MP*/MPI* Révisions de thermodynamique

Exercice 1 Compression d'un gaz

Un cylindre vertical à parois diathermanes est fermé par un piston de masse m et de surface S. Il renferme n moles de gaz parfait dont on suppose connu γ. Initialement, on bloque le piston ; le gaz est dans un état d'équilibre (p_0, T_0, V_0). Le système est thermostaté à T_0, à la pression atmosphérique P_0. On prendra : $T_0 = 290\,\mathrm{K}$, $p_0 = 1{,}0 \times 10^5$ Pa, $\gamma = 7/5$, $n = 0{,}5\,\mathrm{mol}$ et $mg/S = xp_0$ avec $x = 0,5$.

1. On libère le piston tout en assurant une descente infiniment lente.
   (a) Déterminer l'état final.
   (b) Déterminer les échanges énergétiques.
   (c) Déterminer la variation d'entropie de l'air contenu dans le cylindre, du thermostat, de l'univers, et l'entropie créée.
2. On libère cette fois brusquement le piston qui devient mobile sans frottements. Reprendre les questions précédentes

Exercice 2 Cycle de Carnot

On considère un moteur fonctionnant selon un cycle de Carnot entre les températures T_1 et $T_2 > T_1$

1. Représenter le cycle réversible en coordonnées de Clapeyron en indiquant la nature de chaque partie du cycle.
2. Définir le rendement de ce moteur.
3. Exprimer ce rendement en fonction de T_1 et T_2.
4. On réalise un autre moteur fonctionnant avec les mêmes températures T_1 et T_2. Que peut - on dire du rendement de ce moteur ?

Le cycle de Carnot peut également modéliser des machines thermiques réceptrices.

5. Définir puis calculer l'efficacité de la machine s'il s'agit d'une machine frigorifique et s'il s'agit d'une pompe à chaleur.

Exercice 3 Cycle Diesel

Un gaz parfait diatomique subit les transformations lentes suivantes :

— état (1) → état (2) : compression adiabatique ; état (2) → état (3) : dilatation isobare ; état (3) → état (4) : détente adiabatique ; état (4) → état (1) : refroidissement isochore.

On note $a = V_1/V_2$ et $b = V_4/V_3$ les rapports volumétriques des évolutions adiabatiques.

1. Proposer une expression du rendement r d'un moteur fonctionnant suivant ce cycle.
2. Donner son expression en fonction de a et b. Application numérique.

Données : $a = 9$; $b = 3$.

Exercice 4 Moteur avec 2 pseudo-sources

Un moteur fonctionne de manière réversible entre deux pseudo-sources de même capacité thermique $C = 100\,\mathrm{kJ/K}$.

— une pseudo-source chaude de température $T_c(t)$;

— une pseudo-source froide de température $T_f(t)$.

Les températures initiales des pseudo-sources chaude et froide sont respectivement : $T_{c0} = 400\,\mathrm{K}$ et $T_{f0} = 300\,\mathrm{K}$.

1. En utilisant le deuxième principe de la thermodynamique, établir une relation entre $T_c(t)$, $T_f(t)$, T_{c0} et T_{f0}.

2. En déduire la température finale T_{FIN} des deux sources quand le moteur s'arrête de fonctionner.
3. Calculer le travail fourni par le moteur sur toute sa durée de fonctionnement.
4. Calculer le rendement η du moteur. Le comparer avec le rendement η_C qu'on aurait obtenu en maintenant les températures des sources à leur valeur initiale.

Exercice 5 Variation d'entropie lors d'un mélange de deux gaz parfaits

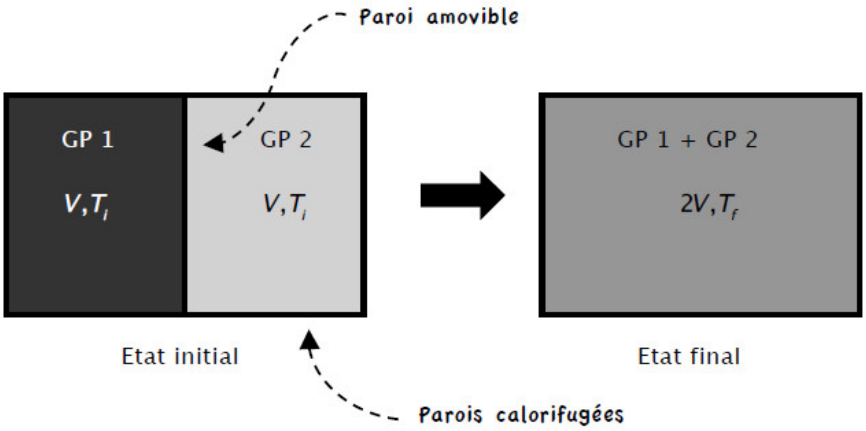


FIGURE 1 – Mélange de deux gaz parfaits

À l'instant initial, les deux gaz sont à la même température T_i et on enlève la paroi amovible. Les deux gaz parfaits vont se mélanger et atteindre une température d'équilibre finale T_f. La quantité totale de gaz est de 1 mole. Calculer la variation d'entropie qui accompagne ce processus.

Exercice 6 Détente d'un gaz

Un gaz parfait est contenu dans un cylindre de section $S = 10\,\text{cm}^2$. Initialement, les cales bloquent le piston à une hauteur $h = 50\,\text{cm}$. On mesure une pression à l'intérieur de l'enceinte $p_1 = 2\,\text{atm}$.
Le cylindre aux parois diathermes est plongé dans un lac à la température $\theta_0 = 20\,°\text{C}$.

1. Déterminer le nombre de moles de gaz dans l'enceinte.

On supprime les cales, libérant ainsi le mouvement du piston mobile sans frottement et supposé sans masse.

2. Déterminer les paramètres de l'état final.
3. Déterminer le travail des forces de pression au cours de la transformation ainsi que le transfert thermique avec le lac.

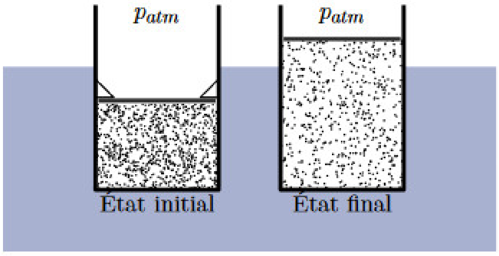


FIGURE 2 – Avant/Après

Exercice 7 Effet Joule

Un conducteur ohmique de résistance $R = 20{,}0\,\Omega$, de masse $m_c = 200\,\text{g}$, de capacité thermique massique $c_c = 385\,\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$, parcouru par un courant d'intensité $I = 10{,}0\,\text{A}$ est plongé dans une masse $m_e = 500\,\text{g}$ d'eau (de capacité thermique massique $c_e = 4{,}19 \times 10^3\,\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ pendant un intervalle de temps $\Delta t = 30{,}0\,\text{s}$. On note Σ le système constitué par la réunion de l'eau et du conducteur ohmique.

1. La température de l'ensemble est maintenue constante à $T_0 = 290\,\text{K}$ par contact avec un thermostat. Calculer la variation d'entropie de Σ ainsi que l'entropie créée.
2. Partant d'une température $T_0 = 290\,\text{K}$, on plonge le système Σ dans un calorimètre aux parois athermanes et de capacité thermique négligeable.
   (a) Calculer la température finale du système Σ.
   (b) Calculer la variation d'entropie de Σ ainsi que l'entropie créée.

Exercice 8 Contact avec une suite de N thermostats

On souhaite porter progressivement un solide, de capacité thermique C de la température T_0 à la température $T_f > T_0$. Pour réaliser cette transformation, le solide est mis successivement en contact avec N thermostats de température T_k en progression arithmétique :

$$T_k = T_0 + k\frac{T_f - T_0}{N} \qquad \text{avec} \qquad k = 1, 2, \dots, N$$

1. Déterminer l'entropie créée S_k^c au cours du k^{e}contact correspondant au passage du solide de la température T_{k-1} à la température T_k.
2. On pose $\epsilon_k = \dfrac{T_k - T_{k-1}}{T_k}$. Donner une expression approchée de S_k^c dans l'hypothèse $\epsilon_k \ll 1$.
3. Exprimer l'entropie créée S^c à l'issue des N contacts en en fonction de T_0, T_f, N, C et d'une somme sur k.
4. Quel résultat obtient-on en faisant tendre N vers l'infini ? Commenter.

Exercice 9 Réchauffement climatique et dilatation des océans

Seize petits états insulaires se sont réunis en septembre 2009 dans le cadre du Forum du Pacifique à Aukland en Nouvelle-Zélande et ont produit, à l'issue du sommet, un communiqué qui souligne que « le changement climatique reste la plus grosse menace contre les moyens d'existence, la sécurité et le bien-être des populations du Pacifique. » Ces petits états insulaires sont particulièrement exposés aux conséquences des changements climatiques et sont d'une grande vulnérabilité face au phénomène d'élévation des océans que ce réchauffement provoque.

FIGURE 3 – Une île du Pacifique

Au cours du XX$^{\text{e}}$ siècle, la température moyenne à la surface de la Terre a augmenté. Cet échauffement a induit une dilatation des eaux océaniques.

Estimer la variation du niveau des océans qui résulte du réchauffement climatique durant le XX$^{\text{e}}$ siècle. S'agit-il d'un phénomène négligeable ?

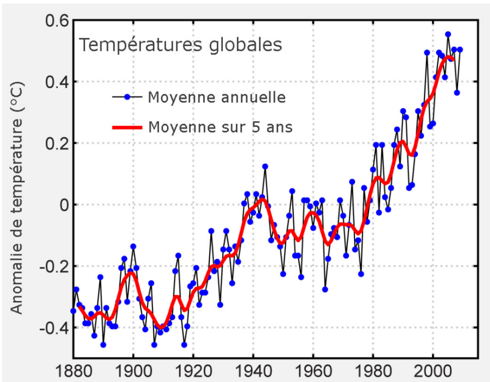


FIGURE 4 – Différence de température globale moyenne de surface par rapport à la moyenne 1961-1990, sur la période 1880-2009

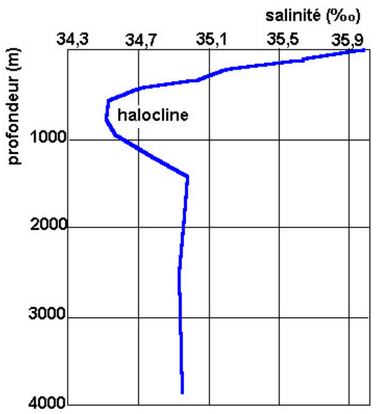


FIGURE 5 – Salénité de l'Océan Atlantique en fonction de la profondeur

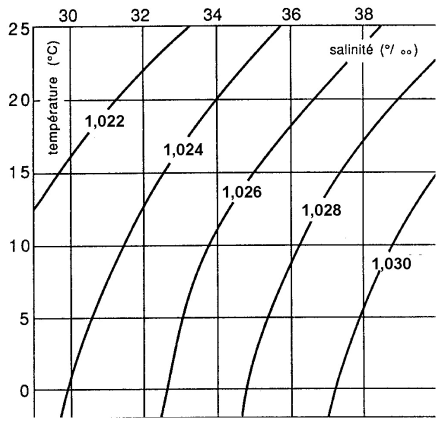


FIGURE 6 – Densité de l'eau en fonction de la salénité et de la température

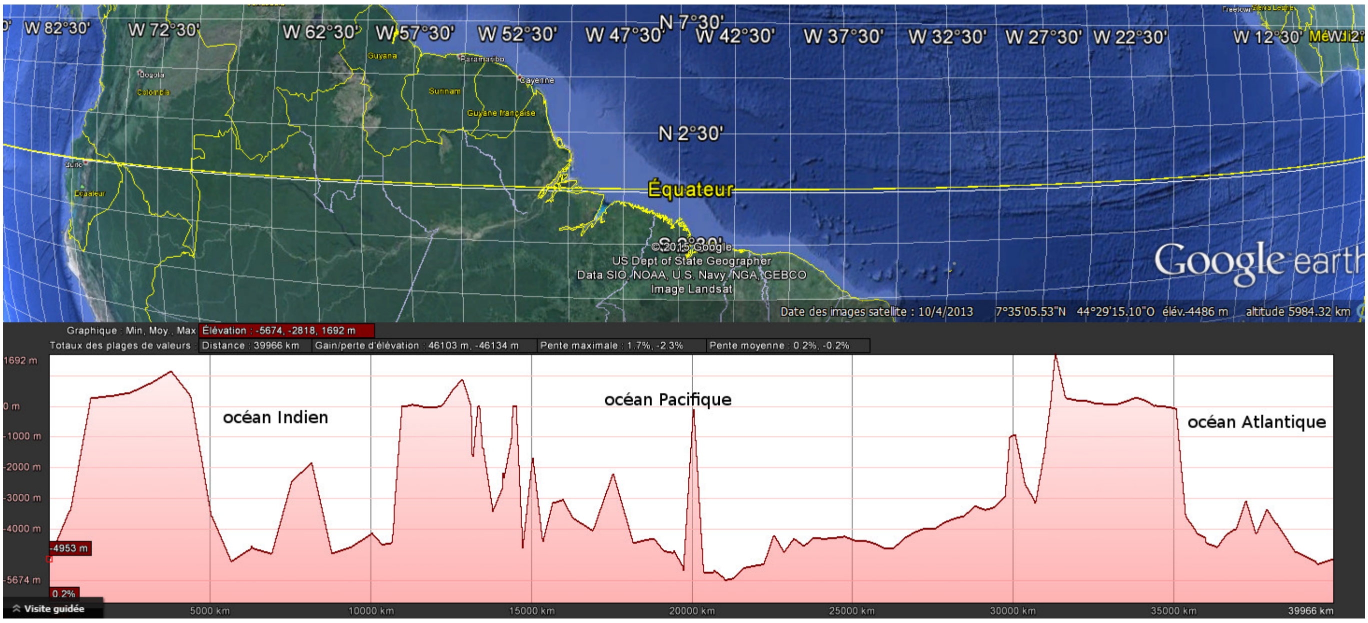


FIGURE 7 – Profil des océans au niveau de l'Équateur

Exercice 10 Entrée d'air dans une bouteille

Une bouteille, dans laquelle on a préalablement fait le vide, est fermée par un bouchon. On enlève ce bouchon et la bouteille se remplit très rapidement d'air.
Déterminer l'entropie créée lors de cette transformation.

Exercice 11 Moteur de Stirling

De l'air, assimilé à un gaz parfait de coefficient γ, effectue le cycle de Stirling ABCD, composé de 2 isothermes et de 2 isochores. On donne : $V_A = 0{,}1\,\text{L}$ et $V_D = 1\,\text{L}$, $T_A = 150\,\text{K}$ et $T_C = 320\,\text{K}$, $P_C = 1\,\text{bar}$.

1. Représenter le cycle dans le diagramme de Clapeyron.
2. Calculer P, V et T en A, B, C et D, ainsi que les différents transferts énergétiques du cycle.
3. En déduire le rendement de ce moteur.

Exercice 12 Pompe à chaleur ditherme

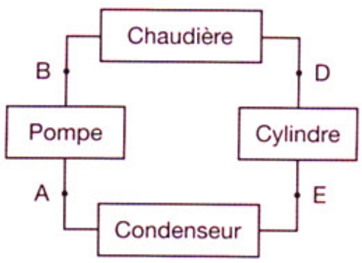
Pour maintenir la température d'un local à $291\,\text{K}$, on utilise une pompe à chaleur fonctionnant suivant un cycle de Carnot ditherme. Le fluide caloporteur est l'air de masse molaire $M = 29\,\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$, et la source froide est l'eau d'un puits à la température $276\,\text{K}$.

1. Décrire le fonctionnement de la pompe.
2. Sachant que le maintien du local à 291 K exige que l'on compense la puissance des pertes thermiques de 10,5 kW et que le rendement technique de l'installation, du fait des sources d'irréversibilité, est de $0,16$, calculer la puissance électrique nécessaire à son fonctionnement. On rappelle que le rendement est le rapport entre l'efficacité réelle et l'efficacité théorique.
3. Une pompe à chwaleur ditherme cyclique fonctionne maintenant réversiblement entre une source (l'atmosphère) à T_0 et une masse M d'eau, qui reste à volume constant, de capacité thermique massique c' et qui n'effectue que du transfert thermique, de température initiale T_i.
Le sens de la machine est tel que l'eau chauffe.
On supposera que la masse d'eau se comporte comme une pseudo-source, c'est à dire que sa température varie d'une quantité infinitésimale sur un cycle de la machine.
   (a) Calculer le travail δW fourni à la machine sur un cycle en fonction de la température T atteinte par l'eau, puis le travail W pour passer de T_i à T.
   (b) Comparer l'énergie thermique reçue par l'eau à W.

Exercice 13 — Étude entropique d'une machine thermique

1. Soit A_0 un point de la courbe d'ébullition à la température T_0. En A_0 l'entropie massique du fluide vaut s_0.
   (a) Évaluer l'entropie massique du fluide en un point A de la courbe d'ébullition à la température T_1, en supposant la capacité massique du liquide c_l constante le long de la courbe d'ébullition et en adoptant le modèle du fluide incompressible pour la phase liquide.
   (b) À partir de A_0, on effectue une vaporisation isotherme jusqu'en $M(x)$ où x est le titre massique en vapeur. On note l_0 l'enthalpie massique de vaporisation à T_0. Déterminer l'entropie massique du fluide en $M(x)$.
2. On considère le cycle de transformation réversible $DABCD$ réalisé à partir du point D sur la courbe de rosée pour une unité de masse du fluide.
   — DA : liquéfaction isotherme à la température T_1 : on parcourt la totalité du palier de liquéfaction.
   — AB : détente isentropique qui amène le fluide dans l'état B défini par T_0 et un titre x_1.
   — BC : vaporisation isotherme jusqu'à l'intersection C avec la courbe isentropique passant par D :C est l'état caractérisé par x_2.
   — CD : compression isentropique.
   (a) Représenter le cycle $DABCD$ sur le diagramme (P, V).
   (b) Calculer les valeurs des titres x_1 et x_2 en fonction de c_l, T_0, T_1 et des enthalpies massiques de vaporisation l_1 et l_0, à T_1 et T_0 respectivement.
   (c) Calculer les transferts thermiques q_0 et q_1 échangés avec le milieu extérieur par l'unité de masse du fluide au cours des évolutions isothermes BC et DA.
   (d) Calculer le travail w échangé avec le milieu extérieur par l'unité de masse du fluide au cours du cycle.
   (e) Le système précédent constitue une machine frigorifique qui consomme du travail et enlève de l'énergie thermique à une source froide à $T_0 < T_1$.
   (f) Exprimer le coefficient d'efficacité e de la machine en fonction de T_0 et T_1. AN : $T_0 = 268\,\text{K}$ et $T_1 = 288\,\text{K}$.

Exercice 14 — Fonctionnement d'une Machine à vapeur - cycle de Rankine



L'eau décrit le cycle suivant :

— AB : l'eau, liquide saturant à T_1 et P_1 est comprimée de façon isentropique dans une pompe jusqu'à la pression P_2 de la chaudière.

— BCD : l'eau passe dans la chaudière et s'y réchauffe jusqu'à T_2 (BC) puis s'y vaporise (CD) sous la pression P_2.

— DE : la vapeur saturante passe dans le cylindre à T_2, P_2 et on effectue une détente isentropique jusqu'à T_1, P_1 : on obtient un mélange liquide-vapeur de titre x en vapeur.

— EA : le piston par son retour chasse le mélange dans le condenseur où il se liquéfie totalement.

On assimile le liquide à un fluide incompressible de capacité thermique massique $c_\ell = 4{,}18\,\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ et la vapeur à un gaz parfait. On donne les caractéristiques :

— $P_1 = 0{,}20\,\text{bar}$; $T_1 = 333\,\text{K}$; $\Delta_{vap}h(T_1) = \ell_1 = 2360\,\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.
— $P_2 = 12\,\text{bar}$; $T_2 = 461\,\text{K}$; $\Delta_{vap}h(T_2) = \ell_2 = 1990\,\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.

On raisonne sur l'unité de masse du fluide.

1. Justifier que la compression isentropique AB du liquide (saturant en A) est confondue avec l'isotherme T_1.
2. Calculer le titre massique x en vapeur au point E.
3. Représenter le cycle de Rankine en diagramme (P, v).
4. Exprimer et calculer les divers transferts thermiques pour chaque étape du cycle de Rankine.
5. Définir le rendement de cette machine à vapeur. L'exprimer puis le calculer. Quelles sont les causes d'irréversibilité d'une telle machine ?

Exercice 15 Étude d'un moteur à combustion

On considère un moteur à combustion interne à allumage par bougies. On se limite à l'étude de l'un des cylindres du moteur. Le cycle thermodynamique décrit par le fluide est le cycle de Beau de Rochas. Les différentes étapes du cycle sont les suivantes :

— M → A : admission du mélange gazeux air - essence à la pression constante p_0.
En A, il y a fermeture de la soupape d'admission et le volume V est alors égal à V_{max}.
— A → B : compression, supposée isentropique, du mélange.
Dans l'état B, le volume est égal à V_{min}.
— B → C : échauffement isochore du gaz. C → D : détente isentropique du gaz.
Dans l'état D, le volume est V_{max}.
— D → A : refroidissement isochore du gaz.
— A → M : refoulement des gaz vers l'extérieur, à la pression p_0.
On convient de nommer "taux de compression", le rapport $\tau = \dfrac{V_{\text{max}}}{V_{\text{min}}}$.

Le système envisagé est le gaz qui décrit le cycle ABCD. La quantité de gaz n (en mol) considérée est celle qui a été admise dans l'état A.
Le transfert thermique de l'étape B → C est dû à la combustion "interne" du mélange gazeux admis.
Les réactifs et les produits de la réaction de combustion sont gazeux.
Dans une approche simplifiée, on admettra que la quantité de gaz n'est pas modifiée par la combustion interne.
Le gaz est assimilé à un gaz parfait, pour lequel les capacités thermiques molaires $C_{P,m}$ et $C_{V,m}$ sont constantes.

Soit Q_1 le transfert thermique (ou chaleur échangée) mis en jeu dans l'étape B → C.

1. Exprimer Q_1 en fonction de n, $C_{V,m}$, T_B et T_C. Préciser le signe de cette grandeur. Dans quel sens s'effectue le transfert thermique ?

Soit, de la même manière, Q_2, le transfert thermique mis en jeu dans l'étape D → A.

2. Exprimer Q_2 en fonction de n, $C_{V,m}$, T_A et T_D.

On note W le travail total échangé au cours du cycle ABCD.

3. Exprimer W en fonction de Q_l et Q_2.
4. Définir le rendement thermodynamique η du moteur.
5. Exprimer η en fonction de Q_l et Q_2.
6. Exprimer η en fonction de T_A, T_B, T_C et T_D, puis en fonction de τ et γ.
7. Calculer η pour les valeurs suivantes : $\tau = 10$ et $\gamma = 1,33$.

On envisage maintenant un moteur dont la cylindrée est égale à 2,0 L : on raisonnera sur un seul cylindre, possédant la cylindrée C_y du moteur définie selon : $C_y = V_{\text{max}} - V_{\text{min}}$. Le taux de compression τ est égal à 10. Le mélange air -essence est admis à une température $T_A = 320\,\text{K}$ et sous la pression $p_A = 100\,\text{kPa}$. La valeur de γ est égale à 1,33. Le mélange gazeux admis contient 1,0 mol de carburant pour 60 mol de mélange.
On prendra $R = 8{,}314\,\text{JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$

8. Calculer les valeurs de V_{max} et V_{min}.
9. Calculer la quantité de gaz n_0 (en mol) de carburant consommé par cycle.
10. En admettant que le pouvoir calorifique du carburant utilisé est égal à 4200 kJ/mol, calculer les valeurs de la température et de la pression dans l'état C du cycle.

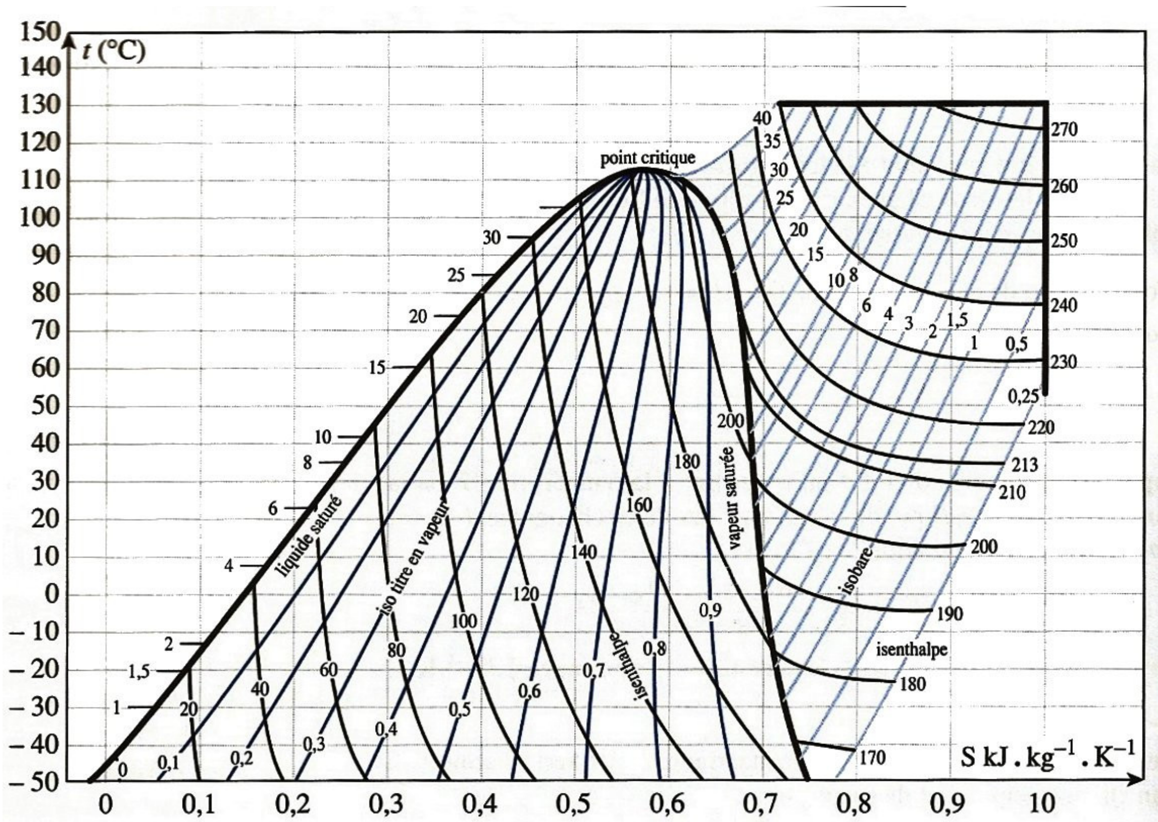
11. Calculer la valeur du transfert thermique vers l'extérieur au cours d'un cycle du moteur.
12. Calculer la valeur de la puissance du moteur lorsque la vitesse de rotation du vilebrequin est égale à 4000 tours/minute.

Dans la pratique, le rendement est beaucoup plus faible.

13. Donner au moins deux raisons rendant compte de cette différence.
14. Pourrait-on envisager un moteur ditherme transformant l'intégralité de la chaleur qu'il reçoit de la part de la source chaude, en travail mécanique ? Justifier succinctement la réponse.

Exercice 16 Lecture d'un diagramme (T,s).

Le fréon est un fluide frigorigène employé dans les machines frigorifiques. On donne ci-dessus le diagramme (T,s) du fréon pour la transition de phase liquide-vapeur.



1. Identifier les différentes grandeurs dont la lecture est possible grâce à ce diagramme.
2. Compléter alors le tableau suivant.

$t(°C)$	p_s (bar)	h_l (kJ.kg^{-1})	h_v (kJ.kg^{-1})	$\Delta_{vap}h$ (kJ.kg^{-1})	s_l (kJ.kg^{-1}.K^{-1})	s_v (kJ.kg^{-1}.K^{-1})	$\Delta_{vap}s$ (kJ.kg^{-1}.K^{-1})
-30							
-20							
60							
85							
95							

Exercice 17 Vaporisation dans une enceinte

On place une ampoule contenant $m = 0{,}01\,\mathrm{kg}$ d'eau liquide dans une enceinte indéformable de volume V maintenue au contact d'un thermostat à la température $T_0 = 373\,\mathrm{K}$. Initialement, l'enceinte est vide et l'eau dans l'ampoule est à la température T_0 sous la pression de vapeur saturante $P(T_0) = 1{,}0\,\mathrm{bar}$. On assimile la vapeur d'eau à un gaz parfait de masse molaire $M = 18\,\mathrm{g \cdot mol^{-1}}$ et on néglige le volume massique de l'eau liquide devant celui de la vapeur d'eau.

1. Calculer la valeur particulière V_C de V pour que dans l'état d'équilibre final, l'eau soit à T_0 et $p(T_0)$ avec un titre en vapeur $x_V = 1$.
2. On suppose que le volume V est inférieur à V_C. Déterminer l'état d'équilibre final.
3. On suppose que le volume V est supérieur à V_C. Déterminer l'état d'équilibre final.
4. Placer ces trois états sur un diagramme de Clapeyron (P, V).

Exercice 18 Formation de glace dans une enceinte

Un cylindre aux parois diathermanes enferme une mole d'air considéré comme un gaz parfait diatomique à la température $T_0 = 273\,\mathrm{K}$ que l'on détend de manière isotherme et réversible de la pression $p_1 = 7\,\mathrm{bar}$ à la pression $p_2 = 3\,\mathrm{bar}$ en soulevant un piston. Le corps du cylindre est en contact thermique avec 1 L d'eau liquide également à la température initiale de 273 K et sous la pression atmosphérique normale.

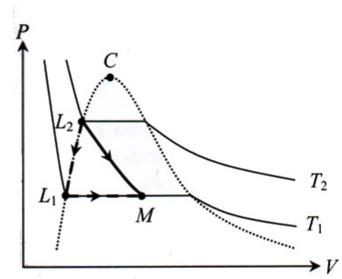
1. Décrire les transferts thermiques et leurs conséquences.
2. Quelle est la masse de glace obtenue lors de cette opération ?
3. Calculer la variation d'entropie du système {gaz+eau} sachant que ce système thermiquement isolé
4. On recomprime l'air dans les mêmes conditions jusqu'à la pression finale $p_3 = 10\,\mathrm{bar}$. En déduire la température finale de l'eau et de l'air.

Données :

— *Chaleur latente de fusion de la glace à* $247\,\mathrm{K}$ *:* $L_f = 334\,\mathrm{kJ \cdot kg^{-1}}$

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

Exercice 19 Détente de Joule-Kelvin

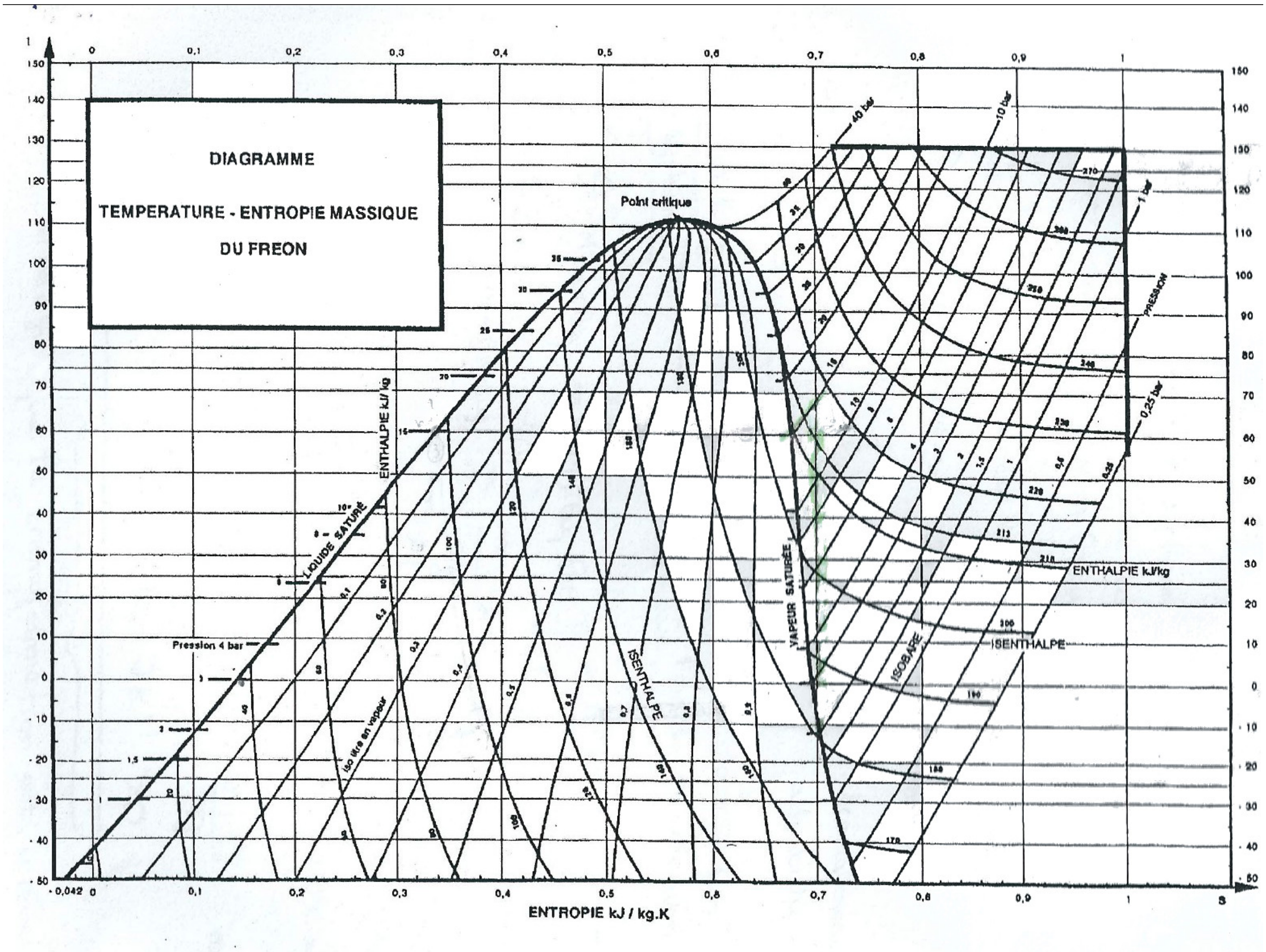


On fait subir une détente de Joule-Kelvin à de l'ammoniac, de l'état liquide L_2 ($P_2 = 6{,}2\,\mathrm{bar}$, $T_2 = 283\,\mathrm{K}$) à l'état diphasé M ($P_l = 1{,}9\,\mathrm{bar}$, $T_1 = 253\,\mathrm{K}$). On donne $\Delta_{vap}h(T_1) = 1{,}3 \times 10^3\,\mathrm{kJ \cdot kg^{-1}}$ et $c = 4{,}6\,\mathrm{kJ \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}}$ (capacité thermique de l'ammoniac liquide).

Exprimer la variation d'enthalpie $\Delta h = h_M - h_{L_2}$, puis à en déduire la titre massique en vapeur final x_M.

Exercice 20 Étude graphique du cycle thermodynamique d'un local réfrigéré

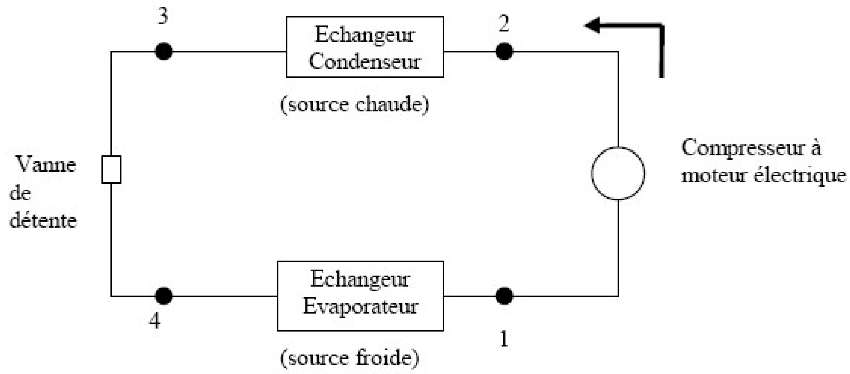
Une machine frigorifique est utilisée afin de maintenir un local contenant des denrées périssables à 0 °C. Cette machine contient un fluide frigorigène de type Fréon dont le diagramme Température-Entropie massique (T, s) est donné ci-dessous.



Le mélange liquide-vapeur est situé dans la zone centrale sous la courbe de saturation.

Sur ce diagramme apparaissent les isobares et les isenthalpes.

Cette machine ditherme qui fonctionne en régime permanent échange de la chaleur avec une source chaude à 40 °C (atmosphère extérieure) et une source froide à 0 °C (local réfrigéré).
Compte-tenu du faible débit du Fréon circulant dans les tuyauteries de la machine, les variations d'énergie cinétique seront négligées dans tout le problème.
Le schéma général de fonctionnement avec le sens de circulation du fluide est ci-dessous.



Le cycle décrit par le fréon présente les caractéristiques suivantes :

— la compression de 1 à 2 est adiabatique réversible,

— le passage dans les deux échangeurs (condenseur et évaporateur) est isobare (de 2 à 3 et de 4 à 1),

— la vanne est considérée comme un tuyau indéformable et ne permettant pas les échanges de chaleur. La détente y est isenthalpique,

— la température du Fréon lors de l'évaporation dans l'évaporateur est de $-10\,°\mathrm{C}$,

— la pression de fin de compression en 2 est 15 bars,

— le point 3 est du liquide saturé,

— La quantité de chaleur échangée dans l'évaporateur avec le local permet une évaporation complète du Fréon venant de 4 et conduit la vapeur de façon isobare jusqu'à la température de $-10\,°\mathrm{C}$ (point 1, point saturé)

1. Placer les 4 points du cycle 1, 2, 3, 4 sur le diagramme, représenter le cycle et déterminer par lecture graphique les valeurs de P, T, h et s en ces différents points. Regrouper les résultats dans un tableau.
2. Comment peut-on trouver, de deux façons différentes, sur le diagramme la valeur de la chaleur latente massique l_v de vaporisation du Fréon à une température T_0 donnée ?
   Application numérique : Si $P_0 = 3\,\mathrm{bar}$, quelles sont les valeurs de l_v et de T_0 ?
3. Calculer le titre en vapeur x_4 du point 4 de la machine frigorifique. En déduire le titre en liquide y_4 au point 4. Quelle est la valeur du titre en liquide au point 3 ?
4. Calculer les quantités de chaleur massique q_c et q_f échangées par le fréon avec l'extérieur ainsi que le travail massique reçu par le fréon au cours du cycle.
5. En déduire l'efficacité de la machine frigorifique