

TD n°17 - Révisions de thermodynamique et systèmes en écoulements

PREMIER ET SECOND PRINCIPES

1 Questions de cours classiques sur le premier et le second principes

1. Énoncer les conditions d'application de la loi de Laplace et la démontrer à l'aide du premier principe.
2. Retrouver la loi de Laplace à partir du second principe (première identité thermodynamique).
3. (a) Rappeler la définition d'un thermostat de température T_{th} .
 (b) On considère un solide de capacité thermique C , initialement à la température T_S . On le met en contact avec le thermostat précédent, avec $T_{th} > T_S$. Montrer que l'entropie créée s'écrit :

$$S_c = C \left[\left(\frac{T_S}{T_{th}} - 1 \right) - \ln \left(\frac{T_S}{T_{th}} \right) \right]$$

4. Montrer que l'expérience de Joule Gay-Lussac (ou détente dans le vide) est une transformation irréversible telle que $\Delta U = 0$. Que peut-on en déduire pour un gaz parfait ? L'expérience est-elle réversible ?

CHANGEMENTS D'ÉTATS

2 Questions de cours classiques sur les changements d'état

1. Tracer les diagrammes (P, T) et (P, V) (Clapeyron) de l'eau. On fera figurer les isothermes d'Andrews dans le diagramme de Clapeyron.
2. Donner l'expression d'une variation d'enthalpie et entropie lors d'un changement d'état. Quel sont les signes de L_{fus} , L_{vap} , L_{solid} ?

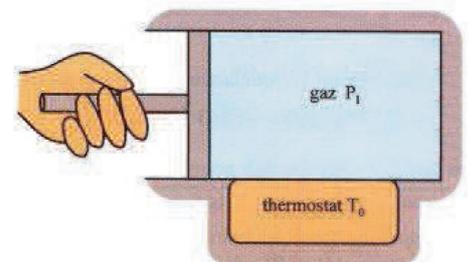
3 Compression avec changement d'état

Une mole de gaz est placée dans une enceinte thermostatée à une température T_0 inférieure à sa température critique T_C . A l'aide d'un piston mobile, on réduit progressivement le volume accessible au gaz jusqu'à obtenir sa liquéfaction totale, c'est à dire exactement jusqu'à disparition de la dernière bulle de gaz. 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 $\Delta_{vap}H_m$. 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 (P, T) , puis dans celui de Clapeyron, l'évolution du système.
2. Effectuer un bilan énergétique complet (calcul de W et Q) du système en distinguant deux étapes dans la transformation.
3. Calculer la variation d'entropie du système entre l'état initial et l'état final.

Données : $P_1 = 1 \text{ bar}$; $P_0 = 5 \text{ bar}$; $T_0 = 423 \text{ K}$; $\Delta_{vap}H_m = 38 \text{ kJ.mol}^{-1}$



MACHINES THERMIQUES

4 Questions de cours classiques sur les machines thermiques

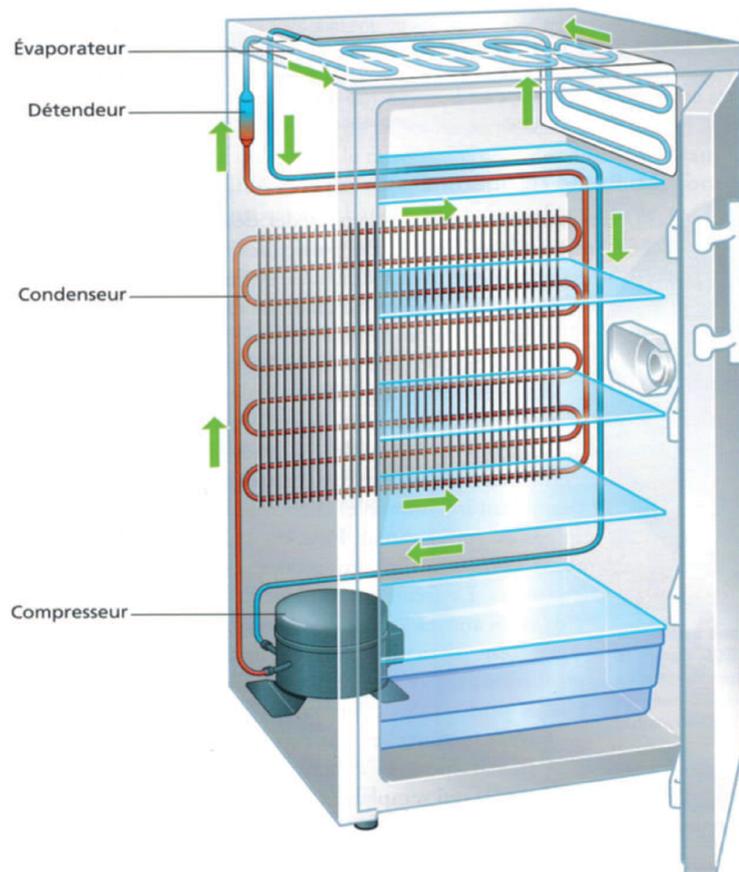
1. Donner un exemple de machine monotherme. Montrer qu'il est impossible de construire un moteur monotherme.
2. Écrire les bilans énergétiques et entropiques découlant du premier et du second principe pour une machine ditherme, c'est à dire en présence de deux thermostats de températures T_F et T_C . En déduire l'inégalité de Clausius.
3. Définir le rendement d'un moteur et montrer qu'il est nécessairement inférieur à une valeur correspondant au rendement de Carnot. Donner un ordre de grandeur du rendement réel d'un moteur thermique ou d'une centrale thermique et comparer au rendement d'un moteur électrique et d'un panneau photovoltaïque.
4. De même, définir l'efficacité (ou le coefficient de performance COP) d'un réfrigérateur ou d'une pompe à chaleur et montrer qu'elles sont nécessairement inférieures à une valeur correspondant aux efficacités de Carnot. Donner un ordre de grandeur d'efficacité réelle d'un réfrigérateur ou d'une pompe à chaleur et comparer à l'efficacité d'un radiateur électrique.
5. Qu'appelle-t-on le moteur de Carnot ? Tracer son cycle dans un diagramme de Clapeyron. On commentera le sens de parcours du cycle. Faire de même avec le diagramme (T,S) et préciser la signification physique de l'aire du cycle.
6. Pourquoi les machines thermiques réelles sont-elles nécessairement irréversibles ?

5 Cycle d'une machine frigorifique

Dans une machine frigorifique dont le fluide¹ est assimilable à un gaz parfait, une mole de fluide parcourant le cycle reçoit une quantité de chaleur totale Q_1 d'une source froide de température T_1 et fournit une quantité de chaleur totale $-Q_2$ à une source chaude de température T_2 . Le compresseur délivre dans le même temps un travail W . On donne : $T_1 = 268$ K et $T_2 = 293$ K. $C_p = 29$ J.K⁻¹.mol⁻¹.

1. Proposer un schéma de principe en vous appuyant sur le dessin ci-dessous. On expliquera en particulier l'intérêt du compresseur et du détendeur.

1. Il s'agit en pratique actuellement de tetrachloroéthane ou d'isobutane, deux gaz ne générant pas de trou dans la couche d'ozone, mais ce sont des gaz à effet de serre important. On néglige l'influence des changements d'état de ce fluide dans cet exercice.



Circuit du fluide réfrigérant dans un réfrigérateur à compression. Le fluide est ici coloré selon sa température : en rouge lorsqu'il est chaud [$+45\text{ °C}$ en début de cycle] et sous haute pression, et en bleu lorsqu'il est froid [-30 °C après le détendeur] et sous basse pression.

2. On suppose dans un premier temps que le cycle comprend les transformations réversibles suivantes :
 - (A \rightarrow B) compression adiabatique de T_1 à T_2
 - (B \rightarrow C) compression isotherme à T_2
 - (C \rightarrow D) détente adiabatique de T_2 à T_1
 - (D \rightarrow A) détente isotherme à T_1
 - (a) Dessiner le cycle dans le diagramme de Clapeyron.
 - (b) Définir et calculer l'efficacité e du cycle. Application numérique.

3. En réalité le cycle comprend les transformations suivantes (les points A et C sont identiques au cas précédent) :
 - (A \rightarrow B') compression adiabatique réversible de T_1 à $T'_2 = 330\text{K}$
 - (B' \rightarrow C) refroidissement isobare de T'_2 à T_2 , par contact avec le thermostat T_2 (irréversible)
 - (C \rightarrow D') détente adiabatique réversible de T_2 à T'_1
 - (D' \rightarrow A) échauffement isobare jusqu'à T_1 , par contact avec le thermostat T_1 (irréversible)
 - (a) Superposer le nouveau cycle au cycle précédent dans le diagramme de Clapeyron. Comment se situent T'_1 et T'_2 par rapport à T_1 et T_2 ? En quoi ce cycle est-il plus conforme à la réalité?
 - (b) Exprimer l'efficacité e' en fonction de T_2 , T'_2 , T_1 et T'_1 .
 - (c) Établir par ailleurs une relation simple entre T_1 , T'_1 , T_2 et T'_2 . Calculer T'_1 .
 - (d) En déduire l'expression de e' en fonction de T_1 et T'_2 . Application numérique. Comparer à l'efficacité e obtenue précédemment.
 - (e) Calculer la variation d'entropie de l'ensemble fluide-sources au cours du cycle, pour une mole de fluide, en fonction de C_p , T'_2 et T_2 . A.N. Conclure.

Réponse : 1.b) $e = Q_1/W = T_1/(T_2 - T_1) = 10,7$. 2.b) $e' = \frac{1}{\frac{T_2 - T_2}{T_1 - T_1} - 1}$ 2.c) $T_1 T_2 = T_1' T_2'$, 2.d) $e' = \frac{T_1}{T_2' - T_1} = 4,3 < 10,7$ et

$$\Delta S_{\text{tot}} = S_{i,\text{cycle}} = C_p \left(\frac{T_2'}{T_2} + \frac{T_2}{T_2'} - 2 \right) = 0.41 \text{ J K}^{-1}.$$

6 Moteur à Essence

On s'intéresse au fonctionnement d'un moteur de voiture (moteur à essence) schématisé sur la figure 1 ci-dessous. Le fluide considéré ici est un mélange {air + essence} (15kg d'air pour 1kg d'essence). La combustion du fluide se fait grâce aux bougies qui produisent une étincelle.

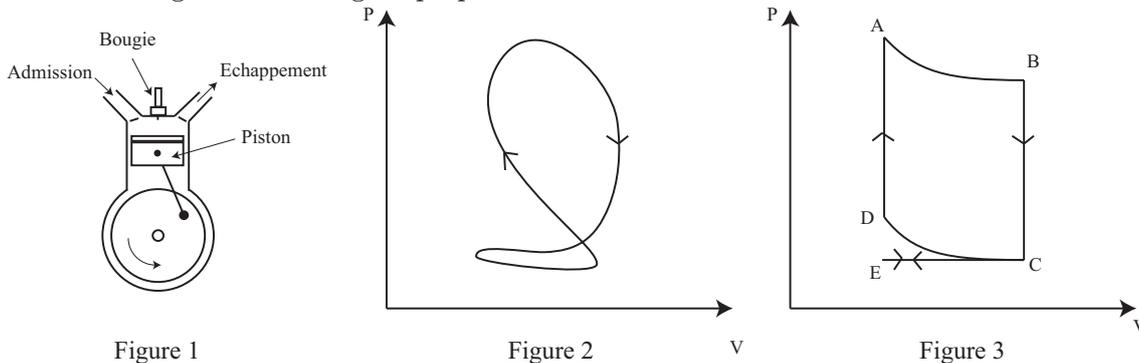


Figure 1

Figure 2

Figure 3

Le cycle peut être décomposé en 6 étapes :

- Etape 1 : ouverture de la soupape d'admission : injection du carburant (le piston descend)
- Etape 2 : Compression rapide (le piston remonte)
- Etape 3 : Explosion grâce à l'allumage de la bougie et augmentation brutale de la pression (le piston n'a pas encore eu le temps de redescendre)
- Etape 4 : Détente rapide (le piston descend)
- Etape 5 : Ouverture de la soupape d'échappement : éjection d'une partie des gaz brûlés (le piston n'a pas encore eu le temps de remonter)
- Etape 6 : Ejection du reste des gaz brûlés (le piston remonte)

Le cycle réel ainsi que le cycle modélisé (cycle de Beau de Rochas) sont représentés sur les figures 2 et 3.

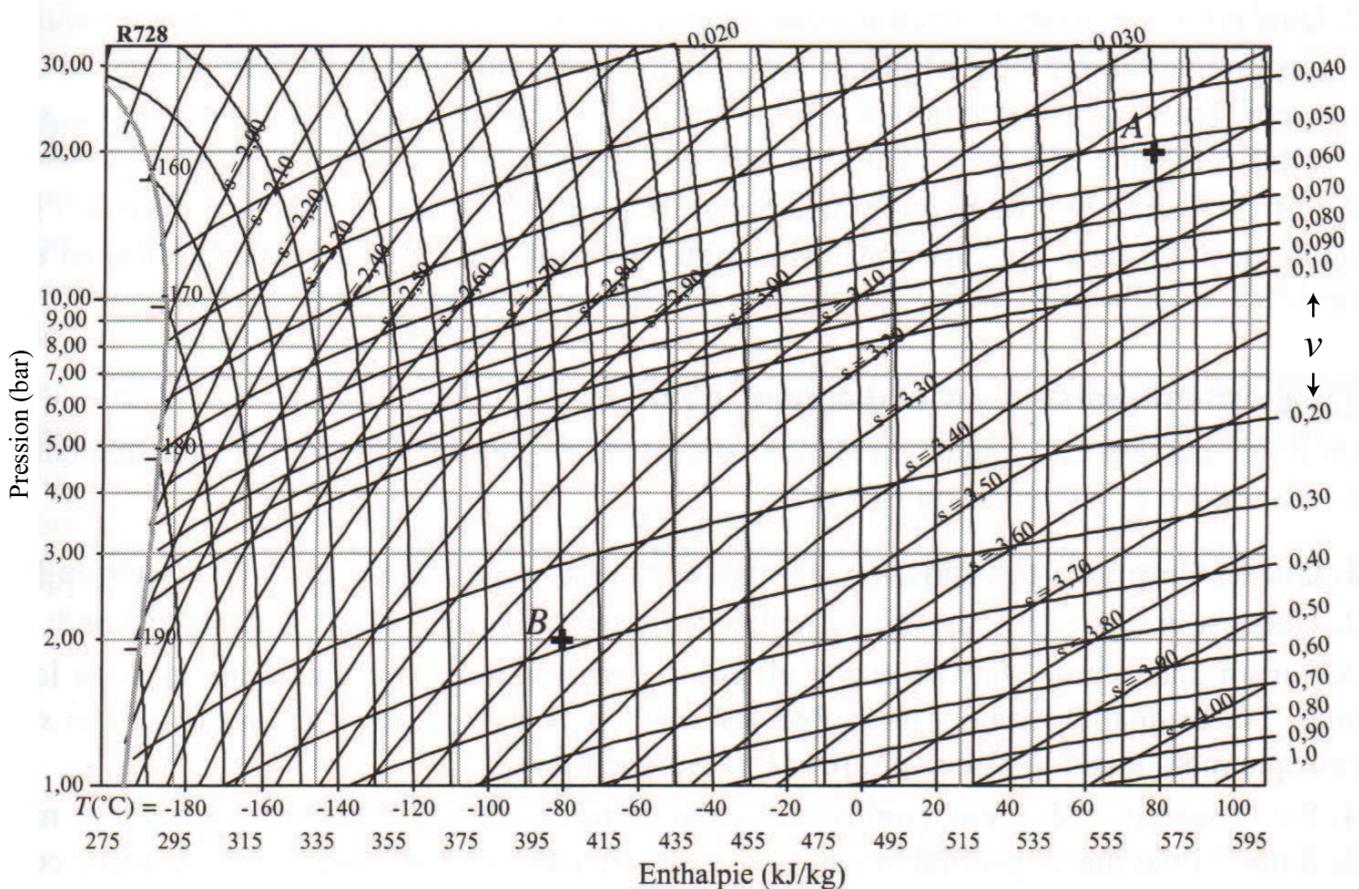
On considérera le mélange {air + essence} comme un gaz parfait de coefficient $\gamma = 1.4$. De plus, on considérera que l'ensemble du cycle fonctionne de manière réversible.

1. Identifier chaque étape de fonctionnement du moteur à essence à celles du cycle de Beau de Rochas. Justifier en particulier le caractère adiabatique, isochore, ou isobare de chaque étape.
2. Exprimer le rendement du cycle modélisé en fonction de γ et du taux de compression $\alpha = 8$ (encore appelé rapport volumétrique et défini par $\alpha = V_{\text{max}}/V_{\text{min}}$).
3. Comparer la valeur précédente au rendement réel du moteur qui est de l'ordre de 30%. Comment expliquer cette différence ?
4. Expliquer pourquoi un tel moteur nécessite l'emploi d'un démarreur. Quelle est la source d'énergie alimentant le démarreur ?
5. Les voitures classiques possèdent 4 cylindres (moteurs identiques à celui décrit précédemment) dont les cycles de fonctionnement sont décalés les uns par rapport aux autres. Pourquoi ?

SYSTEMES EN ECOULEMENT

7 Etude d'une transformation pour le fluide R728 dans le diagramme des frigorigères

On peut voir sur la figure ci-dessous une partie du diagramme ($\ln P, h$) du fluide R728, dans le domaine où ce fluide est gazeux. Les températures sont en $^{\circ}\text{C}$, les volumes massiques v en $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, les entropies massiques s en $\text{kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$.

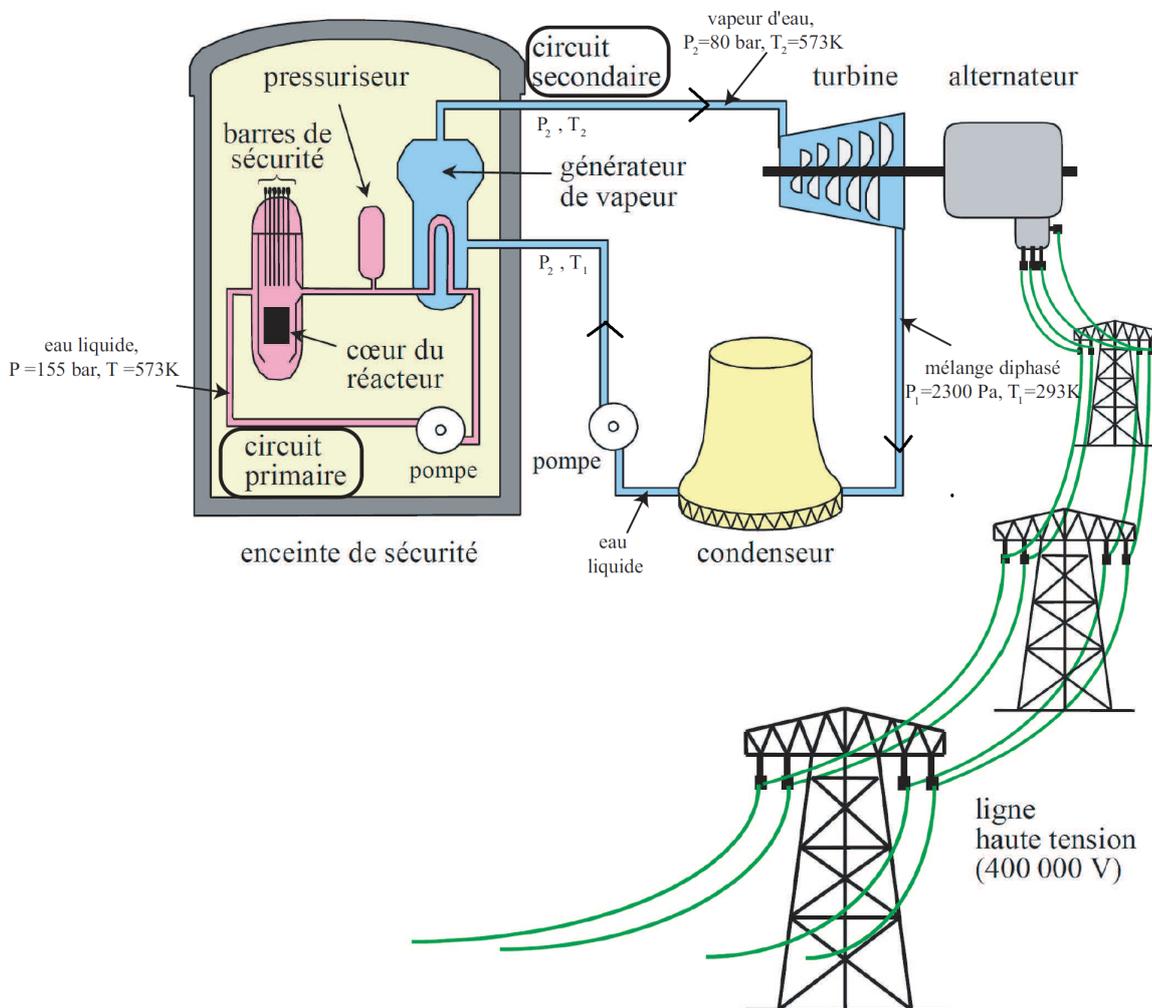


- Dans quelle partie du diagramme le gaz se comporte-t-il comme un gaz parfait ?
- Évaluer la capacité thermique massique à pression constante du fluide pour $P = 1 \text{ bar}$ en la supposant constante sur tout le domaine de température représenté. Sachant qu'il s'agit d'un gaz diatomique, déterminer sa masse molaire et en déduire la nature du fluide R728.
- On considère maintenant une transformation du fluide entre les états A et B représentés sur la figure précédente par écoulement stationnaire à travers une tuyère horizontale adiabatique ne comportant aucune pièce mobile. Évaluer :
 - la vitesse du gaz à la sortie de la tuyère sachant que la vitesse à l'entrée est quasiment nulle.
 - l'entropie créée par unité de masse de gaz dans la tuyère.

8 Fonctionnement d'un réacteur à eau pressurisée (REP) de centrale nucléaire

Le parc de production nucléaire français est composé de centrales de la filière REP (Réacteurs à Eau Pressurisée). On étudie l'eau ($M = 18g.mol^{-1}$) en circuit fermé du circuit secondaire. L'écoulement est stationnaire. On propose de modéliser son évolution par le cycle suivant :

- État A : l'eau qui sort du condenseur est liquide sous la pression P_1 à la température T_1 .
- Évolution AB : elle subit dans la pompe une compression durant laquelle sa température ne varie pratiquement pas. On considérera que les échanges thermiques sont négligeables lors de cette compression qui l'amène dans l'état B sous la pression P_2 à la température T_1 .
- Évolution BD : elle passe ensuite dans un échangeur qui permet les transferts thermiques entre le circuit primaire et le circuit secondaire. On peut décomposer en deux transformations ce qui se passe :
 - l'eau liquide s'échauffe de manière isobare (P_2) jusqu'à l'état C (P_2, T_2).
 - l'eau liquide se vaporise totalement, jusqu'à l'état D (P_2, T_2).
- Évolution DE : la vapeur d'eau se détend de manière réversible dans une turbine calorifugée jusqu'à (P_1, T_1), état E. Durant cette détente, une fraction $(1 - x)$ de l'eau devient liquide et x reste gazeuse.
- Évolution EA : la vapeur restante se condense à la température T_1 .



Dans le tableau suivant, on donne la pression de vapeur saturante P_s en bar, les volumes massiques v_ℓ du liquide et v_v de la vapeur en $m^3.kg^{-1}$, les enthalpies massiques h_ℓ du liquide et h_v de la vapeur en $kJ.kg^{-1}$ et enfin les entropies massiques s_ℓ du liquide et s_v de la vapeur en $kJ.K^{-1}.kg^{-1}$.

$T(K)$	P_s	v_ℓ	v_v	h_ℓ	h_v	s_ℓ	s_v
293	0.023 (P_1)		58.8	85	2540	0.3	8.7
573	80 (P_2)	$1,31.10^{-3}$	0.026	1290	2790	3.2	6.0

On rappelle la valeur de la constante des gaz parfaits : $R = 8.314 J.K^{-1}.mol^{-1}$.

- Tracer le cycle de l'eau sur un diagramme de Clapeyron (P, v) en plaçant les points correspondant aux états A, B, C, D et E . On fera de même dans le diagramme des frigoristes de l'eau fourni en fin d'énoncé.
- (a) Démontrer que la transformation DE est isentropique.
(b) Calculer le titre en vapeur dans l'état E par lecture directe du diagramme ($\ln P, h$).
(c) Retrouver ce résultat à l'aide du tableau précédent.
- On notera w_a le travail reçu par l'alternateur par unité de masse du fluide écoulé (on négligera tout frottement). La turbine est calorifugée et horizontale.
(a) Calculer la valeur numérique de w_a par lecture directe du diagramme ($\ln P, h$).
(b) Retrouver ce résultat à partir des valeurs du tableau précédent.
- (a) La capacité thermique massique de l'eau liquide est $c = 4.2 kJ.K^{-1}.kg^{-1}$. Calculer le transfert thermique (par unité de masse de fluide écoulé) du système avec l'échangeur du circuit primaire $Q_{BD,m}$. Retrouver ce résultat par lecture du diagramme ($\ln P, h$).
(b) On définit le rendement $\eta = \frac{w_a}{Q_{BD,m}}$. Le calculer. Que néglige-t-on dans cette définition ? Retrouver ce résultat par lecture du diagramme ($\ln P, h$).
(c) Calculer le rendement maximal qu'on aurait pu avoir avec les mêmes sources. Quelle conclusion peut-on en tirer ?

9 Compresseur et création d'entropie

Dans un compresseur fonctionnant en régime permanent, de l'air est comprimé, de façon adiabatique, à partir de l'état $P_1 = 1,0.10^5 Pa$, $T_1 = 293 K$, jusqu'à une pression $P_2 = 3,0.10^5 Pa$. On supposera le gaz parfait. On prendra $C_{p,m} = 29 J.mol^{-1}.K^{-1}$ et $M = 29 g.mol^{-1}$. On définit le coefficient de performance η comme le rapport du travail isentropique massique $w_{m,is}$ que consommerait le compresseur sur le travail massique réel $w_{m,réel}$ absorbé par la machine. On donne $\eta = 0.8$.

- Donner la valeur de la température finale T_2 ainsi que celle du travail $w_{m,is}$ dans le cas idéal (compresseur isentropique).
- Déterminer les nouvelles valeurs T_2' et $w_{m,réel}$ pour le compresseur réel. Définir et calculer la création d'entropie par unité de masse du fluide comprimé.

Réponses : 1. $w_{m,is} = \frac{C_{p,m}}{M}(T_2 - T_1) = 108 J.g^{-1}$, 2. $T_2' = T_1 + \frac{w_{m,is}M}{C_{p,m}\eta} = 429 K$ et $s_c = \frac{C_{p,m}}{M} \ln \left(\frac{T_2'}{T_2} \right) - \frac{R}{M} \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right) = 66.3 J.K^{-1}.kg^{-1}$.

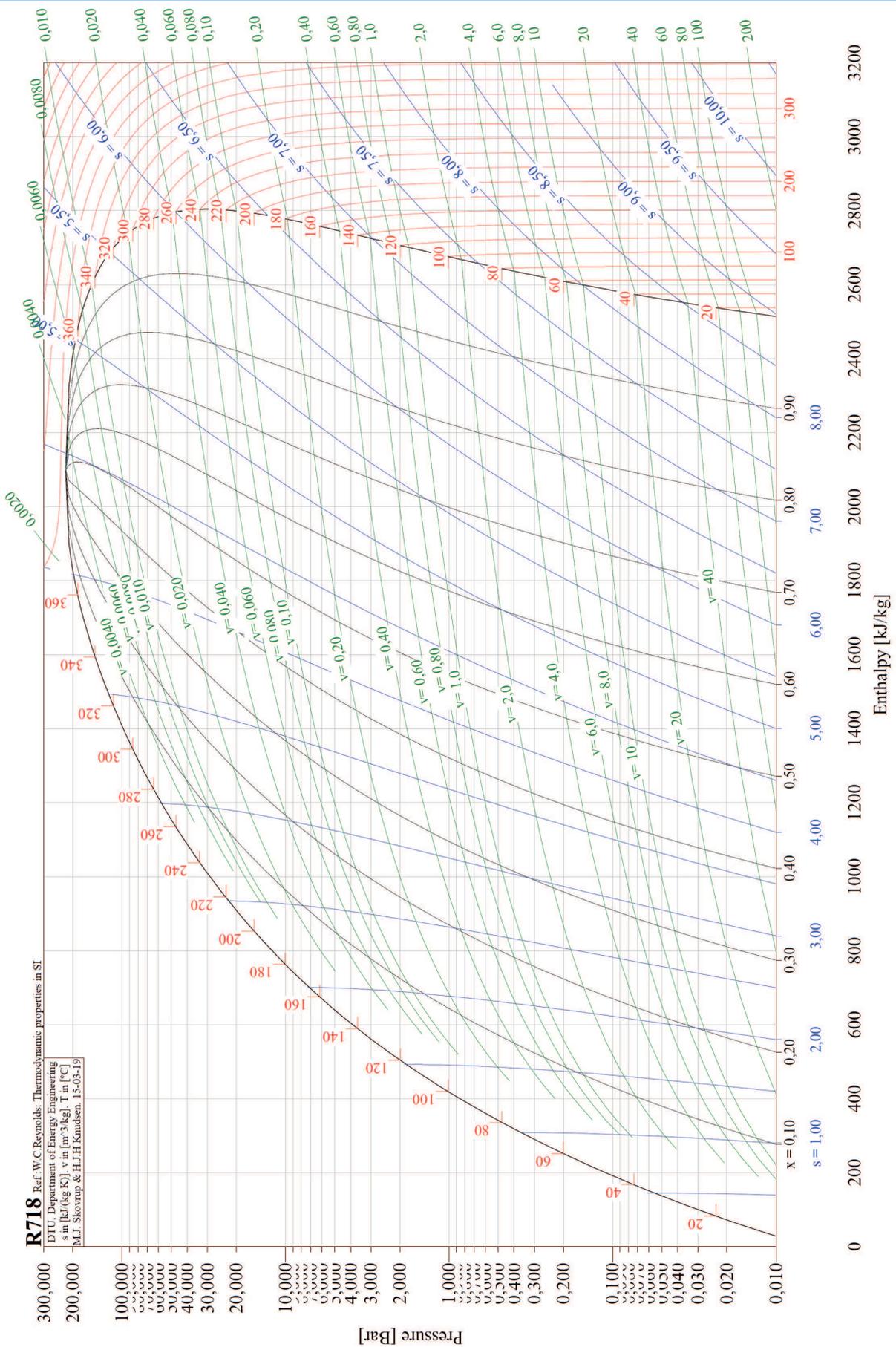


FIGURE 1 – Diagramme des frigoris de l'eau. L'échelle des pressions est logarithmique. Les températures sont en °C, les entropies massiques en $kJ.K^{-1}.kg^{-1}$ et les volumes massique en $m^3.kg^{-1}$.