = f(h)$  d'un fluide caloporteur courant :
  - (a) La phase liquide y apparaît-elle incompressible et indilatable ? La phase gazeuse y apparaît-elle comme un gaz parfait ?
  - (b) Utiliser le diagramme fourni sur lequel est représenté le cycle pour compléter le tableau suivant :

	État 1	État 2	État 3	État 4
$h$ (kJ.kg <sup>-1</sup> )	402			
$P$ (bar)	3	10		
$T$ (°C)	5		40	
État physique	vapeur		liquide (saturant)	

- (c) À partir du diagramme de Mollier, estimer numériquement l'efficacité de la pompe à chaleur. Comparer la valeur trouvée à celle qui correspondrait à un cycle de Carnot fonctionnant entre les mêmes températures.
- (d) Calculer le débit massique du fluide permettant d'assurer une puissance de chauffage de 4 kW.

