Exercices
THERMODYNAMIQUE

Exercice THERMO 1 – 1
Reprendre le calcul de la pression dans un gaz parfait monoatomique en adoptant le modèle suivant :

1. la norme $\|\vec{v}\|$ de toutes les molécules est identique, égale à la vitesse quadratique moyenne $v^\star$;
2. $(\overrightarrow{u_x}, \overrightarrow{u_y}, \overrightarrow{u_z})$ désignant un trièdre cartésien, dans tout élément de volume $d\tau$, un sixième des molécules ont un vecteur-vitesse parallèle à chacun des six vecteurs directeurs $\overrightarrow{u_x}, \overrightarrow{u_y}, \overrightarrow{u_z}, -\overrightarrow{u_x}, -\overrightarrow{u_y}, -\overrightarrow{u_z}$.

Exercice THERMO 1 – 2
1. Calculer numériquement à la surface de la Terre et de la Lune, pour une température $T = 300$ K, la vitesse de libération v_ℓ et la vitesse quadratique moyenne pour du dihydrogène et du diazote. Commenter. Données : constante de dravitation $G = 6{,}67.10^{-11}$ SI ; rayon de la Terre $R_T = 6{,}4.10^6$ m ;rayon de la Lune $R_L = 1{,}8.10^6$ m ; masse de la Terre $M_T = 6.10^{24}$ kg ; masse de la Lune $M_L = 7{,}4.10^{22}$ kg ; masse molaires $M_H = 2$ g.mol^{-1} et $M_N = 28$ g.mol^{-1} ; constante des gaz parfaits $R = 8{,}314$ J.K^{-1}.mol^{-1}.
2. Quel devrait être l'ordre de grandeur de la température T pour que le diazote, constituant majoritaire de l'atmosphère terrestre, échappe quantitativement à l'attraction terrestre ?[1]

Exercice THERMO 1 – 3
1. Une mole de gaz de Van der Waals a pour équation d'état $\left(p + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT$. Exprimer p en fonction de V et T et calculer les dérivées partielles $\left(\frac{\partial p}{\partial V}\right)_T$ et $\left(\frac{\partial^2 p}{\partial V^2}\right)_T$.
2. Montrer qu'il existe un unique état C tel que $\left(\frac{\partial p}{\partial V}\right)_T = 0$ et $\left(\frac{\partial^2 p}{\partial V^2}\right)_T = 0$. Déterminer son volume molaire V_C, sa température T_C et sa pression p_C.
3. On pose $\theta = \frac{T}{T_C}$, $\nu = \frac{V}{V_C}$, $\varpi = \frac{p}{p_C}$. Montrer que l'équation d'état reliant θ, ν et ϖ est universelle, c'est à dire ne fait plus intervenir aucune constante dépendant du gaz.[2].

Exercice THERMO 1 – 4
Le tableau ci-dessous donne avec trois chiffres significatifs exacts le volume molaire V (en m^3.mol^{-1}) et l'énergie interne molaire U (en kJ.mol^{-1}) de la vapeur d'eau à la température $t = 500$°C pour différentes valeurs de la pression p en bars. On donne $R = 8{,}314$ J.K^{-1}.mol^{-1}.

p	1	10	20	40	70	100
V	$6{,}43.10^{-2}$	$6{,}37.10^{-3}$	$3{,}17.10^{-3}$	$1{,}56.10^{-3}$	$8{,}68.10^{-4}$	$5{,}90.10^{-4}$
U	56,33	56,23	56,08	55,77	55,47	54,78

1 – Justifier sans calcul que la vapeur d'eau ne se comporte pas comme un gaz parfait. On se propose d'adopter le modèle de Van der Waals pour lequel on a : $\left(p + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT$ et $U = U_{GP}(T) - \frac{a}{V}$. Calculer le coefficient a en utilisant les énergies internes des états à $p = 1$ bar et à $p = 100$ bars. Quelles valeurs obtient-on alors pour U à $p = 40$ bars ? Quelle température obtient-on alors en utilisant l'équation d'état avec $p = 40$ bars et $V = 1{,}56.10^{-3}$ m^3.mol^{-1}. Conclure sur la validité du modèle.

[1] Exercice THERMO 1 – 2 : **1.** $v_{\ell_T} = 1{,}1.10^4$ m.s^{-1} ; $v_{\ell_L} = 1{,}9.10^3$ m.s^{-1} **2.** $T \approx 10^5$ K

[2] Exercice THERMO 1 – 3 : **2.** $V_C = 3b$, $T_C = \frac{8a}{27bR}$, $p_C = \frac{a}{27b^2}$ **3.** $\left(\varpi + \frac{3}{\nu^2}\right)(3\nu - 1) = 8\theta$

2 – On réalise une détente **isochore** c'est à dire à volume constant d'une mole de vapeur d'eau de l'état initial I ($T_I = 500$°C, $p_I = 100$ bars) jusqu'à l'état final F ($T_F = ?, p_F = 70$ bars). Le tableau ci-dessous donne le volume molaire (en m^3.mol^{-1}) et l'énergie interne molaire U (en kJ.mol^{-1}) de la vapeur d'eau à la température sous $p = 70$ bars pour différentes valeurs de la température en °C. Déterminer la température finale T_F et la variation d'énergie interne $U_F - U_I$.[3]

t	300	320	340	360	380	400
V	$5,31.10^{-4}$	$5,77.10^{-4}$	$6,18.10^{-4}$	$6,54.10^{-4}$	$6,87.10^{-4}$	$7,20.10^{-4}$
U	47,30	48,38	49,32	50,17	50,96	51,73

Exercice THERMO 1 – 5

Un kilogramme d'eau liquide est caractérisée dans un certain domaine de températures et de pressions autour de l'état 0 où $p_0 = 1$ bar,$T_0 = 293$ K et $V_0 = 10^{-3}$ m^3, par un coefficient de dilatation isobare $\alpha = 3.10^{-4}$ K^{-1} et par un coefficient de compressibilité isotherme $\chi_T = 5.10^-10$ Pa^{-1} constants.

1. Établir l'équation d'état $V = f(p,T)$ de ce liquide.
2. Calculer son volume molaire sous $p = 1000$ bars à $T = 293$ K et commenter.
3. Un kilogramme d'eau liquide est enfermée dans une bouteille de volume V_O constant. Par suite d'un incendie, la température passe de $T_0 = 293$ K à $T = 586$ K. Calculer la pression p dans le récipient et commenter. Reprendre le calcul pour un gaz parfait et commenter.[4]

Exercice THERMO 1 – 6

L'équation d'état d'une mole d'un gaz réel peut se mettre sous la forme d'un développement en puissance de $\frac{1}{V}$ de la forme :

$$pV = RT\left[1 + \frac{B_1(T)}{V} + \frac{B(T)}{V^2} + \frac{B_3(T)}{V^3} + \cdots\right]$$

Etablir l'expression des coefficients $B_1(T)$ et $B_2(T)$ pour un gaz de Van der Waals en fonction de a, b et T.[5]

Exercice THERMO 2 – 1

Un récipient cylindrique de rayon R est rempli d'eau sur une hauteur h et plongé dans une atmosphère où la pression p_0 est uniforme. Il est mis en rotation à la vitesse angulaire constante ω autour de son axe (Oz) vertical, et au bout d'un certain temps, on atteint un état d'équilibre dans le référentiel tournant. Déterminer dans cet état l'équation de la surface libre de l'eau.[6]

Exercice THERMO 2 – 2

1. Un barrage parallélipédique de largeur L et d'épaisseur e est rempli d'eau sur une hauteur h. Déterminer la résultante des forces exercées par l'air et l'eau.
2. Même question pour un barrage hémi-cylindrique de rayon R.[7]

---

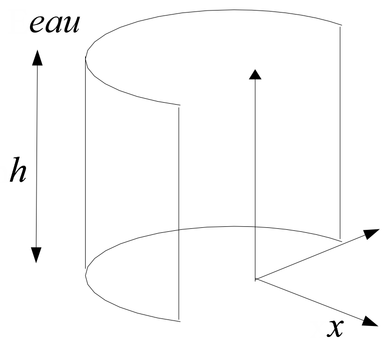
[3] Exercice THERMO 1 – 4 : **2.** $T_F = 599$ K ; $U_F - U_I = -6,12$ kJ.mol^{-1}

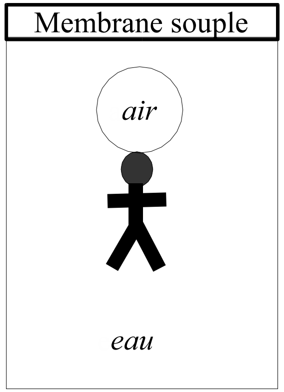
[4] Exercice THERMO 1 – 5 : **1.** $\ln\left(\frac{V}{V_0}\right) = \alpha(T - T_0) - \chi_T(p - p_0)$; **2.** $V = 0,95.10^{-3}$ m^{-3} ; **3.**$p = 1,8.10^3$ bars ; $p_{GP} = 2$ bars

[5] Exercice THERMO 1 – 6 : $B_1(T) = b - \frac{a}{RT}$; $B_2(T) = b^2$

[6] Exercice THERMO 2 – 1 : $z = \frac{\omega^2 r^2}{2g}$+ const avec r distance à l'axe

[7] Exercice THERMO 2 – 2 : **2.** $\vec{F} = \rho g R h^2 \vec{e_x}$





Exercice THERMO 2 – 3

Un ludion est un personnage solidaire d'une petite sphère souple renfermant de l'air. Il est placé dans une éprouvette pratiquement pleine d'eau et fermée par une membrane souple. Lorsqu'on appuye sur la membrane, le ludion auparavant à l'équilibre tombe au fond de l'éprouvette. Pourquoi ?

Exercice THERMO 2 – 4

L'enveloppe d'un aérostat a un volume constant V. Elle est remplie d'hydrogène de masse molaire M_1. Une valve y maintient une pression toujours égale à la pression extérieure. La nacelle, l'enveloppe et les deux passagers ont une masse m_1. La pression au sol est p_0, la température T_0. Dans ces conditions la masse volumique de l'air de masse molaire M_2 est ρ_0.

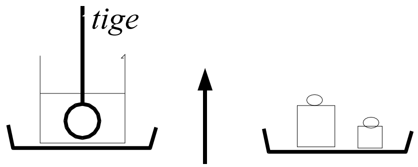
1. Quelle masse m_2 de lest faut-il emporter pour que le ballon reste au sol ?
2. On suppose l'atmosphère isotherme. Quelle relation y a t-il entre la masse volumique de l'air ρ à l'altitude h et h ?
3. Quelle est l'altitude maximale atteint par le ballon en délestant au maximum ? Faire l'application numérique[8] pour $V = 700$ m^3 ; $M_1 = 2$; $m_1 = 447$ kg ; $p_0 = 1$ bar ; $T_0 = 300$ K ; $M_2 = 29$; $\rho_0 = 1,18$ kg.m^{-3} ; $g = 9,81$ m.s^{-2}.

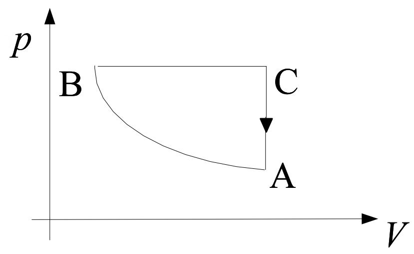
Exercice THERMO 2 – 5

On assimile le Soleil à un astre sphérique de centre O et de rayon $R = 7.10^8$ m, incompressible et homogène de masse $M_S = 2.10^{30}$ kg. En M à l'intérieur du Soleil, le champ gravitationnel est $\vec{G}(M) = -\frac{GM_S}{R^3}\overrightarrow{OM}$ avec $G = 6,67.10^{-11}$ SI. Calculer la pression au centre du Soleil en négligeant la pression à la surface.[9]

Exercice THERMO 2 – 6

Sur les plateaux d'une balance sont posés d'un coté un bécher rempli d'eau de masse volumique ρ et de l'autre des masses marquées m assurant l'équilibre. On plonge dans l'eau du bécher, un flotteur homogène de volume V et de masse volumique ρ', que l'on maintient fixe en exerçant une force F sur une tige solidaire du flotteur. Comment réagit la balance (pas de calcul) ? Quelle masse faut-il ajouter ou retrancher pour retrouver l'équilibre ?





Exercice THERMO 3 – 1

Une mole de gaz parfait monoatomique contenu dans un cylindre décrit de manière quasi-statique et mécaniquement réversible le cycle $ABCA$: l'évolution AB est isotherme à la température $T_A = 301$ K. En A, $P_A = 1,0$ bar. L'évolution BC est isobare à la pression $P_B = 5,0$ bar. L'évolution CA est isochore.

1. Calculer les volumes V_A, V_B et V_C et la température T_C.

[8] Exercice THERMO 2 – 4 : **1.** $m_2 = 322$ kg ; **3.** $h_{max} = 5080$ m

[9] Exercice THERMO 2 – 5 : $p_{centre} = 1,3.10^{14}$ Pa

2. Calculer le travail et le transfert thermique reçus par le gaz aucours de chacune des évolutions AB, BC et CA. Calculer leur somme et commenter.[10]

Exercice THERMO 3 – 2
Une mole d'un gaz réel monoatomique d'équation d'état $\left(p + \frac{a}{V^2}\right)V = RT$ et d'énergie interne $U = \frac{3RT}{2} - \frac{a}{V}$ décrit le même cycle qu'à l'exercice THERMO 3 – 1. On donne $T_A = 301$ K ; $V_A = 5,0$ L ; $V_B = 0,5$ L et $a = 0,135$ SI.

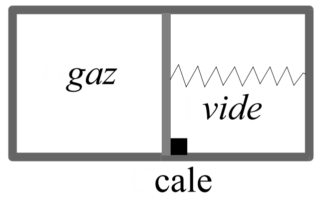
1. Calculer les pressions p_A, p_B et p_C et la température T_C.
2. Calculer le travail et le transfert thermique reçus par le gaz aucours de chacune des évolutions AB, BC et CA.[11]

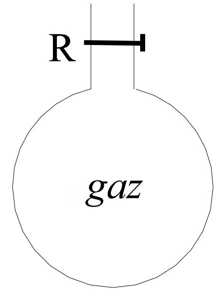
Exercice THERMO 3 – 3
Une mole de gaz parfait de capacité thermique à volume constant $C_{Vm} = \frac{5R}{2}$ est enfermé dans un cylindre vertical calorifugé fermé par un piston mobile calorifugé de section $S = 0,01$ m^2 en contact avec une atmosphère extérieure à la pression constante p_0. Initialement, le gaz est en équilibre à la température $T_0 = 300$ K. On donne $g = 9,81$ m.s^{-2} et $p_0 = 1$ bar.

1. On pose sur le piston une masse $M = 102$ kg et on laisse le système évoluer. Déterminer la pression p_1 et la température T_1 lorsqu'on atteint le nouvel équilibre (état 1).
2. À partir de l'état 1, on enlève la masse M et on laisse le système évoluer. Déterminer la pression p_2 et la température T_2 lorsqu'on atteint le nouvel équilibre (état 2).[12]

Exercice THERMO 3 – 4
On considère un piston calorifugé mobile dans un cylindre calorifugé horizontal de section constante $S = 500$ cm^2. Le compartiment de gauche contient $n = 0,01$ mol d'un gaz parfait de coefficient $\gamma = 1,40$ et le compartiment de droite est soumis à un vide poussé ; le piston est relié à un ressort de raideur $k = 10^4$ N.m^{-1}

1. Initialement le piston est coincé par une cale, le ressort n'est pas tendu, la pression du gaz vaut $p_0 = 0,241$ bar, sa température $T_0 = 290$ K. Calculer le volume V_0 occupé initialement par le gaz.
2. On supprime la cale. Le système évolue vers un nouvel état d'équilibre. Déterminer l'allongement du ressort x_F, le volume final du gaz V_F, sa pression finale p_F, sa température finale T_F et le travail qu'il a reçu.[13]



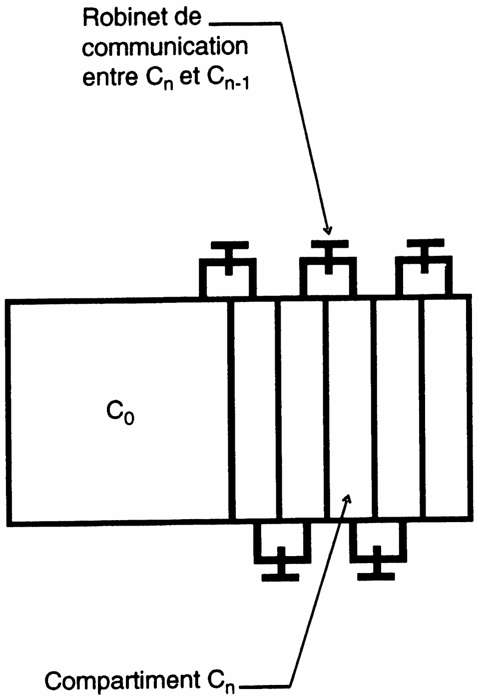


Exercice THERMO 3 – 5
Un ballon de volume $V_0 = 10$ L contient un gaz que l'on supposera parfait, à la température ambiante $T_0 = 295$ K et sous une pression p_1 supérieure à la pression atmosphérique p_0. On ouvre et on referme rapidement le robinet (R), ce qui provoque une détente adiabatique du gaz. La pression du gaz contenu dans le ballon passe alors de p_1 à p_0. Du fait de la détente la température du gaz a baissé, et lorsque sa température est à nouveau à T_0, sa pression est p_2. Les pressions peuvent par exemple être mesurées avec un manomètre assez sensible (ou au moyen d'un tube en U rempli d'un liquide de masse volumique connue).

1. Quel système choisir ?

[10] Exercice THERMO 3 – 1 : **1.** $V_A = 25,0$ L ; $V_B = 5,0$ L ; $V_C = 25,0$ L ; $T_C = 1505$ K
[11] Exercice THERMO 3 – 2 : **1.** $p_A = 4,95$ bars ; $p_B = p_C = 44,65$ bars ; $T_C = 2688$ K
[12] Exercice THERMO 3 – 3 : **1.** $P_1 = 2,0$ bars, $T_1 = 386$ K ; **2.** $P_2 = 1,0$ bars, $T_2 = 331$ K
[13] Exercice THERMO 3 – 4 : **1.** $V_0 = 1,00$ L ; **2.** $V_F = 2,86$ L ; $x_F = -3,72$ cm ; $p_F = 7,44.10^3$ Pa ; $T_F = 256$ K ; $W = -7$ J

2. Représenter en coordonnées de Clapeyron la transformation subie par le système.
3. On suppose la transformation d'amplitude infnitésimale (p_1 était peu différente de p_0) : on la supposera donc réversible. En déduire γ en fonction de p_1, p_0 et p_2. AN pour $p_1 - p_0 = 1,4.10^3$ Pa et $p_2 - p_0 = 400$ Pa.
4. On reprend la même expérience, mais on ouvre le robinet (R) en grand. De ce fait la transformation n'est plus réversible, par contre on pourra la supposer monobare. Reprendre la question précédente dans ces conditions (on supposera toujours la détente adiabatique). Commentaires.



Exercice THERMO 4 – 1

On considère le dispositif représenté sur la figure ci-dessus : un récipient calorifugé est partagé en $N+1$ compartiments calorifugés et communiquant par des petits robinets (R_n) ; le volume de (C_0) est V_0 , et le volume des autres compartiments est $\frac{V_0}{N}$ Initialement le compartiment (C_0) contient une mole de gaz parfait en équilibre dans l'état E_0 à la température T_0 et la pression p_0 , et les autres compartiments sont vides. On ouvre successivement les robinets (R_n) en attendant pour ouvrir (R_{n+1}) que le gaz atteigne un état d'équilibre E_n à la température T_n et la pression p_n.

1. Déterminer les températures T_n , les pressions p_n et les volumes V_n occupés par le gaz dans les états E_n successifs, pour $N \to +\infty$. Placer les points représentatifs des états successifs E_n dans le diagramme de Clapeyron du gaz.
2. Calculer la variation d'entropie $S_{n+1} - S_n$ entre deux états E_n successifs et en déduire la variation d'entropie totale entre l'état E_0 et l'état E_N
3. L'évolution $E_0 \to E_N$ est-elle réversible dans la limite où N tend vers l'infini ? Est-elle quasi-statique ? [14]

Exercice THERMO 4 – 2

Lors de la liquéfaction de l'air, on réalise une compression isotherme et réversible de $m = 1$ kg d'air de l'état E_1 ($p_1 = 1,0$ bar ; $T_1 = 290$ K ; $u_1 = 368$ kJ.kg^{-1}, $s_1 = 4,40$ kJ.K^{-1}.kg^{-1}) jusqu'à l'état E_2 ($p_2 = 200$ bar ; $T_1 = 290$ K ; $u_2 = 338$ kJ.kg^{-1}, $s_1 = 2,68$ kJ.K^{-1}.kg^{-1}) dans un compresseur fermé.

1. En utilisant les deux principes, calculer la chaleur Q et le travail W reçus par l'air dans le compresseur.
2. Comparer Q et W avec les valeurs Q' et W' qu'on aurait obtenu en adoptant pour l'air le modèle de gaz parfait de masse molaire $M = 29$ g.mol^{-1}.[15]

Exercice THERMO 4 – 3

Dans une machine à vapeur, au cours de sa phase motrice, une mole de vapeur d'eau se détend dans un cylindre calorifugé et fermé de l'état A ($P_A = 40$ bars, $T_A = 773$ K) jusqu'à l'état B ($P_B = 1$ bars, $T_B = 373$ K). On donne les valeurs suivantes pour une mole d'eau :

[14] Exercice THERMO 4 – 1 : **2.** $S_N - S_0 = R \ln 2$

[15] Exercice THERMO 4 – 2 : **1.** $Q = -449$ kJ.kg^{-1} ; $W = 469$ kJ.kg^{-1}

	Volume $m^3.mol^{-1}$	Énergie interne $kJ.mol^{-1}$	Entropie $kJ.K^{-1}.mol^{-1}$
état A	$1{,}556.10^{-3}$	55,77	0,1275
état B	$3{,}060.10^{-2}$	45,08	0,1325

1. Calculer le travail reçu W par la vapeur d'eau pour l'évolution AB. Est-ce réversible ?
2. On modélise l'évolution AB par une évolution polytropique d'indice k (pV^k = const). Déterminer k et une estimation W' de W dans le cadre de ce modèle. Commentaires.
3. On réalise une détente réversible entre A et B représentée par une évolution rectiligne dans diagramme (T,S). Déterminer la chaleur $Q^\star$ et le travail $W^\star$ pour cette détente. Commentaires.[16]

Exercice THERMO 4 – 4

Dans le domaine de température et de pression considéré une mole d'un gaz monoatomique est décrit par l'entropie : $S(U,V) = S_0 + \frac{3R}{2}\ln\left(\frac{U}{U_0}\right) + R\ln\left(\frac{V-b}{V_0-b}\right)$ où S_0, U_0 et V_0 correspondent à un état de référence, $b = 2.10^{-5}$ m^3 et $R = 8{,}314$ J.K^{-1}.mol^{-1}.

1. Une mole de ce gaz est, à $t = 0$, en équilibre dans un cylindre calorifugé de volume $V_I = 10b$ à la température $T_I = 300$ K. On réalise une détente réversible faisant passer le volume de V_I à $V_F = 2V_I$. Déterminer les pressions initiale et finale, la température finale et le travail W reçu par le gaz.
2. On réalise une détente de Joule Gay–Lussac d'une mole de ce gaz avec $V_I = 10b$ et $T_I = 300$ K. A l'équilibre $V_F = 2V_I$. Calculer la température finale, la pression finale et l'entropie créée.[17]

Exercice THERMO 5 – 1

Des glaçons flottent à la surface de l'eau dans un verre. Que peut-on en conclure qu'en à la masse volumique de la glace et de l'eau liquide ? Lorsque les glaçons ont fondu, le niveau de l'eau dans le verre est-il monté ? descendu ? resté inchangé ?

Exercice THERMO 5 – 2

Dans un cycle de machine à vapeur, la phase motrice est une détente dela vapeur d'eau dans un cylindre fermé par un piston mobile. On supposera que cette détente est adiabatique et réversible. 'état initial I correspond à une vapeur saturante sèche ($x_V(I) = 1$) à la température $T_1 = 485$ K et à la pression $p_1 = \Pi(T_1) = 20$ bars. L'état final F correspond à une vapeur saturante à la température $T_2 = 375$ K et à la pression $p_2 = \Pi(T_2) = 1$ bar. On cherche à déterminer le titre en vapeur $x_V(F)$ dans l'état final.

		$x_V = 0$			$x_V = 1$		
T K	p bars	v_L $m^3.kg^{-1}$	h_L $kJ.kg^{-1}$	s_L $kJ.K^{-1}.kg^{-1}$	v_V mêmes unités	h_V	s_V
485	20	$1{,}18.10^{-3}$	909	2,45	0,0998	2801	6,35
373	1	$1{,}04.10^{-3}$	418	1,30	1,70	2676	7,36

1. en utilisant les données du tableau :
2. sans le tableau mais en utilisant l'enthalpie de vaporisation $\ell_1 = 1892$ kJ.kg^{-1} à $T_1 = 485$ K, $\ell_2 = 2258$ kJ.kg^{-1} à $T_2 = 373$ K et la capacité thermique massique de l'eau $c = 4{,}18$ kJ.K^{-1}.kg^{-1}.[18]

Exercice THERMO 5 – 3

Dans une machine frigorifique, un fréon subit une détente de Joule-Kelvin de l'état (A) à l'état (B) ; x désignant le titre en vapeur, on donne : $T_A = 303$ K, $p_A = \Pi(T_A) = 7{,}5$ bars , $x_A = 0$ et $T_B = 263$ K, $p_B = \Pi(T_B) = 2{,}2$ bars, l'enthalpie de vaporisation à $T = 263$ K notée $\ell_{263} = 159$ kJ.K^{-1}.kg^{-1} et la capacité thermique massique du fréon liquide $c = 0{,}96$ kJ.K^{-1}.kg^{-1} supposée indépendante de la température.

1. Représenter la situation sur un diagramme pV.
2. En calculant la variation d'enthalpie $h_B - h_A$, calculer le titre massique en vapeur x_B dans l'état final

[16] Exercice THERMO 4 – 3 : **2.** $W' = -13{,}3$ kJ ; **3.** $Q^\star = 2{,}87$ kJ , $W^\star = -13{,}6$ kJ

[17] Exercice THERMO 4 – 4 : **1.** $P_I = 139$ bars ; $p_F = 40$ bars ; $T_F = 182$ K ; $W = -1{,}47$ kJ **2.** $T_F = 300$ K ; $p_F = 66$ bars ; $S_C = 6{,}21$ J.K^{-1}

[18] Exercice THERMO 5 – 2 : **1.** $x_V(F) = 0{,}833$; **2.** $x_V(F) = 0{,}826$

3. Déterminer la variation d'entropie massique du fluide $s_B - s_A$.[19]

Exercice THERMO 5 – 4

Un récipient fermé et indéformable, de volume $V = 1,00$ L, contient de la vapeur d'eau saturante dans l'état initial I ($T_I = 485$ K, $p_I = \Pi(T_I) = 20$ bars, $x_V(I) = 1$). On le met en contact avec un thermostat à température $T_0 = 373$ K. Déterminer :

1. l'état d'équilibre final F,
2. le transfert thermique Q algébriquement reçu par l'eau,
3. la variation d'entropie de l'eau, l'entropie échangée par l'eau et l'entropie créée au cours de l'évolution $I \to F$; On utilisera le tableau des extraits des tables thermodynamiques de l'eau qui se trouve dans l'exercice THERMO 5 –2. [20]

Exercice THERMO 6 – 1

1. Un fluide décrit une évolution réversible décrite par un cycle dans un diagramme (T,S). Montrer que l'aire représente au signe près le travail reçu.
2. Dans un diagramme (p,V) d'un fluide, on trace un réseau d'isotherme $T_n = n\Delta T$ et un réseau d'isentropiques $S_n = n\Delta S$. Justifier dans le cas particulier où le fluide est un gaz parfait que la pente de l'isentropique passant par un point A est plus grande en valeur absolue que la pente de l'isotherme passant par A. Montrer que les aires découpées par le réseau d'isothermes et d'isentrpiques sont égales.

Exercice THERMO 6 – 2

Une mole de gaz parfait est prise à la température $T_1 = 285$ K sous la pression $p_1 = 1$ bar. On lui fait décrire le cycle suivant ne comportant que des transformations réversibles :

– compression adiabatique AB amenant le gaz à la température $T_2 = 320$ K ;
– compression isotherme BC amenant le gaz à la pression $p_3 = 2$ bars ;
– détente adiabatique CD amenant le gaz à la température T_1 ;
– détente isotherme DA.

1. Représenter le cycle en coordonnées de Clapeyron, puis dans un diagramme (T,S).
2. Calculer le travail fourni par le milieu extérieur.
3. Déterminer la quantité de chaleur cédée à la source chaude.
4. En supposant qu'il s'agisse du cycle d'une pompe à chaleur, calculer l'efficacité thermique de ce cycle. AN : $\gamma = 1,4$.[21]

Exercice THERMO 6 – 3

De l'air assimilé à un gaz parfait, décrit un cycle de Beau de Rochas $ABCD$. Ce cycle est constitué de deux adiabatiques réversibles qui alternent avec deux isochores. On notera C le point de température la plus élevée T_C, A le point de température la plus basse T_A. V_1 est le volume des points B et C et V_2 avec $V_2 > V_1$ celui des points A et D. On supposera que le coefficient γ est constant et que le gaz fournit le travail maximum.

1. Dessiner le cycle dans un diagramme de Clapeyron.
2. Calculer le taux de compression $a = \frac{V_2}{V_1}$ en fonction de T_A, T_C et γ.
3. Montrer que $T_B = T_D = \sqrt{T_A T_C}$.
4. On suppose que $\gamma = 1,4$, $T_A = 298$ K et $a = 9$. Calculer T_B, T_C et T_D. Commentaires.
5. On suppose maintenant que $\gamma = 1,4$ et $T_A = 298$ K mais que T_C ne dépasse pas 1100 K. Calculer a. Conclure.[22]

Exercice THERMO 6 – 4

De l'air, assimilable au gaz parfait, se détend dans une tuyère dont les surfaces d'entrée et de sortie sont respectivement égales à A_1 et A_2. A l'entrée, l'air est à la température $T_1 = 150°$ C et sa pression est

---

[19] Exercice THERMO 5 – 3 : **1.** $x_B = 0,24$; **2.** $s_B - s_A = 9,2$ J.K^{-1}.kg^{-1}

[20] Exercice THERMO 5 – 4 : **1.** $x_V(F) = 5,81.10^{-2}$; **2.** $Q = -20,6$ kJ ; **3.** $S_F - S_I = -47,0$ J.K^{-1} , $S_e = -55,3$ J.K^{-1} , $S_c = +8,3$ J.K^{-1}

[21] Exercice THERMO 6 – 2 : **4.** $e = 9,22$

[22] Exercice THERMO 6 – 3 : **4.** $T_B = 715$ K et $T_C = 1728$ K ; **5.** $a = 5,1$

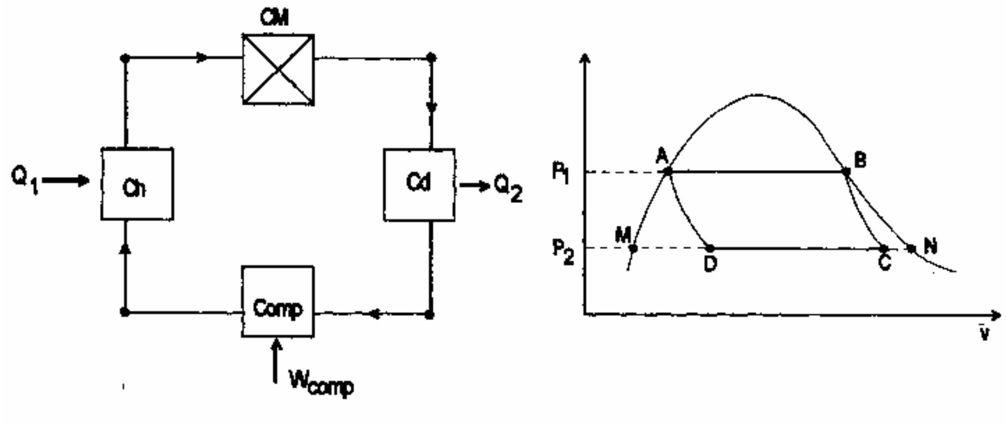
$P_1 = 2$ bar ; à la sortie sa température est T_2 et sa pression $P_2 = 1$ bar. L'écoulement de l'air est permanent et son débit massique est D. Pour l'air, on donne $\gamma = 1{,}4$ et $M = 29$ g.mol^{-1}. La constante des gaz parfait est $R = 8{,}31$ J.K^{-1}.mol^{-1}.

1. En explicitant le débit massique, montrer que $A_1 v_1 \rho_1 = A_2 v_2 \rho_2$ où v_1 et v_2 désignent les vitesses d'écoulement à l'entrée et à la sortie et ρ_1 et ρ_2 les masses volumiques à l'entrée et à la sortie.
2. Appliquer le premier principe appliqué à un système ouvert en supposant la tuyère horizontale et calorifugée. En déduire une expression de $v_2^2 - v_1^2$.
3. En supposant la détente isentropique en première approximation, calculer la température t_2 de sortie du gaz.
4. Déterminer les vitesses v_1 et v_2 d'entrée et de sortie du gaz. On prendra pour l'AN $\frac{A_1}{A_2} = 10$.
5. Quelle est la puissance maximale théorique utilisable mécaniquement sachant que la surface d'entrée est égale à 400 cm^2 ?[23]

Exercice THERMO 6 – 5

On considère une machine thermique, à un cylindre moteur, fonctionnant de façon cyclique réversible. Le fluide subissant les transformations est de l'eau.

– A la sortie de la chaudière (Ch) l'eau est sous forme de vapeur saturante (P_1, T_1).
– Elle ressort du cylindre moteur adiabatique (CM) dans l'état diphasé C.
– Elle subit une liquéfaction partielle dans le condensateur (Cd) à P_2, T_2 fixées.
– Le compresseur adiabatique amène le fluide à l'état liquide (A).
– La chaudière vaporise complètement l'eau à P_1 et T_1 constantes ($A \to B$).



On utilisera les valeurs suivantes :
– $P_1 = 40$ bar ; $T_1 = 250$°C ;
– $P_2 = 0{,}5$ bar ; $T_2 = 45$°C.

On donne, avec h enthalpie massique en kJ.kg^{-1} et s entropie massique en kJ.K^{-1}.kg^{-1}

	A	B	M	N
h	1083	2796	188	
s	2,80		0,627	8,15

1. Compléter le tableau.
2. Calculer le titre x en vapeur dans les états C et D.
3. Déterminer le travail utile w' (par kg d'eau).
4. Donner également, et pour 1 kg d'eau, les énergies thermiques fournie, q_1 par la chaudière et q_2 par le condensateur.
5. Définir et calculer le rendement de l'installation.[24]

[23] Exercice THERMO 6 – 4 : **3.** $t_2 = 74$°C ; **4.** $v_1 = 23{,}8$ m.s^{-1} et $v_2 = 390$ m.s^{-1} : **4.** 120 kW
[24] Exercice THERMO 6 – 5 : **2.** $x_C = 0{,}72$ et $x_D = 0{,}29$; **5.** $\rho = 0{,}39$