

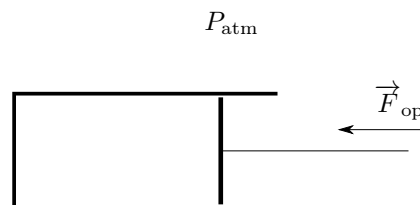
Transferts d'énergie - Premier principe de la thermodynamique

1 Transferts d'énergie

Exercice 1 * (en cours) Travail fourni par un opérateur

Un cylindre aux parois diathermanes (qui laissent passer la chaleur) contient n moles de gaz parfait dans les conditions initiales $P_1 = 5$ bar, $V_1 = 5$ L, T_{atm} . Un opérateur exerce sur le piston une force variable $F_{\text{op}}(t)$ pour faire varier sa position à sa guise.

Données pour l'atmosphère : $P_{\text{atm}} = 1$ bar ; T_{atm} .



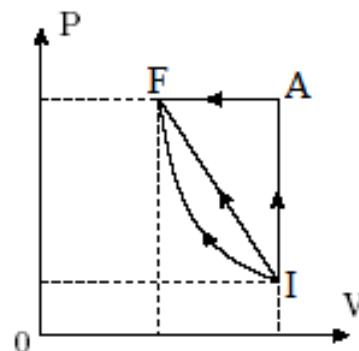
On fait subir au gaz supposé parfait des détentes de V_1 à $V_2 = 2V_1$ de deux manières différentes.

1. Exprimer P_{ext} en fonction de P_{atm} , $F_{\text{op}}(t)$ et S la section du cylindre.
2. L'opérateur effectue une détente isotherme du gaz. Calculer le travail total W reçu par le gaz ainsi que ceux fournis par la pression atmosphérique W_{atm} et par l'opérateur W_{op} .
3. Pour effectuer une détente brutale, l'opérateur lâche le piston. Même question que précédemment.

Exercice 2 * Divers modes de compression

On souhaite comprimer une mole d'un gaz parfait diatomique, initialement dans les conditions $P_i = 1,00$ bar, V_i et $\theta_i = 20^\circ\text{C}$, de manière à réduire son volume d'un facteur deux. On envisage pour cela différentes méthodes (représentées graphiquement ci-contre) :

- Méthode n°1 : une compression isotherme ;
- Méthode n°2 : un chauffage isochore suivi d'un refroidissement isobare quasi-statiques ;
- Méthode n°3 : un mode de transformation quasi-statique représenté dans le diagramme de Watt par un segment de droite.



Les trois transformations partagent le même initial et le même état final.

1. Exprimer puis calculer T_i et V_i .
2. Déterminer l'état final (P_f , V_f et T_f) du système à l'aide de P_i , V_i et T_i . Applications numériques.
3. Montrer que pour chacune des méthodes il est possible de déterminer le travail W reçu par le fluide soit par calcul, soit de façon graphique.
4. Pour la première méthode, déterminer le travail W reçu par le gaz par le calcul.
Pour la deuxième méthode, déterminer le travail W reçu par le gaz par le calcul puis de façon graphique.
Pour la troisième méthode, déterminer le travail W reçu par le gaz de façon graphique.

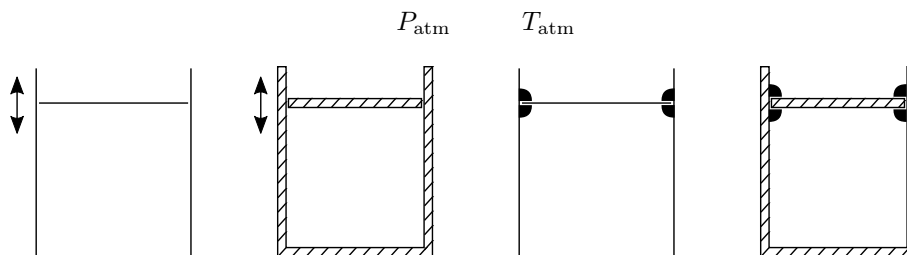
2 Premier principe

Exercice 3 * Équilibres

n moles d'un gaz parfait de coefficient γ sont enfermées dans une enceinte composée d'un cylindre et d'un piston. À l'état initial la pression de ce gaz est P_i , sa température T_i et son volume V_i . L'enceinte est placée dans une atmosphère de pressions P_{atm} et de température T_{atm} .

On suppose que la masse du piston est négligeable.

Déterminer, à l'aide des données de l'énoncé, l'état d'équilibre final du système (P_f , T_f et V_f) dans les cas suivants :



(commencer par les plus faciles)

1. Facile : Le piston qui ferme l'enceinte est mobile, et les parois de l'enceinte sont diathermanes (elles laissent passer la chaleur).
2. Difficile : Le piston qui ferme l'enceinte est mobile, mais les parois de l'enceinte sont athermanes (elles ne laissent pas passer la chaleur, le gaz est isolé thermiquement de l'extérieur).
3. Facile : Le piston qui ferme l'enceinte est soudé au cylindre, et les parois de l'enceinte sont diathermanes.
4. Facile : Le piston qui ferme l'enceinte est soudé au cylindre, et les parois de l'enceinte sont athermanes.

Exercice 4 * Transformation cyclique d'un gaz parfait

n moles de gaz parfait diatomique ($\gamma = 7/5$) subissent la transformation cyclique constituée des étapes suivantes :

- à partir de l'état initial A (P_A, V_A, T_A) un refroidissement isobare jusqu'à B qui permet de diviser le volume du gaz par deux ;
- une compression adiabatique quasistatique de B à C ;
- une détente isotherme de C à A qui ramène le gaz à l'état initial.

1. Représenter les transformations AB, BC et CA dans le diagramme de Watt (P, V).
2. Exprimer en fonction de P_A , V_A et T_A les autres pressions volumes et températures : P_B , V_B , T_B , P_C , V_C , T_C .
3. Exprimer à l'aide de T_A les travaux et transferts thermiques reçus par le gaz lors des différentes étapes.

Exercice 5 (*) Chauffage d'un gaz parfait

On enferme $n = 0,1$ mol de diazote dans un cylindre thermostaté à $\theta_0 = 27^\circ\text{C}$, fermé par un piston mobile sans frottement de section $S = 100\text{ cm}^2$. La pression atmosphérique vaut $P_0 = 1\text{ bar}$. On néglige la force pressante due au poids du piston devant la force pressante atmosphérique.

1. Calculer l'état d'équilibre initial (P_i , V_i , T_i) du gaz dans le cylindre.
2. Le piston étant bloqué, on met le système en contact avec un thermostat à $\theta_1 = 50^\circ\text{C}$.

– Peut-on qualifier la transformation de quasi-statique ? isochore ? monobare ? isobare ? monotherme ? isotherme ? adiabatique ?

– Déterminer l'état final (P_f , T_f , V_f) de l'air enfermé dans le récipient.

– Calculer le travail W reçu par le gaz.

– Calculer le transfert thermique Q reçu par le gaz.

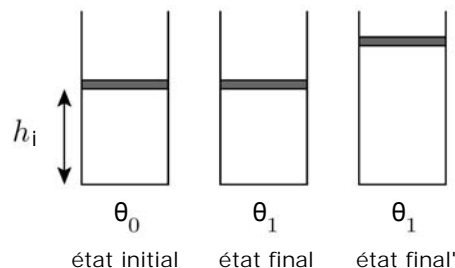
3. En repartant de l'état initial, on met à nouveau le système en contact avec un thermostat à $\theta_1 = 50^\circ\text{C}$, mais en laissant libre le piston.

– Peut-on qualifier la transformation de quasi-statique ? isochore ? monobare ? isobare ? monotherme ? isotherme ? adiabatique ?

– Déterminer l'état final (P'_f , T'_f , V'_f) de l'air enfermé dans le récipient.

– Calculer le travail W' reçu par le gaz.

– Calculer le transfert thermique Q' reçu par le gaz.



Exercice 6 * Compression monotherme d'un gaz parfait

n moles d'air, assimilé à un gaz parfait, sont contenues dans un cylindre, aux parois diathermanes (=diathermes, qui laissent passer la chaleur), fermé par un piston également diathermane, de section S et de masse négligeable. L'ensemble est placé dans l'air à la pression P_0 et la température T_0 .

L'air du cylindre subit une transformation monotherme car il n'échange de la chaleur qu'avec l'atmosphère extérieure dont la température est supposée constante.

Données : $P_0 = 10^5$ Pa ; $g = 10$ m.s⁻² ; $S = 0,1$ m² ; $M = 100$ kg ; $n = 4$ mol ; $T_0 = 300$ K ; $\gamma = 1,4$.

1. On note h l'altitude du piston dans le cylindre. Calculer l'état d'équilibre initial (P_i, T_i, h_i) du gaz dans le cylindre.
2. À $t = 0$ on pose sur le piston une masse M . Le piston descend brutalement, oscille, et du fait de phénomènes dissipatifs finit par s'immobiliser à une distance h_f , du fond du récipient.
 - Peut-on qualifier la transformation de quasi-statique ? isochore ? monobare ? isobare ? monotherme ? isotherme ? adiabatique ?
 - Déterminer l'état final (P_f, T_f, h_f) de l'air enfermé dans le récipient.
 - Calculer le travail W reçu par l'air contenu dans le cylindre.
 - Calculer le transfert thermique Q reçu par l'air contenu dans le cylindre.
3. Repartant de l'état initial, on pose successivement sur le piston des masses m ($m \ll M$) en attendant à chaque fois que la température de l'air intérieur se stabilise (à la valeur T_0) et que le piston s'immobilise ; on répète l'opération jusqu'à ce que la charge totale soit égale à M .
 - Peut-on qualifier la transformation de quasi-statique ? isochore ? monobare ? isobare ? monotherme ? isotherme ? adiabatique ?
 - Déterminer l'état final (P'_f, T'_f, h'_f) de l'air enfermé dans le récipient.
 - Calculer le travail W' reçu par l'air contenu dans le cylindre.
 - Calculer le transfert thermique Q' reçu par l'air contenu dans le cylindre.

Exercice 7 Élévation de température de freins à disques

Une automobile de masse $M = 836$ kg roulant à la vitesse $v = 72$ km.h⁻¹ s'arrête brusquement à l'aide de ses quatre freins à disques.

En assimilant ces derniers à des cylindres de rayon $r = 10$ cm et d'épaisseur $h = 1$ cm, de masse volumique $\mu = 8$ g.cm⁻³ de capacité thermique massique $c = 0,42$ J.kg, calculer leur élévation de température $\Delta\theta$, en supposant que toute la chaleur est absorbée par les disques.

Exercice 8 * Calorimétrie

Le calorimètre est un appareil destiné à mesurer les échanges de chaleur. Ces échanges peuvent se produire entre plusieurs corps, mettre en jeu des changements d'état ou des réactions chimiques. Le calorimètre constitue un système thermodynamique isolé, ce qui implique qu'il n'y a pas d'échange de matière et d'énergie (travail ou chaleur) avec le milieu extérieur. Néanmoins, cela ne signifie pas qu'il n'y a pas des transferts de chaleur entre les différentes parties de l'ensemble calorimétrique (composés objets de l'étude, accessoires et paroi du calorimètre...). Les expériences au calorimètre se font à pression extérieure constante.

Donnée $c_{eau} = 4,18$ J.g⁻¹.K⁻¹.

1. Démontrer que pour une transformation monobare entre deux états d'équilibre mécanique $\Delta H = Q$.
2. Un calorimètre (calorifugé) contient une masse $M = 95$ g d'eau à la température $\theta_1 = 20,0^\circ\text{C}$, on lui ajoute une masse $m = 71$ g d'eau à la température $\theta_2 = 50,0^\circ\text{C}$. Calculer la température θ_f à l'équilibre.
3. En fait le calorimètre et ses accessoires (agitateur, thermomètre...) possèdent une capacité calorimétrique C_{cal} dont il faut tenir compte.

Le calorimètre contient une masse d'eau $M = 95$ g d'eau à la température $\theta_1 = 20,0^\circ\text{C}$, on lui ajoute une masse $m = 71$ g d'eau à la température $\theta_2 = 50,0^\circ\text{C}$. Après quelques instants la température d'équilibre observée est $\theta_f = 31,3^\circ\text{C}$.

En déduire la valeur de la capacité thermique C_{cal} du calorimètre.
4. Le même calorimètre contient maintenant $M' = 100$ g d'eau à la température $\theta'_1 = 15,0^\circ\text{C}$. On y plonge un échantillon métallique de masse $m' = 25$ g qui sort d'une étuve à $\theta'_2 = 95,0^\circ\text{C}$. La température d'équilibre est $\theta'_f = 16,7^\circ\text{C}$.

Calculer la capacité calorifique massique moyenne c du métal dans ce domaine de température.

Exercice 9 Compression adiabatique d'un gaz parfait (attention long)

De l'air, assimilé à un gaz parfait à la température T_0 , est contenu dans un cylindre, aux parois adiabatiques, fermé par un piston également adiabatique, de section S et de masse négligeable. L'ensemble est placé dans l'air à la pression P_0 . À l'équilibre, le piston se trouve à la distance h_1 du fond du récipient.

Données : $P_0 = 10^5 \text{ Pa}$; $g = 10 \text{ m.s}^{-2}$; $S = 0,1 \text{ m}^2$; $M = 100 \text{ kg}$; $h_0 = 1 \text{ m}$; $T_0 = 300 \text{ K}$; $\gamma = 1,4$.

- On pose sur le piston une masse M . Le piston descend brutalement, oscille, et du fait de phénomènes dissipatifs finit par s'immobiliser à une distance h_1 , du fond du récipient.
 - Déterminer l'état final (P_1, T_1, h_1) de l'air enfermé dans le récipient (en appliquant le 1^{er} principe).
 - Calculer le travail W échangé entre l'air contenu dans le cylindre et le milieu extérieur.
- Repartant de l'état initial, on pose successivement sur le piston des masses m ($m \ll M$) en attendant à chaque fois que la température de l'air intérieur se stabilise (à la valeur T_0) et que le piston s'immobilise ; on répète l'opération jusqu'à ce que la charge totale soit égale à M .
 - Déterminer l'état final (P'_1, T'_1, h'_1) de l'air enfermé dans le récipient.
 - Calculer le travail W' échangé entre l'air contenu dans le cylindre et le milieu extérieur.

Exercice 10 Cycle de Lenoir

Un des premiers moteurs deux temps à combustion interne fonctionne de la manière suivante :

- L'air et le carburant sont admis dans le cylindre ; à la fin de la phase d'admission, l'air se trouve dans l'état A(P_1, V_1, T_1) ;
- La combustion du carburant (phase d'explosion) provoque une augmentation brutale de la pression à volume constant et fournit aux gaz un transfert thermique Q_1 ; à la fin de la phase, les gaz résiduels sont dans l'état B(P_2, V_1, T_2) ;
- Ils se détendent ensuite de manière adiabatique quasi-statique jusqu'à l'état C(P_1, V_2, T_3) ;
- Les gaz s'échappent du cylindre à la pression constante P_1 et un nouveau cycle recommence.

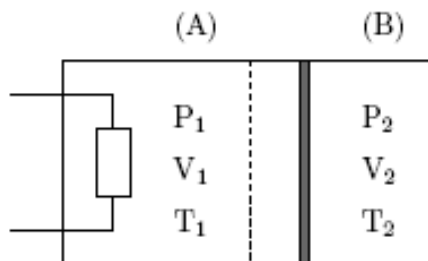
En négligeant la quantité de matière de carburant liquide, on assimilera l'air et les gaz brûlés à des gaz parfaits dont le coefficient $\gamma = 1,4$.

- Représenter, dans le diagramme de Watt, le cycle de transformations ABCA des gaz dans le cylindre.
- Calculer le travail W reçu par une mole de gaz au cours d'un cycle en fonction de R , γ et des températures T_1 , T_2 et T_3 .
- Calculer le rendement $r = \frac{-W_{cycle}}{Q_1}$ de ce moteur, d'abord en fonction γ et des températures T_1 , T_2 et T_3 puis en fonction de γ et du rapport des volumes $a = \frac{V_2}{V_1}$.
- Calculer r pour $a = 4$.

Exercice 11 Chauffage par une résistance électrique

Un cylindre horizontal indilatable est séparé en deux compartiments A et B par un piston d'épaisseur négligeable devant la longueur du cylindre et mobile sans frottement. Les parois du cylindre et le piston sont calorifugés. Dans l'état initial, les deux compartiments contiennent une même quantité d'air, assimilé à un gaz parfait de coefficient $\gamma = 1,4$, dans les mêmes conditions de température $T_0 = 293 \text{ K}$ et de pression $P_0 = 1 \text{ bar}$, et occupant le même volume $V_0 = 1 \text{ L}$. Une résistance électrique traversant le compartiment A permet de chauffer lentement le gaz le contenant jusqu'à ce que sa pression soit $P_1 = 3 \text{ bar}$.

- Déterminer l'état d'équilibre final : (P_2, V_2, T_2) pour le compartiment B et (P_1, V_1, T_1) pour le compartiment A.
- Déterminer le transfert thermique Q_1 reçu par le gaz du compartiment A.
- La résistance étant de 100Ω et l'intensité la traversant, 1 A , pendant combien de temps a-t-il fallu l'alimenter pour atteindre l'état final ?



Exercice 12 Détente dans le vide

Un récipient parfaitement calorifugé et aux parois indéformables est divisé en deux compartiments A et B, de même volume V_0 . Les deux compartiments communiquent par un petit tube muni d'un robinet. A contient un gaz parfait à $T_0 = 293$ K et B est vide. On ouvre le robinet et le gaz s'écoule ; on referme le robinet juste à l'équilibre des pressions. On mesure $T_1 = 240$ K.

1. Faire un bilan d'énergie sur l'ensemble du récipient. En déduire une relation entre T_A , T_B , n_A , n_B et T_0 .
2. Traduire l'équilibre des pressions dans les compartiments A et B. En déduire une relation entre T_A , n_A , n_B et T_B .
3. Exprimer puis calculer T_B .

Exercice 13 Calorimétrie

Un calorimètre en laiton pesant 100 g contient 200 g d'eau et un bloc d'aluminium pesant 140 g. La température initiale est 15°C . Une spirale de chauffage de résistance $R = 4\ \Omega$, et de capacité calorifique négligeable, est immergée dans l'eau. On fait passer un courant de 3 A pendant 2 min et on constate que la température du calorimètre devient $19,3^\circ\text{C}$. Quelle est la chaleur massique de l'aluminium ?

Données : $c_e = 4,18\ \text{J.K}^{-1}.\text{g}^{-1}$; $c_{\text{laiton}} = c_l = 0,418\ \text{J.K}^{-1}.\text{g}^{-1}$.

Exercice 14 Chauffage d'un établissement

On étudie le chauffage d'un établissement pendant une journée d'hiver. On appelle T_{ext} la température de l'air à l'extérieur de l'établissement : $T_{ext} = 270$ K. On suppose de plus qu'à tout moment, la température T à l'intérieur de l'établissement est uniforme. On appelle C la capacité thermique de l'ensemble de l'établissement, $C = 7,6 \cdot 10^7\ \text{J.K}^{-1}$.

On suppose que le transfert thermique vers l'extérieur dû aux déperditions à travers les murs et le toit, pendant la durée élémentaire dt , est égale à $\delta Q_P = aC(T - T_{ext})dt$, $a = 7,9 \cdot 10^{-5}\ \text{s}^{-1}$ étant une constante.

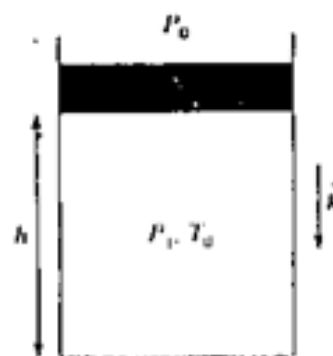
1. On arrête le chauffage de l'établissement à l'instant $t = 0$, la température intérieure étant $T_1 = 293$ K.
 - (a) En faisant un bilan thermique, établir l'équation différentielle vérifiée par T en fonction du temps.
 - (b) Déterminer la température T de l'école à un instant t quelconque.
 - (c) Calculer T à l'instant $t_1 = 3$ h.
2. On suppose maintenant qu'à l'instant $t = 0$, la température de l'établissement est $T_2 = 280$ K et que le chauffage de l'établissement est mis en fonctionnement ; les radiateurs dégagent une puissance thermique $P = 200$ kW constante dans le temps.
 - (a) Établir l'équation différentielle vérifiée par T en fonction du temps.
 - (b) Déterminer la température T de l'école à un instant t quelconque.
 - (c) Calculer l'instant t_2 pour lequel la température de l'école est égale à $T_1 = 293$ K.

Exercice 15 Oscillations d'un piston dans un cylindre

Un piston de masse M peut coulisser sans frottement dans un cylindre de section S placé dans l'air à la pression P_0 . Les parois du récipient et le piston sont adiabatiques.

Le cylindre contient de l'air assimilable à un gaz parfait, à la température T_0 ; à l'équilibre, le piston se trouve à une hauteur h du fond du récipient.

1. Calculer, à l'équilibre, la pression P_1 de l'air à l'intérieur du réservoir.
2. On pose sur le piston une masse $m \ll M$. Déterminer le mouvement du piston. Le piston s'arrêtera-t-il ? (on introduira le coefficient γ rapport des capacités thermiques à pression et volume constants).



Exercice 16 (*) Comment servir un café chaud

Un client exige que son café sucré soit à la température de 50°C . Le cafetier dispose d'une tasse de café à 50°C mais le sucre risque de le refroidir car il est à la température de 20°C . Il envisage alors trois méthodes pour satisfaire le client exigeant :

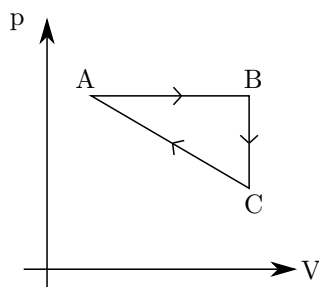
- Utiliser le café à 50°C et faire tomber le sucre de suffisamment haut.
- Utiliser le café à 50°C et introduire le sucre avec une vitesse suffisamment importante.
- Chauffer le café à une température supérieure.

La masse du sucre est de 5 g et sa capacité thermique massique est $c = 500 \text{ J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$. La capacité thermique du café est $C = 100 \text{ J.K}^{-1}$.

- De quelle hauteur le cafetier doit-il faire tomber le sucre s'il envisage la méthode a) ?
- Avec quelle vitesse doit-il lancer le sucre s'il envisage la méthode b) ?
- A quelle température doit-il préchauffer le café s'il envisage la méthode c) ?

Exercice 17 (*) Cycle triangulaire

Un fluide subit le cycle triangulaire quasi-statique $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$ suivant :



On appellera $p_1 = p_C$, $p_2 = p_A = p_B$, $V_1 = V_A$ et $V_2 = V_B = V_C$.

- Déterminer le travail W reçu par le fluide au cours du cycle.
- Que peut-on dire de la variation d'énergie interne du fluide au cours du cycle ?
- Déterminer la chaleur Q reçue par le fluide au cours du cycle.

Exercice 18 Évolution polytropique d'un gaz parfait

On dit qu'une évolution quasi-statique d'un gaz parfait est polytropique s'il existe une constante $k \neq 1$ telle que $pV^k = \text{cste}$ au cours de l'évolution.

- Montrer par un calcul différentiel que $d(pV) = (1 - k)p dV$.
- Calculer le travail des forces de pression entre un état initial (p_I, V_I, T_I) et un état final (p_F, V_F, T_F) .
- On considère que l'évolution du gaz parfait est, de plus, adiabatique. Donner la relation entre la capacité thermique molaire à volume constant, supposée indépendante de T , et k .

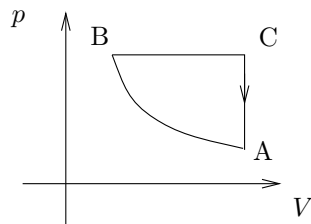
Exercice 19 (*) Évolution monobare brutale d'un gaz parfait

Une mole d'un gaz parfait de capacité thermique à volume constant $C_{V_m} = \frac{5R}{2}$ est contenue dans un cylindre vertical calorifugé de section S en contact avec une atmosphère extérieure à pression constante P_0 bar. Initialement le gaz est en équilibre et sa température vaut T_0 .

- On pose sur le piston une masse M telle que $Mg = SP_0$ et on laisse le système évoluer. Calculer, par application du premier principe, la pression P_1 et la température T_1 du gaz lorsqu'on atteint un nouvel état d'équilibre (1).
- L'état d'équilibre (1) étant atteint, on supprime la masse M et on laisse le système évoluer. Déterminer la pression P_2 et la température T_2 lorsqu'on atteint un nouvel état d'équilibre (2).

Exercice 20 Cycle d'un gaz réel

Une mole d'un gaz réel monoatomique contenue dans un cylindre décrit de manière quasi-statique un cycle ABCA.



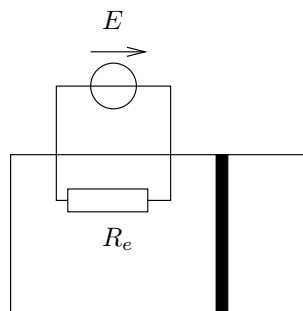
- L'évolution AB est isotherme à la température $T_A = 301$ K. Au point A, $V_A = 5,0$ L et au point B $V_B = 0,5$ L.
- L'évolution BC est isobare à la pression p_B .
- L'évolution CA est isochore.

Ce gaz obéit à l'équation d'état (pour une mole) : $\left(p + \frac{a}{V^2}\right)V = RT$ et son énergie interne est $U = \frac{3RT}{2} - \frac{a}{V}$ avec $a = 0,135 \text{ m}^6 \cdot \text{Pa} \cdot \text{mol}^{-2}$.

1. Calculer p_A , p_B , p_C et T_C .
2. Calculer le travail et le transfert thermique reçus par le fluide au cours de chacune des évolutions AB, BC et CA. Calculer leur somme et commenter.

Exercice 21 Utilisation d'une résistance

Un gaz parfait est contenu dans un cylindre. Le piston de masse négligeable se déplace librement lorsque, à partir d'un instant initial $t = 0$, on alimente la résistance R_e par une source de tension continue E . L'ensemble est calorifugé. Initialement le gaz est dans un état caractérisé par les paramètres p_0 , V_0 et T_0 puis évolue de façon quasi-statique. On désigne par C_V la capacité thermique à volume constant du gaz, supposée indépendante de T .



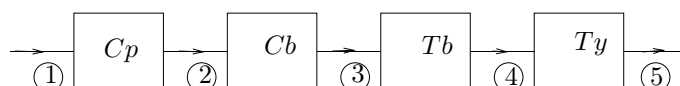
1. Déterminer la relation liant à tout instant la température T , le volume V occupé par le gaz, T_0 et V_0 .
2. Calculer la chaleur δQ dissipée par la résistance par effet Joule pendant un temps dt .
3. En appliquant le premier principe, déterminer l'évolution du volume $V(t)$.

Exercice 22 Turboréacteur

Un turboréacteur destiné à la propulsion d'avions est schématisé ci-dessous. L'air est comprimé dans un compresseur (Cp) calorifugé où il évolue de l'état E_1 à l'état E_2 . L'air traverse ensuite une chambre de combustion (Cb) où il subit un réchauffement isobare de l'état E_2 à l'état E_3 . Il se détend ensuite dans une turbine calorifugée (Tb) où il évolue de l'état E_3 à l'état E_4 . Enfin, il traverse une tuyère calorifugée (Ty), conduite de section variable où l'air acquiert une vitesse importante c_5 et évolue de l'état E_4 à l'état E_5 . Les données concernant les différents états sont résumées dans le tableau :

| État | E_1 | E_2 | E_3 | E_4 | E_5 |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| p en bars | 1,0 | 5,0 | 5,0 | 2,5 | 1,0 |
| T en K | 288 | ? | 1123 | 955 | 735 |

L'installation fonctionne en régime stationnaire. On néglige l'énergie potentielle de pesanteur et l'énergie cinétique de l'air sauf dans l'état E_5 . L'air est assimilé à un gaz parfait de capacité thermique massique à pression constante $c_p = 1 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et de masse molaire $M = 29 \text{ g.mol}^{-1}$.



1. En appliquant le premier principe au système ouvert, calculer la vitesse c_5 du gaz à la sortie de la tuyère.
2. Exprimer les travaux massiques w_{Cp} et w_{Tb} correspondant au transfert d'un kilogramme d'air respectivement dans le compresseur et dans la turbine en fonction de T_1 , T_2 , T_3 et T_4 . Sachant que le travail récupéré dans la turbine sert exactement à entraîner le compresseur, calculer T_2 .
3. Calculer le transfert thermique q correspondant au transfert d'un kilogramme d'air dans la chambre de combustion. En déduire le rendement du turboréacteur défini par $r = \frac{1/2 c_5^2}{q}$.

3 Premier principe et transitions de phases

Exercice 23 * (facile) Diagramme enthalpique

Cet exercice a pour but de vous familiariser avec les diagrammes enthalpiques (P, h) : P en ordonnée et h en abscisse.

On considère de l'eau dont le diagramme enthalpique est fourni en annexe (fluide R718). h représente l'enthalpie massique, v le volume massique, et s l'entropie massique (cf. chapitre suivant).

- Repérer sur le diagramme les domaines (L) , (V) et $(L)+(V)$.
- Le diagramme ne précise pas les lettres T (ou θ) sur les isothermes. Repérer les isothermes et tracer l'isotherme $\theta = 100^\circ\text{C}$.
Quelle est l'allure de l'isotherme pendant le changement d'état ? Justifier.
Repérer la pression de changement d'état (pression de vapeur saturante) à $\theta = 100^\circ\text{C}$. Était-ce prévisible ?
- Placer sur le diagramme le point critique C de l'eau et lire sa pression P_c et sa température θ_c .
- Sur la palier de changement d'état (transition de phase) à 150°C , placer les points correspondant aux fractions massiques $x_V = 0,25$, $x_V = 0,5$ et $x_V = 0,75$.
- On n'a pas représenté les courbes de volume massique v dans la partie liquide. En utilisant vos connaissances comparer les volumes massiques v du liquide aux volumes massiques du gaz.
- Que peut-on dire de l'allure des isothermes dans la partie liquide du diagramme ? Justifier.
Que peut-on dire de l'allure des isothermes dans la partie basse pression de la vapeur du diagramme ? Justifier.

Exercice 24 * (facile) Variation d'enthalpie

Cet exercice a pour but de vous entraîner aux différentes méthodes de mesure/calcul de ΔH sur un palier de changement d'état. Il permet aussi de vous familiariser avec les diagrammes enthalpiques (P, h) et les tables thermodynamiques.

On considère un système fermé de $m = 2\text{ kg}$ de fluide R600 dont le diagramme (P, h) est fourni en annexe. À l'état initial le système est un mélange liquide-vapeur à 50°C contenant $0,2\text{ kg}$ de vapeur. À l'état final le système est un mélange liquide-vapeur à 50°C contenant $1,5\text{ kg}$ de vapeur.

- Préliminaires.
Calculer x_{Vi} et x_{Li} à l'état initial. Calculer x_{Vf} et x_{Lf} à l'état final.
- Utilisation du diagramme (P, h)
Placer l'état initial I et final F sur le diagramme (P, h) .
Lire h_f et h_i sur le diagramme. Exprimer et calculer ΔH .
- Utilisation des tables thermodynamiques
Placer les états L et V aux extrémités du palier de changement d'état à 50°C sur le diagramme (P, h) et remplir le tableau suivant

| $T (^\circ\text{C})$ | $p_s (\text{bar})$ | $v_L (\text{m}^3.\text{kg}^{-1})$ | $h_L (\text{kJ}.\text{kg}^{-1})$ | v_V | h_V |
|----------------------|--------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-------|-------|
| 50 | | | | | |

Exprimer puis calculer ΔH à l'aide de $h_V(50^\circ\text{C})$, $h_L(50^\circ\text{C})$ et des fractions massiques.

- Utilisation de la chaleur latente massique
Déterminer la valeur de la chaleur latente massique de vaporisation à 50°C $\Delta_{\text{vaporisation}}h(50^\circ\text{C}) = \ell_{\text{vaporisation}}(50^\circ\text{C})$.
Exprimer puis calculer ΔH à l'aide de $\Delta_{\text{vaporisation}}h(50^\circ\text{C}) = \ell_{\text{vaporisation}}(50^\circ\text{C})$.

Exercice 25 (*) Transpiration

Quel volume d'eau devez-vous éliminer par jour par transpiration pour débarrasser votre corps des 75 watts de puissance thermique correspondant à votre métabolisme lorsque vous êtes au repos ? On prendra la température de la peau égale à 33°C et l'enthalpie massique de vaporisation de l'eau à cette température égale à $2420\text{ kJ}.\text{kg}^{-1}$. Commenter, sachant que, normalement, un être humain évacue par transpiration environ $0,5\text{ litre}$ par jour. Le fait de s'essuyer avec une serviette aide-t-il au refroidissement du corps ?

Exercice 26 * Calorimétrie (suite)

On introduit dans un calorimètre aux parois athermanes et de capacité thermique négligeable :

- $m_1 = 200$ g d'eau à la température $\theta_1 = 25^\circ\text{C}$
- deux glaçons de masse totale $m_2 = 20$ g à la température $\theta_2 = -5^\circ\text{C}$

On suppose que la transformation a lieu à pression extérieure constante (pression atmosphérique). Lorsque l'équilibre est réalisé, le mélange est liquide et le thermomètre indique $\theta_f = 15,3^\circ\text{C}$. Déterminer puis calculer numériquement l'enthalpie massique de fusion de l'eau à 0°C : $\Delta_{\text{fusion}}h(0^\circ\text{C})$.

Données :

- * capacité thermique massique de la glace : $c_g = 2,1 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- * capacité thermique massique de l'eau liquide : $c_e = 4,18 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

Exercice 27 (*) Mélange d'eau sous 2 états

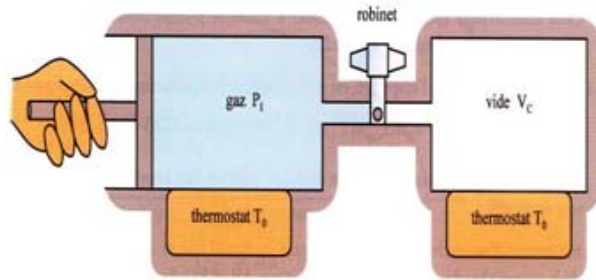
On mélange dans une enceinte calorifugée, sous une pression de 1 bar, une masse $m_1 = 20$ g d'eau liquide à $\theta_1 = 20^\circ\text{C}$ et $m_2 = 100$ g de glace à $\theta_2 = -10^\circ\text{C}$. On donne la chaleur latente de fusion $L_f(0^\circ\text{C}) = 335 \text{ kJ.kg}^{-1}$, la capacité thermique de l'eau liquide $c_\ell = 4,2 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et la capacité thermique de l'eau solide $c_s = 2,1 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

1. À l'aide du premier principe, montrer que pour le contenu de l'enceinte $\Delta H = 0$. Calculer l'état final du système : on pourra faire un test d'hypothèses : soit l'eau est totalement sous forme de liquide, soit totalement sous forme de solide, soit composée d'un mélange liquide/solide. On calculera dans chacun des cas les caractéristiques du système à l'équilibre pour ne garder que celui qui est physiquement cohérent.

Exercice 28 Compression avec changement d'état

Une mole de gaz est placée dans une enceinte thermostatée à une température T_0 inférieure à sa température critique T_C . À l'aide d'un piston mobile, on réduit progressivement le volume accessible au gaz jusqu'à obtenir sa liquéfaction totale. La pression initiale du gaz est notée P_1 .

À la température T_0 , la pression de vapeur saturante est notée P_0 et l'enthalpie molaire de vaporisation du système $\Delta_{\text{vap}}H_m$. Hors de la zone d'équilibre liquide-gaz, le système est assimilé à un gaz parfait ou à une phase condensée idéale de volume molaire V_m .

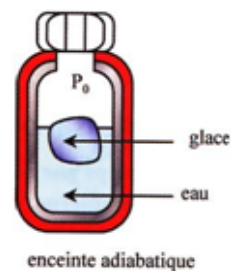


1. Représenter, dans le diagramme PT , puis dans celui de Clapeyron, l'évolution du système.
2. Effectuer un bilan énergétique complet du système en distinguant deux étapes dans la transformation.
3. On bloque le piston, puis on ouvre l'accès à une cavité initialement vide de volume V_C . Le volume du tube qui relie les deux parties de l'enceinte est négligé.
 - (a) Exprimer la condition portant sur V_C pour que le gaz se vaporise intégralement au cours de cette détente.
 - (b) Exprimer la fraction molaire de liquide à l'issue de la détente si la condition précédente n'est pas remplie.

Exercice 29 Évolution d'un système diphasé

Dans une enceinte parfaitement calorifugée, on mélange une masse m_1 d'eau liquide à la température $T_{i1} = 280$ K avec une masse m_2 de glace à la température $T_{i2} = 260$ K. Sous ces deux états, le corps pur est assimilé à une phase condensée idéale. On donne les capacités thermiques massiques de la glace et de l'eau liquide, et on les suppose constantes : $c_g = 1,10 \text{ J.g}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et $c_e = 4,18 \text{ J.g}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

Le système évolue sous une pression extérieure P_0 constante, pour laquelle la température d'équilibre solide-liquide vaut $T_E = 273$ K et l'enthalpie massique de fusion $\Delta_{fus}h = 333 \text{ J.g}^{-1}$. On néglige le transfert thermique entre le système et le pressostat.



- Prévoir qualitativement l'état final du système à l'issue de son évolution, en distinguant trois cas selon les proportions relatives de glace et d'eau liquide.
 - Effectuer un bilan énergétique du système au cours de l'évolution. En déduire l'expression de la température finale T_F lorsqu'il est à l'état solide. Établir la condition sur m_1 et m_2 qui conduit à cet état final.
 - Reprendre la démarche précédente pour un état final entièrement liquide.
- Exprimer la fraction massique d'eau liquide lorsque le système final est diphasé.
- On choisit $m_1 = 500$ g et $m_2 = 200$ g.
 - Déterminer l'état final du système (température et composition).

Exercice 30 (*) Détente isochore d'une vapeur d'eau saturante

Un récipient fermé et indéformable, de volume $V = 1$ L contient $m = 10$ g de vapeur d'eau saturante dans l'état initial I ($T_I = 485$ K, $p_I = 20$ bar, $x_{VI} = 1$). On le met en contact avec un thermostat de température $T_0 = 373$ K. Le mélange est diphasique dans l'état final.

Les tables thermodynamiques de l'eau indiquent les valeurs suivantes caractérisant les courbes d'ébullition ($x_L = 1$) et de rosée de l'eau ($x_V = 1$) :

| T (K) | p_s (bar) | v_L ($\text{m}^3.\text{kg}^{-1}$) | h_L ($\text{kJ}.\text{kg}^{-1}$) | v_V | h_V |
|---------|-------------|---------------------------------------|--------------------------------------|--------|-------|
| 485 | 20 | $1,18.10^{-3}$ | 909 | 0,0998 | 2801 |
| 373 | 1 | $1,04.10^{-3}$ | 418 | 1,70 | 2676 |

- Diagramme (P, v)
 - Justifier que le volume massique est constant.
 - Représenter la transformation dans un diagramme de Clapeyron.
- Déterminer l'état d'équilibre final.
- Bilan énergétique
 - Calculer la variation d'enthalpie du système lors de la transformation.

Exercice 31 * Vaporisation sous vide

On étudie ici la vaporisation dans le vide de $m = 2$ g d'eau liquide. À l'état initial, l'eau est liquide à la pression atmosphérique $P_0 = 10^5$ Pa et à la température $T_0 = 290$ K. On introduit cette eau dans un réservoir initialement vide, de volume $V = 5.10^{-3}$ m³.

Données :

La vapeur d'eau sera considérée comme un gaz parfait. $R = 8,314$ J.K⁻¹.mol⁻¹.

$M(\text{eau}) = 18$ g.mol⁻¹.

Capacité thermique massique de l'eau liquide : $c_l = 4,19$ kJ.K⁻¹.kg⁻¹.

Pression de vapeur saturante à T_1 : $P_S(T_1) = 0,46.10^5$ Pa.

Chaleur latente massique de vaporisation de l'eau à T_1 : $L_v(T_1) \stackrel{\text{def}}{=} \Delta_{\text{vap}}h(T_1) = 2300$ kJ.kg⁻¹.

Le réservoir et son contenu sont portés à la température $T_1 = 350$ K par mise en contact avec un thermostat. On atteint un nouvel état d'équilibre. L'eau est alors sous forme d'un mélange liquide/vapeur.

1. Diagramme (P, v)
Représenter l'état initial et l'état final dans un diagramme de Clapeyron.
2. État d'équilibre final
 - (a) Que peut-on dire du volume occupé par les phases condensées devant celui occupé par la vapeur ?
 - (b) Déterminer les masses d'eau liquide m_l et d'eau vapeur m_v à T_1 .
3. Bilan énergétique
 - (a) Calculer la variation d'enthalpie du système.

Exercice 32 Équilibre liquide-vapeur du fréon

On étudie le fréon pouvant exister sous forme liquide ou gazeuse.

Données : Chaleur latente de vaporisation : à $\theta_1 = 0^\circ\text{C}$, $L_1 = 18,7$ kJ.mol⁻¹

et à $\theta_2 = -30^\circ\text{C}$, $L_2 = 20,2$ kJ.mol⁻¹

Pression de vapeur saturante : à $\theta_1 = 0^\circ\text{C}$, $P_{s1} = 3,08$ bar

et à $\theta_2 = -30^\circ\text{C}$, $P_{s2} = 1,00$ bar

Capacité calorifique molaire du fréon liquide : $c = 0,11$ kJ.mol⁻¹

1. État initial : une mole de fréon, avec un équilibre équiolaire de vapeur et de liquide, occupant le volume $V = 3,47$ L à la température de 0°C . On lui fait subir un refroidissement isochore jusqu'à -30°C .
 - (a) Représenter la transformation dans un diagramme (P, v)
 - (b) Déterminer la fraction de vapeur dans l'état final.
 - (c) Déterminer les variations d'enthalpie, d'énergie interne et d'entropie du fréon au cours de cette transformation.
 - (d) Déterminer le travail et la chaleur échangés par le fréon au cours de cette transformation.
2. État initial : une mole de fréon, avec un équilibre équiolaire de vapeur et de liquide, occupant $V = 9,79$ L à la température de -30°C . On lui fait subir une compression adiabatique quasi-statique jusqu'à 0°C .
 - (a) Représenter la transformation dans un diagramme (P, v).
 - (b) Déterminer la fraction de vapeur dans l'état final.
 - (c) Déterminer le volume final.
 - (d) Déterminer les variations d'enthalpie, d'énergie interne et d'entropie du fréon au cours de cette transformation.
 - (e) Déterminer le travail et la chaleur échangés par le fréon au cours de cette transformation.

Transferts d'énergie - Premier principe de la thermodynamique

Indication 1

1. $P_{\text{ext}}(t) = P_{\text{atm}} + \frac{F_{\text{op}}(t)}{S}$
2. $W = -nRT_{\text{atm}} \ln 2 = -P_1 V_1 \ln 2$; $W_{\text{atm}} = -P_{\text{atm}} V_1$; $W_{\text{op}} = -P_1 V_1 \ln 2 + P_{\text{atm}} V_1$
3. $W = -P_{\text{atm}} V_1$; $W_{\text{atm}} = -P_{\text{atm}} V_1$; $W_{\text{op}} = 0$

Indication 2

3. $W = nRT_i \ln 2$; $W = P_i V_i = nRT_i$; $W = \frac{3}{4} P_i V_i = \frac{3}{4} nRT_i$

Indication 3

1. $P_f = P_{\text{atm}}$; $T_f = T_{\text{atm}}$; $V_f = \frac{nRT_{\text{atm}}}{P_{\text{atm}}}$
2. $P_f = P_{\text{atm}}$; $V_f = \frac{1}{\gamma} \left(\frac{P_i}{P_{\text{atm}}} + (\gamma - 1) \right) V_i$; $T_f = \frac{1}{\gamma} \left(T_i + \frac{(\gamma - 1)P_{\text{atm}}V_i}{nR} \right)$
3. $T_f = T_{\text{atm}}$; $V_f = V_i$; $P_f = \frac{nRT_{\text{atm}}}{V_i}$
4. $V_f = V_i$; $T_f = V_i$; $P_f = P_i$

Indication 4

2. $P_B = P_A$; $V_B = \frac{V_A}{2}$; $T_B = \frac{T_A}{2}$; $P_C = 2^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} P_A$; $V_C = \frac{V_A}{2^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}}$; $T_C = T_A$
3. $W_{AB} = \frac{1}{2} nRT_A$; $Q_{AB} = -\frac{1}{2} \frac{\gamma nR}{\gamma - 1} T_A$; $W_{BC} = \frac{1}{2} \frac{nR}{\gamma - 1} T_A$; $Q_{BC} = 0$; $W_{CA} = -\ln 2 \frac{\gamma nR}{\gamma - 1} T_A$; $Q_{CA} = \ln 2 \frac{\gamma nR}{\gamma - 1} T_A$

Indication 5

$\gamma = 7/5$ car N_2 (considéré comme un GP) diatomique à température ambiante

1. $P_i = P_0$; $T_i = T_0$; $V_i = \frac{nRT_0}{P_0}$
2. $V_f = \frac{nRT_0}{P_0}$; $T_f = T_1$; $P_f = \frac{T_1}{T_0} P_0$; $Q = \frac{5}{2} nR(T_1 - T_0) = \frac{5}{2} nR(\theta_1 - \theta_0)$; $W = 0$
3. $T'_f = T_1$; $P'_f = P_0$; $V'_f = \frac{nRT_1}{P_0}$; $Q' = \frac{7}{2} nR(T_1 - T_0) = \frac{7}{2} nR(\theta_1 - \theta_0)$; $W' = nR(T_0 - T_1) = nR(\theta_0 - \theta_1)$

Indication 6

1. $P_i = P_0$; $T_i = T_0$; $h_i = \frac{nRT_0}{P_0 S}$
2. $P_f = P_0 + \frac{Mg}{S}$; $T_f = T_0$; $h_f = \frac{nRT_0}{S \left(P_0 + \frac{Mg}{S} \right)}$; $W = \frac{nRT_0 Mg}{SP_0}$; $Q = -\frac{nRT_0 Mg}{SP_0}$
3. $P'_f = P_0 + \frac{Mg}{S}$; $T'_f = T_0$; $h'_f = \frac{nRT_0}{S \left(P_0 + \frac{Mg}{S} \right)}$; $W' = nRT_0 \ln \left(1 + \frac{Mg}{P_0 S} \right)$; $Q' = -nRT_0 \ln \left(1 + \frac{Mg}{P_0 S} \right)$

Indication 8

2. $\theta_f = \frac{C_{\text{eau}20^\circ} \theta_1 + C_{\text{eau}50^\circ} \theta_2}{C_{\text{eau}20^\circ} + C_{\text{eau}50^\circ}} = \frac{M\theta_1 + m\theta_2}{M + m}$
3. $C_{\text{cal}} = c_{\text{eau}} \left(m \frac{\theta_2 - \theta_f}{\theta_f - \theta_1} - M \right)$
4. $c = \frac{(M'c_{\text{eau}} + C_{\text{cal}})(\theta_f - \theta'_1)}{m'(\theta'_2 - \theta_f)}$

Indication 10

2. $W_{\text{cycle}} = R \left(\frac{T_3 - T_2}{\gamma - 1} + T_3 - T_1 \right)$
3. $r = 1 - \gamma \left(\frac{T_3 - T_1}{T_2 - T_1} \right) = 1 - \gamma \left(\frac{a - 1}{a^\gamma - 1} \right) = 0,30$

Indication 11

1. $P_2 = P_1 = 3.10^5 \text{ Pa}$; $V_2 = 0,456 \text{ L}$; $T_2 = 401 \text{ K}$; $V_1 = 1,54 \text{ L}$; $T_1 = 1360 \text{ K}$
2. $Q_1 = 401 \text{ J}$

Indication 12

1. $n_A T_A + n_B T_B = (n_A + n_B) T_0$
2. $n_A T_A = n_B T_B$
3. $T_B = \frac{T_A T_0}{2T_A - T_0} = 376 \text{ K}$

Indication 13

1. $c_a = \frac{1}{m_a} \left(\frac{R_i^2 \Delta t}{T_f - T_i} - m_l c_l - m_e c_e \right) = 0,906 \text{ J.g}^{-1}.\text{K}^{-1}$

Indication 14

1. (a) $\frac{dT}{dt} + aT = aT_{ext}$
(b) $T = T_{ext} + (T_1 - T_{ext})e^{-at}$
(c) $T(t_1) = 279 \text{ K}$
2. (a) $\frac{dT}{dt} + aT = aT_{ext} + \frac{P}{c}$
(b) $T = \left(T_{ext} + \frac{P}{ac} \right) + \left(T_2 - T_{ext} - \frac{P}{ac} \right) e^{-at}$
(c) $t_2 = \frac{1}{a} \ln \left(\frac{ac(T_2 - T_{ext}) - P}{ac(T_1 - T_{ext}) - P} \right) = 3,31 \text{ h}$

Indication 15

1. $P_1 = P_0 + \frac{M_0 g}{S}$
2. $\ddot{z} + \frac{gP_1 S}{h(M+m)} z = -\frac{mg}{M+m}$

Indication 18

2. $W = \frac{nR(T_F - T_I)}{k-1}$
3. $C_{Vm} = \frac{R}{k-1}$

Indication 19

1. $P_1 = P_{ext} = 2P_0$; $T_1 = \frac{9}{7}T_0$
2. $P_2 = P_0$; $T_2 = \frac{6}{7}T_1 = \frac{54}{49}T_0$

Indication 20

2. * $W_{A \rightarrow B} = -RT_A \ln \left(\frac{V_B}{V_A} \right) - a \left(\frac{1}{V_B} - \frac{1}{V_A} \right)$; $Q_{A \rightarrow B} = RT_A \ln \left(\frac{V_B}{V_A} \right)$
- * $W_{B \rightarrow C} = -p_B (V_C - V_B)$; $Q_{B \rightarrow C} = \frac{3}{2} R(T_C - T_A) - a \left(\frac{1}{V_C} - \frac{1}{V_B} \right) + p_B (V_C - V_B)$
- * $W_{C \rightarrow A} = 0$; $Q_{C \rightarrow A} = \frac{3}{2} R(T_A - T_C)$

Indication 21

1. $\frac{V}{T} = \frac{V_0}{T_0}$
3. $V(t) = V_0 + \frac{V_0 E^2}{T_0 C_P R_e} t$

Indication 22

1. $(e_{c5} - e_{c4}) + (h_5 - h_4) = w_{Ty} + q_{Ty} = 0$; $c_5 = \sqrt{2c_P(T_4 - T_5)}$
2. $w_{Cp} = c_p(T_2 - T_1)$; $w_{Tb} = c_p(T_4 - T_3)$; $w_{\text{fourni par tb.}} = w_{\text{reçu par cp.}} \Rightarrow -w_{Tb} = +w_{Cp} \Rightarrow T_2 = 456 \text{ K}$
3. $q = c_p(T_3 - T_2)$; $r = \frac{T_4 - T_5}{T_3 - T_2}$

Indication 23

2. Vraies valeurs : $\theta_c = 374 \text{ °C}$, $P_c = 221 \text{ bar}$.
3. À pression atmosphérique ($\approx 1 \text{ bar}$) l'eau bout à 100 °C .
5. $v_L \ll v_V$
6. Pour une phase condensée $h(T)$
Pour un GP $h(T)$

Indication 24

1. $x_{Vi} = 0, 1$; $x_{Vf} = 0, 75$
2. $\Delta H = m\Delta h = m(h_f - h_i) \approx 424.10^3 \text{ J}$
3. $\Delta H = m\Delta h = m([x_V h_V + x_L h_L]_f - [x_V h_V + x_L h_L]_i)$
 $= m([x_{Vf} h_V(50^\circ\text{C}) + x_{Lf} h_L(50^\circ\text{C})] - [x_{Vi} h_V(50^\circ\text{C}) + x_{Li} h_L(50^\circ\text{C})]) \approx 424.10^3 \text{ J}$
4. $\Delta_{\text{vaporisation}} h(50^\circ\text{C}) = \ell_{\text{vaporisation}}(50^\circ\text{C}) \approx 331.10^3 \text{ J}$
État initial : 0,2 kg de V et 1,8 kg de L à 50°C . État final : 1,5 kg de V et 0,5 kg de L à 50°C .
Il y a donc 1,3 kg de liquide qui s'est vaporisé à $50^\circ\text{C} \Rightarrow \Delta H = \Delta m_V \times \ell_{\text{vaporisation}}(50^\circ\text{C}) \approx 424.10^3 \text{ J}$

Indication 26 $\Delta_{\text{fusion}} h(0^\circ\text{C}) = \frac{m_2 c_g \theta_2 - m_2 c_e \theta_f + m_1 c_e (\theta_1 - \theta_f)}{m_2} = 326 \text{ kJ.kg}^{-1}$

Indication 27

- Cas liquide : $\Delta H = 0 = m_1 c_\ell (\theta_f - \theta_1) + [m_2 c_s (0 - \theta_2) + m_2 L_f + m_2 c_\ell (\theta_f - 0)]$
- Cas solide : $\Delta H = 0 = [m_1 c_\ell (0 - \theta_1) + m_1 (-L_f) + m_1 c_s (\theta_f - 0)] + m_2 c_s (\theta_f - \theta_2)$
- Mélange (état final avec m_ℓ liquide et m_s solide) : $\Delta H = 0 = [m_1 c_\ell (0 - \theta_1) + (m_1 - m_\ell) (-L_f)] + [m_2 c_s (0 - \theta_2)]$

Indication 28

2. $H_B - H_A = -\Delta_{\text{vap}} H_m$; $U_B - U_A = -\Delta_{\text{vap}} H_m - P_0 V_m + RT_0$; $Q_{A \rightarrow B} = -\Delta_{\text{vap}} H_m + RT_0 \ln \frac{P_1}{P_0}$
 $W_{A \rightarrow B} = -P_0 V_m + RT_0 - RT_0 \ln \frac{P_1}{P_0}$
1. Vaporisation totale si $V_c > \frac{RT_0}{P_0}$. Si $V_c < \frac{RT_0}{P_0}$, $x_1 = \frac{P_0 V_c - RT_0}{P_0 V_c}$.

Indication 29

- État final solide si $\frac{m_1}{m_2} < \frac{c_g(T_E - T_{2i})}{c_l(T_{1i} - T_E) + \Delta_{fus}h} = \left(\frac{m_1}{m_2}\right)_{c1}$.
État final liquide si $\frac{m_1}{m_2} > \frac{c_g(T_E - T_{2i}) + \Delta_{fus}h}{c_l(T_{1i} - T_E)} = \left(\frac{m_1}{m_2}\right)_{c2}$.
- Si $\left(\frac{m_1}{m_2}\right)_{c1} < \frac{m_1}{m_2} < \left(\frac{m_1}{m_2}\right)_{c2}$, alors l'état final est un équilibre liquide solide à T_E dans lequel la fraction d'eau liquide est : $x_l = \frac{m_1 \Delta_{fus}h - m_2 c_g(T_E - T_{2i}) - m_1 c_l(T_E - T_{1i})}{(m_1 + m_2) \Delta_{fus}h}$

Indication 30

- $v_I = [x_V v_V + x_L v_L]_I = 1 \times v_V(485 \text{ K}) + 0 \times v_L(485 \text{ K})$
 $v_F = [x_V v_V + x_L v_L]_F = x_{VF} v_V(373 \text{ K}) + x_{LF} v_L(373 \text{ K})$
 $v_F = v_I \Rightarrow x_{VF} = 0,0581$
- (a) $h_I = [x_V h_V + x_L h_L]_I = 1 \times h_V(485 \text{ K}) + 0 \times h_L(485 \text{ K})$
 $h_F = [x_V h_V + x_L h_L]_F = x_{VF} h_V(373 \text{ K}) + x_{LF} h_L(373 \text{ K})$
 $\Delta H = m([x_{VF} h_V(373 \text{ K}) + x_{LF} h_L(373 \text{ K})] - h_V(485 \text{ K})) = -22,5 \text{ kJ}$
- (b) $\Delta H = \Delta U + \Delta(PV) \Rightarrow Q = \Delta H - V(p_F - p_I) = -20,6 \text{ kJ}$

Indication 31

- (a) $m_v = \frac{P_S(T_1)VM}{RT_1} = 1,42 \text{ g}$
- (a) Chemin le plus simple IL(T₁)F :
 $H_{L(T_1)} - H_I = mc_1(T_1 - T_0)$ (phase condensée)
 $H_F - H_{L(T_1)} = ?$
État initial L(T₁) : m kg de L à la température T_1
État final F : m kg de fluide dont m_L de L et m_V de V à la température T_1
Il y a donc eu vaporisation d'une masse m_V à la température T_1
 $\Rightarrow H_F - H_{L(T_1)} = m_V L_v(T_1)$
 $\Delta H = H_F - H_I = mc_1(T_1 - T_0) + m_V L_v(T_1) = 3,77 \text{ kJ}$

Indication 32

- (b) $x_{VF} = \frac{P_{s2}V}{RT_2} = 0,172$
(c) $H_F - H_I = n[x_{VF}L_2 + c(T_2 - T_1) - x_{VI}L_1] = -9,18 \text{ kJ}$; $U_F - U_I = H_F - H_I - (P_{s2} - P_{s1})V = -8,45 \text{ kJ}$
(d) $W = 0$ et $Q = -8,45 \text{ kJ}$
- (b) $x'_{VF} = \frac{x_{VI} \frac{l_2}{T_2} + c \ln \frac{T_2}{T_1}}{\frac{l_1}{T_1}} = 0,420$
(c) $V_F = x'_{VF} \frac{RT_1}{P_{s1}} = 3,10 \text{ L}$
(d) $H'_F - H'_I = n[x'_{VF}L_2 + c(T_1 - T_2) - x_{VI}L_2] = 1,05 \text{ kJ}$; $U'_F - U'_I = H'_F - H'_I - (P_{s1}V_F - P_{s2}V) = 1,03 \text{ kJ}$
(e) $W = 1,03 \text{ kJ}$ et $Q = 0$