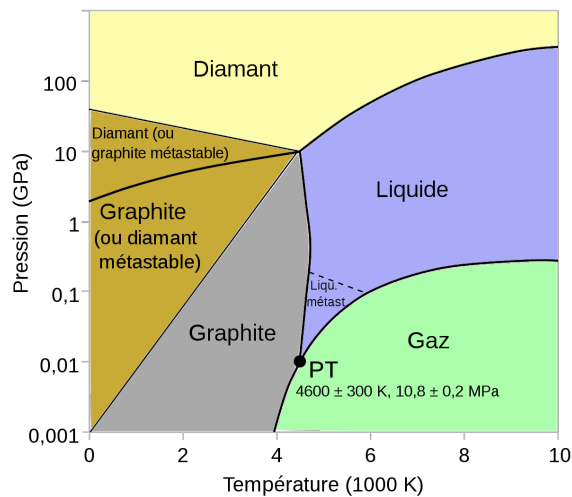


## Physique II – Thermodynamique

### Exercices 8

#### PROBLÈME I CARBONE

Le diagramme ci-dessous est le diagramme de phases du carbone.



1. Quelle sera la phase du carbone si sa température augmente à pression constante à partir du point triple entre graphite, gaz et liquide (PT) ?
2. À 1.0 GPa et 5000 K, quelle est la phase du carbone ?

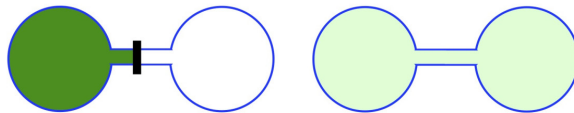
#### PROBLÈME II DÉTENTE ET ENTROPIE INTERNE

On s'intéresse à calculer la création d'entropie interne  $S_{\text{int}}$  dans deux cas différents de détente adiabatique irréversible. Dans les deux scénarios, on suppose que le gaz se comporte comme un gaz parfait.

##### Détente de Joule ou Gay-Lussac

Cette détente se produit lorsque l'on ouvre le robinet reliant deux enceintes, la première (de volume  $V_1$ ) contenant initialement un gaz à température  $T_1$  et pression  $p_1$ , et la deuxième (de

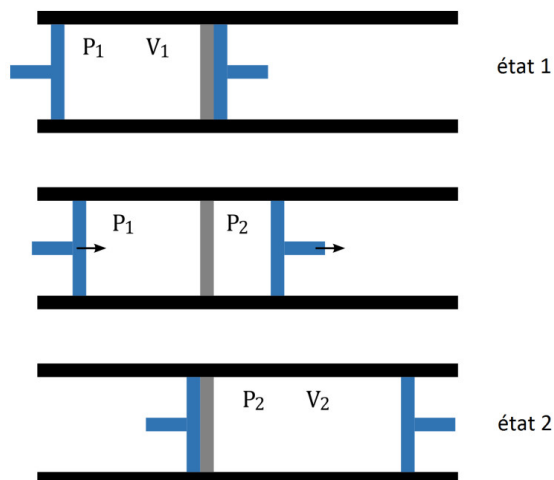
volume  $V_2$ ) étant initialement vide. Le système total est supposé isolé. On prendra comme système l'ensemble du gaz.



1. Quels sont le travail  $W$  et la chaleur  $Q$  échangés avec l'extérieur lors de la détente ?
2. Calculer  $\Delta U$ .
3. En déduire  $\Delta T$ . Quelle est la nature de la transformation ? Quelle est la pression finale ?
4. Calculer la création d'entropie interne du système au cours de la détente.
5. L'enceinte est adiabatique. Pourquoi n'a-t-on pas  $pV^\gamma = \text{constante}$  ?
6. *Application numérique* :  $V_1 = 1 \ell$ ,  $V_2 = 1 \ell$ ,  $p_1 = 10^5 \text{ Pa}$ ,  $T_1 = 300 \text{ K}$ .

### Détente de Joule-Thomson

Cette détente s'obtient en faisant intégralement passer un gaz au travers d'une paroi poreuse, depuis une première enceinte de volume  $V_1$ , pression constante  $p_1$  et température  $T_1$  à une seconde enceinte de volume  $V_2$  et pression constante  $p_2 < p_1$ . On suppose la détente lente et les parois extérieures du système isolées thermiquement. On peut schématiser cette détente comme illustré sur la figure ci-dessous, où deux pistons mobiles maintiennent les deux pressions  $p_1$  et  $p_2$  constantes.



1. Déterminer le travail reçu par le gaz lorsque ce dernier passe de l'état 1 à l'état 2. En dériver la variation  $\Delta U = U_2 - U_1$  de l'énergie interne.
2. Montrer que la détente de Joule-Thomson est isenthalpique (l'enthalpie ne varie pas).
3. Montrer que lors de la détente de Joule-Thomson d'un gaz parfait la température reste constante.
4. A partir de ce résultat, calculer la création d'entropie interne du système au cours de la détente.

### PROBLÈME III TRAVAIL D'UN GAZ DE VAN DER WAALS

On considère une mole de gaz de Van der Waals :

$$\left(p + \frac{a}{V^2}\right) \cdot (V - b) = RT$$

On le fait passer de  $(p_1, T_1, V_1)$  à  $(p_2, T_2, V_2)$ . Toutes les transformations sont quasi-statiques. Calculer le travail reçu par le gaz par :

1. Une isochore (volume constant).
2. Une isobare (pression constante).
3. Une isotherme (température constante).

### PROBLÈME IV CYCLE DE CARNOT ET STIRLING AVEC UN GAZ DE VAN DER WAALS

On s'intéresse à l'efficacité d'un cycle moteur contenant un gaz de Van der Waals. L'équation d'état et l'énergie interne d'un gaz de Van der Waals sont données par :

$$\begin{aligned} \left(p + \frac{n^2 a}{V^2}\right)(V - nb) &= nRT \\ U_{VdW} &= nC_{V,m}T - \frac{n^2 a}{V} \end{aligned}$$

1. On fait décrire un cycle de Carnot à une mole de gaz de Van der Waals. Quelle est l'efficacité  $\eta_{\text{Carnot,VdW}}$  du moteur? On suppose que le moteur fonctionne entre les deux

températures extrêmes  $T_c$  (chaude) et  $T_f$  (froide) et que toutes les transformations sont réversibles. Comment ce résultat se compare à l'efficacité  $\eta_{\text{Carnot, GP}}$  d'un cycle de Carnot pour un gaz parfait ?

2. On fait décrire au gaz de Van der Waals un cycle de Stirling. Quelle est l'efficacité  $\eta_{\text{Stirling, VdW}}$  en présence d'un régénérateur parfait en supposant que les transformations isochores se font aux volumes  $V_A$  et  $V_B$  (où  $V_A < V_B$ ) et que le moteur fonctionne entre les températures  $T_c$  et  $T_f$  ?

Comment  $\eta_{\text{Stirling, VdW}}$  se compare à l'efficacité  $\eta_{\text{Carnot, VdW}}$  trouvée dans la question 1 ?

3. Que devient l'efficacité  $\eta_{\text{Stirling, VdW}}$  pour le cycle de Stirling décrit dans la question 2 si le régénérateur ne fonctionne pas du tout ?

#### PROBLÈME V VARIATION DE L'ÉNERGIE INTERNE APRÈS MÉLANGE DE DEUX GAZ PARFAITS

On considère un gaz parfait placé dans deux compartiments de même volume  $V$ , aux pressions respectives  $p_1 = 2$  bar et  $p_2 = 1$  bar, et à la même température initiale  $T$ . Le réservoir est rigide et adiabatique. On met en communication les deux compartiments et on attend l'équilibre.

1. Calculer la variation d'énergie interne de l'ensemble.
2. À partir de considérations sur l'énergie interne du système, montrer que la température ne change pas dans l'enceinte.
3. On considère 1 L d'azote à la température  $T = 300$  K, à la pression  $p = 1$  bar, et de coefficients de Van der Waals  $a = 1.408 \text{ L}^2 \cdot \text{bar} \cdot \text{mol}^{-2}$  et  $b = 0.03913 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$ . Calculez le nombre de mol de gaz  $n_{GP}$  en utilisant l'hypothèse des gaz parfaits. Utilisez ce résultat et la formule des gaz de Van der Waals pour vérifier qu'on puisse faire l'approximation  $n_{GP} = n_{VdW}$ , avec  $n_{VdW}$  le nombre de mol de gaz donné par l'hypothèse d'un gaz de Van der Waals.
4. La réponse à la question 2 serait-elle la même dans le cas de gaz de van der Waals? On

donne l'énergie interne:

$$U_{VdW} = nC_{V,m}T - \frac{an^2}{V}$$

Justifier votre réponse et calculer  $T_f$ .

5. Calculer la pression finale dans le cas où le gaz est parfait.

#### PROBLÈME VI TEMPÉRATURE DE MÉLANGE

On verse 4 kg d'eau de température  $T_1$  inconnue dans un seau contenant 6 kg d'eau à  $T_2 = 10^\circ\text{C}$ . Sachant que la température finale du mélange est de  $T_{\text{fin}} = 11.6^\circ\text{C}$ , déterminer la valeur de  $T_1$ .

#### PROBLÈME VII PETIT TOUR DES CHALEURS LATENTES

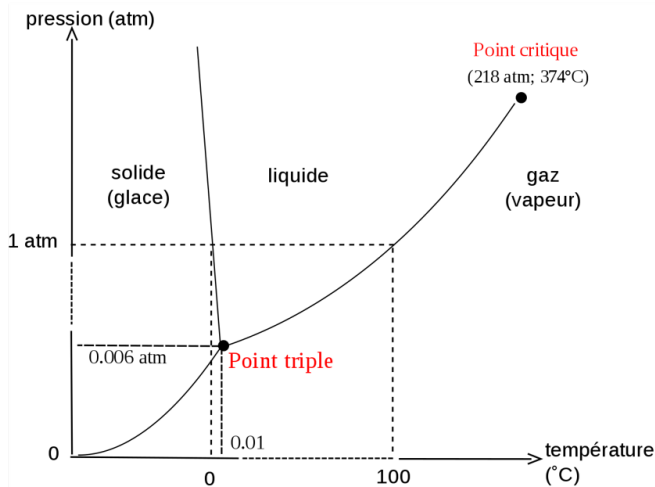
Démontrer que au point triple  $\Delta H_{\text{subl}} = \Delta H_{\text{vap}} + \Delta H_{\text{liq}}$ . En déduire que la chaleur latente de sublimation d'un corps pur quelconque est plus grande que sa chaleur latente d'évaporation. En déduire que la pente de la courbe de sublimation sur le diagramme de phase ( $p \times T$ ) est plus élevée que celle de la courbe d'évaporation pour un corps pur quelconque.

Astuce : Considérer un cycle solide>liquide>gaz>solide au voisinage du point triple du corps pur considéré.

## Exercices recommandés

### PROBLÈME VIII COCOTTE-MINUTE

Expliquez qualitativement le principe de fonctionnement de l'autocuiseur (Cocotte-minute) en vous basant sur le diagramme de phase de l'eau.



### PROBLÈME IX ICE SKATING

Que se passe-t-il quand de la glace est mise sous pression ? Observez le diagramme de phase de l'eau et tentez d'expliquer, en se reposant sur la question précédente, pourquoi les patineurs peuvent glisser avec si peu de frottements. Ensuite, en se basant sur le diagramme de  $\text{CO}_2$ , serait-ce aussi possible de patiner sur de la glace carbonique ( $\text{CO}_2$  solide) à une température de  $-80^\circ\text{C}$  ?

