EXERCICES THERMODYNAMIQUE 1

Données :

Variation d'entropie de n moles de gaz parfait passant de (P_1, V_1, T_1) à (P_2, V_2, T_2)

$$\Delta S = C_v \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + nR \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) = C_p \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) - nR \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)$$

Variation d'entropie d'une phase condensée de capacité thermique C passant de T_1 à T_2 :

$$\Delta S = C \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)$$

Exercice 1 :Transformations d'un gaz parfait .

n =3 mol de gaz parfait monoatomique sont emprisonnées dans une enceinte cylindrique fermée par un piston de section S = 10 cm² de masse négligeable. L'état initial est Po = 101300 Pa est To = 300 K.

On prendra g = 9,81 $m.s^{-2}$.

1. On pose graduellement sur le piston une masse m = 5 kg (en laissant s'écouler du sable par exemple) en supposant l'enceinte adiabatique. Calculer les conditions finales et la variation d'entropie du gaz.

2.Mêmes questions mais en supposant maintenant que l'on pose brutalement un objet de même masse sur le piston.

Exercice 2:étude d'un cycle

Une mole d'un gaz parfait (n = 1,0 mol) de coefficient isentropique γ subit un cycle de transformation représenté sur le diagramme ci-contre : partant de l'état (1) de pression P_1 = 2,5 bar, une adiabatique réversible l'amène à l'état (2), elle subit ensuite une évolution isobare l'amenant dans l'état (3), puis retourne dans l'état (1) par une compression isotherme mécaniquement réversible. Les deux dernières transformations ont lieu en contact thermique avec un thermostat à température Te = 293K.

1- En justifiant soigneusement, placer les points (1), (2), (3) sur le diagramme.

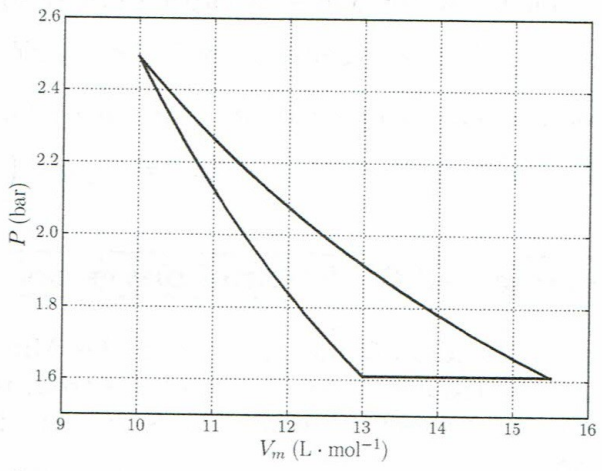
2- En déduire la valeur du coefficient γ. Le gaz parfait est-il diatomique ou monoatomique?

3- Pour chacune des transformations (i) -> (j),calculer la variation d'énergie interne ΔUij, le travail Wij, le transfert thermique reçu Qij et la variation d'entropie ΔSij du gaz.

4- Pour chacune des transformations, faire un bilan entropique et calculer l'entropie créée.

Variation d'entropie de n moles de gaz parfait passant de (P_1, V_1, T_1) à (P_2, V_2, T_2)

$$\Delta S = C_v \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + nR \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) = C_p \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) - nR \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)$$



Exercice 3:mesure calorimétrique de l'enthalpie de fusion de l'eau

Cet exercice propose d'analyser une expérience permettant de mesurer l'enthalpie massique de fusion de l'eau.

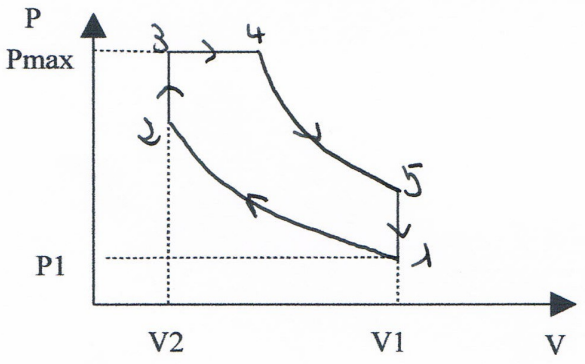
Les opérations suivantes sont réalisées dans un calorimètre, la pression est constante et vaut 1 bar :

→ Mélanger une masse m_0 = 50 g d'eau chaude (T_{ch} = 50 °C) avec la même masse m_0 d'eau à température ambiante

(T_{amb} = 20 °C).
→ Après quelques minutes, la température de l'eau ne varie plus et vaut T_1 = 32 °C.
→ Ajouter un glaçon partiellement fondu. Le glaçon est pesé après séchage et juste avant d'être ajouté au calorimètre : on mesure m = 15 g.
→ Après quelques minutes, le glaçon a totalement fondu, la température de l'eau ne varie plus et vaut T_2 = 20 °C.
Donnée : capacité thermique massique de l'eau liquide $c = 4{,}2 \cdot 10^3\ J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}$.

Déterminer, à partir des données de l'expérience, l'enthalpie massique de fusion de la glace à T_0 = 0°C .

Exercice 4:moteur diesel .
On modélise le fonctionnement d'un moteur à combustion de type Diesel par le cycle suivant



L'injection du carburant s'effectue en 2 et la combustion correspond aux transformations $2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$.
On donne :
- P_{min} = P1 = 10^5 Pa T1 = 293 K P_{max} = 60.10^5 Pa .
- Rapport volumétrique : α = V1 / V2 = 15 .
- L'air et les gaz brûlés sont assimilés à un gaz parfait γ = 1,4 .
- La combustion correspond à un apport d'énergie thermique de $1{,}2.10^3$ kJ par kg d'air .
- Les transformations $1 \rightarrow 2$ et $4 \rightarrow 5$ sont des adiabatiques réversibles .

On demande de déterminer :
1- Déterminer T2 et P2 puis T3
2- Déterminer T4 .
3- Déterminer T5 en fonction de T3 , T4 et α .
4- Le travail Wm fourni par le moteur (pour 1 kg d'air) .
5- Le rendement théorique du moteur .

Exercice 5 : association de deux cycles dithermes
On considère un dispositif de chauffage d'une pièce maintenue à la température de 300K, l'extérieur de l'habitation étant supposée `a 270K.
Un moteur réversible reçoit le transfert thermique Q d'une chaudière à 600K et fournit q à une source froide à la température de 270K.
Le travail fourni par le moteur sert à faire fonctionner une pompe à chaleur réversible qui pompe q′ à la source à la température de 270K et fournit Q′ à la pièce à chauffer, à la température de 300K.
Calculer $\eta = \dfrac{Q'}{Q}$

Exercice 6 : surfusion
Un sportif, grand adepte de la randonnée, part faire un trek en Alaska . Un jour où les conditions météorologiques sont particulièrement défavorables , transi de froid, il décide d'utiliser pour se réchauffer une bouillotte « magique » . Il sort de son sac une pochette remplie d'une solution d'acétate de sodium trihydraté , et tord une plaquette métallique à l'intérieur de cette dernière . La solution se solidifie quasi-instantanément, ce qui s'accompagne d'un dégagement de chaleur permettant à notre sportif de se réchauffer les mains et le visage .
On donne les caractéristiques physiques de l'acétate de sodium trihydraté :
→ température de fusion sous pression atmosphérique : $T_f = 58\,°C$
→ enthalpie massique de fusion à T_f : $L_f(T_f) = 242{,}8\,kJ.kg^{-1}$
→ capacité thermique massique du solide : $c_{p,s} = 3{,}31\,kJ.kg^{-1}.K^{-1}$
→ capacité thermique massique du liquide : $c_{p,l} = 3{,}06\,kJ.kg^{-1}.K^{-1}$

1- Le fait que la solution soit liquide à la température extérieure $T_0 = -10\,°C < T_f$ est appelé phénomène de surfusion . L'état obtenu peut-il être qualifié de stable ? De métastable ?
2- Que se passe-t-il lorsque le sportif tord la plaque métallique ?
3- En imaginant deux chemins différents permettant, pour une unité de masse d'acétate de sodium, de passer du liquide à T_0 au solide à T_f sous la pression atmosphérique, déterminer l'enthalpie massique de fusion à T_0 .
4- Sachant qu'on obtient juste après la torsion de la plaquette un mélange liquide-solide sous la pression atmosphérique, déterminer la température de ce mélange et la fraction x de solide dans ce mélange, en fonction de $c_{p,l}, L_f(T_f), T_0 et T_f$.
5- En dessous de quelle température extérieure Tc toute la masse de solution se solidifie-t-elle ?

Exercice 7 :moteur thermique fonctionnant avec deux masses d'eau .
Un moteur thermique fonctionne réversiblement entre deux masses d'eau : m_1 de température initiale T_{01} et m_2 de température initiale T_{02} .
1- Que peut-on dire des températures des deux sources lorsque le moteur cesse de fonctionner ? En appliquant entre autres le second principe, déterminer la température T_f atteinte par les deux masses d'eau en fonction de $m_1, m_2, T_{01} et T_{02}$.
2- Déterminer le travail fourni pendant toute la durée du fonctionnement .
3- Effectuer les applications numériques pour :
$m_1 = 600\,kg : m_2 = 1000\,kg\,; T_{01} = 360\,K\,, T_{02} = 300K$ on note $c = 4{,}18 J.g^{-1}.K^{-1}$ la capacité thermique massique de l'eau .

Exercice 8:
Une pompe à chaleur réversible fonctionne entre la masse d'eau m_1 contenue dans une piscine et le masse d'eau m_2 d'une patinoire .

Initialement $T_{10} = T_{20} = To = 280$ K (1 = piscine , 2 = patinoire) .
On réalise les opérations suivantes :
1- On amène l'eau liquide de la patinoire à la température $T'_2 = 273$ K (l'eau restant liquide) . Calculer T'_1 .
2- Puis toute l'eau de la patinoire passe à l'état de glace à $T'_2 = 273$ K , calculer T''_1.
3- Enfin la glace est portée à la température $T_{2f} = 260$K . Calculer T_{1f} .

Déterminer également le travail total qu'il a fallu fournir à la pompe .

On introduira les grandeurs nécessaires .
AN : calculer T'_1 , T''_1 et T_{1f} pour $m_1 = 5\,m_2$
Capacité calorifique massique de l'eau c = 4,18 $kJ.K^{-1}.kg^{-1}$
Capacité calorifique massique de la glace c' = 2,1 $kJ.K^{-1}.kg^{-1}$
Enthalpie massique de fusion de la glace à 273 K $L_f = 335$ $kJ.kg^{-1}$

Exercice 9 : machine à vapeur
On adopte le modèle de machine à vapeur suivant : un système fermé constitué d'un kg d'eau sous deux phases liquide et vapeur décrit un cycle ABCD . Les évolutions BC et DA sont adiabatiques et réversibles ; les évolutions AB et CD sont isothermes-isobares . On note x le titre massique en vapeur . Les données concernant le cycle sont résumées dans le tableau :

	A	B	C	D
p en bar	20	20	1	1
T en K	485	485	373	373
x	0	1	x_C	x_D

On donne les extraits suivants des tables thermodynamiques de l'eau :

		Liquide juste saturé $x_V = 0$			Vapeur saturante-sèche $x_V = 1$		
T	p	v_L	h_L	s_L	v_V	h_V	s_V
K	bar	$m^3.kg^{-1}$	$kJ.kg^{-1}$	$kJ.K^{-1}.kg^{-1}$	$m^3.kg^{-1}$	$kJ.kg^{-1}$	$kJ.K^{-1}.kg^{-1}$
485	20	$1,18.10^{-3}$	909	2,45	0,0998	2 801	6,35
373	1	$1,04.10^{-3}$	418	1,30	1,70	2 676	7,36

1- Tracer le cycle dans un diagramme de Clapeyron .
2- Que peut-on dire de Δs_{BC} et Δs_{DA} ? En utilisant cette propriété, déterminer les titre massiques en vapeur aux points C et D . En déduire les enthalpies massiques h_C et h_D aux points C et D .
3- Calculer les travaux massiques et transferts thermiques massiques reçus par l'eau au cours des évolutions AB, BC, CD et DA puis le travail total reçu .
4- Définir l'efficacité thermodynamique e de la machine à vapeur et la calculer .

Exercice 10 :mitigeur de douche

Un mitigeur de douche est un système ouvert avec deux entrées et une sortie qui mélange deux écoulements à deux températures différentes pour former un écoulement d'eau tiède. On suppose que la capacité calorifique massique de l' eau liquide $c = 4,2\,kJ.kg^{-1}K^{-1}$ ne dépend pas de la température. Les caractéristiques des deux écoulements d'eau en entrée sont les suivantes:

→ un écoulement d'eau froide avec un débit de masse D_1 à la température T_1 = l0°C

→ un écoulement d'eau chaude avec un débit de masse D_2 à la température T_2 = 70°C .

L'écoulement en sortie du mitigeur a un débit de masse D_3 = 9,0kg· min^{-1} et une température T_3 = 30°C. On suppose que les échanges thermiques dans le mitigeur se font uniquement entre les deux écoulements et qu'il n'y a pas de travaux à prendre en compte autres que les forces de pression extérieures. La vitesse de l'eau est supposée uniforme dans l'ensemble des écoulements et du mitigeur et on étudie l'ensemble en régime stationnaire.

1- Calculer les valeurs numériques des débits D_1 et D_2 qui permettent d'avoir ces caractéristiques de l'écoulement de sortie.

2- Calculer l'entropie créée lors d'une douche de durée 10 min .

Exercice 11 :étude d'une turbine .

Préliminaire :
Etablir le bilan enthalpique pour un fluide en écoulement stationnaire .

De l'azote assimilé à un gaz parfait diatomique (masse molaire M = 28 g.mol $^{-1}$, γ =1.4) s'écoule en régime permanent dans une turbine avec un débit massique Dm = 4 kg.s-1 .
Les conditions d'écoulement sont :

- à l'entrée : pression P_1 = 4bars , vitesse v_1 = 20 $m.s^{-1}$
- à la sortie : pression P_2 = 2 bars , vitesse v_2 = 180 $m.s^{-1}$

La turbine fournit à l'extérieur une puissance utile P = 80 kW , le gaz sortant à une température T_2 égale à la température extérieure Ta = T_2 = 298 K .
1- Dans l'hypothèse où la transformation subie par l'azote est isotherme quelle est la puissance calorifique Pth reçue par le gaz?
Calculer la variation d'entropie par seconde de l'azote , et en déduire la création d'entropie par seconde pour la turbine .
2- Si le gaz a subi une transformation adiabatique , quelle est sa température à l'entrée de la turbine ?
En déduire la création d'entropie par seconde dans la turbine .

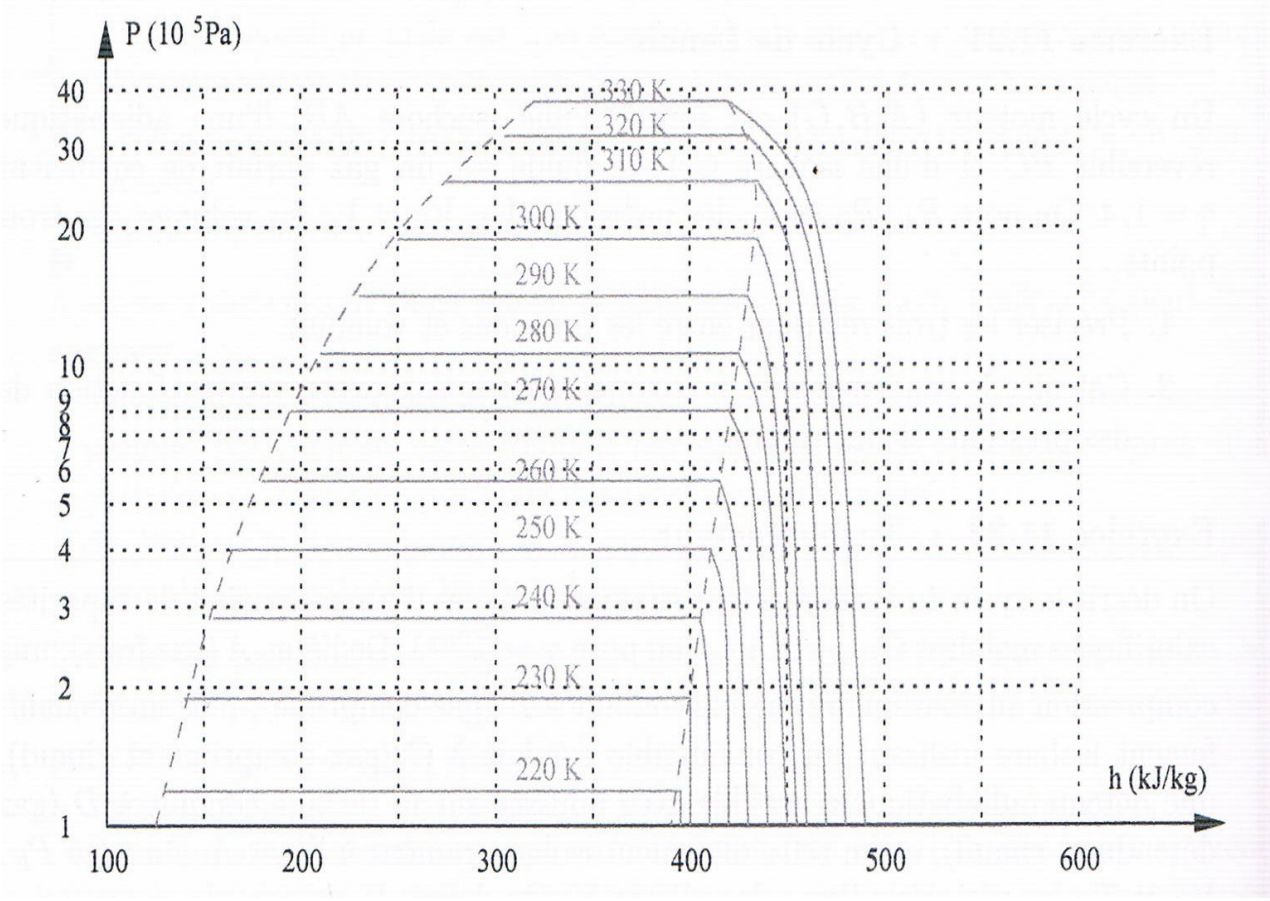
Exercice 12:Étude d'un climatiseur

Le fluide caloporteur est décrit parle diagramme (P, h) ci-dessous .

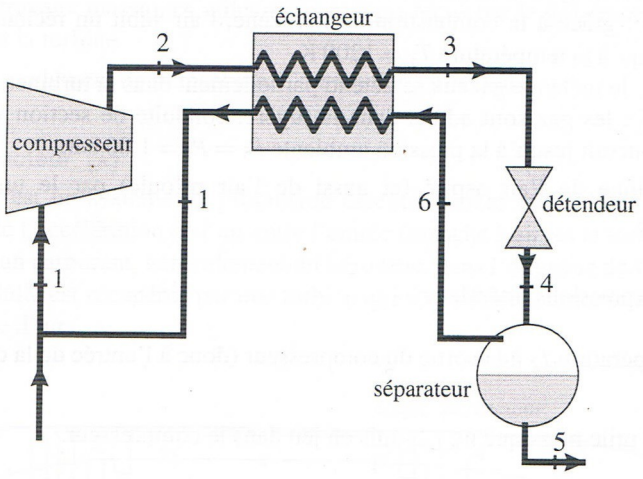
Il décrit un cycle (EFGH) ditherme et dibare: $T_E = T_F = T_1$ = 280 K, $P_E = P_F = P_1$, $T_G = T_H = T_2$ =320 Ket $P_G = P_H = P_2$.
G est le point de rosée et H le point d'ébullition à la température T_2 . On donne les enthalpies massiques aux points E et

F , $h_E = 280$ kJ kg^{-1} et $h_F = 400$ kJ $.kg^{-1}$ Les transformations FG et HE sont isentropiques.

1. Déterminer les pressions P_1 et P_2.
2. Déterminer les titres massiques en vapeur en E et en F.
3. Justifier que l'énergie utile pour le climatiseur est q_{EF} et que l'énergie coûteuse est $w_{u,FG}$. Calculer ces deux grandeurs et l'efficacité du climatiseur.
4. Dans une villa, on utilise le climatiseur pour refroidir l'air d'un salon, et on décide de récupérer l'énergie thermique normalement perdue dans le climatiseur pour chauffer l'eau de la piscine. Quelle est la nouvelle valeur de l'efficacité de l'installation?



Exercice 13 : Procédé de Linde-Hampson pour la liquéfaction du diazote .



La figure ci-dessus représente le schéma de principe du procédé Linde-Hampson utilisé pour produire de l'azote liquide (état 5). L'azote entre dans le compresseur dans l'état 1($P_1 = 1$ bar; $T_1 = 293$ K); il y subit une compression isotherme qui l'amène à l'état 2. Il est alors refroidi à pression constante ($P_3 = P_2$) dans l'échangeur, avant d'être détendu jusqu'à la pression atmosphérique ($P_4 = P_5 = P_6 = P_1 = 1$ bar) dans le détendeur. L'azote liquide est extrait du séparateur; la vapeur saturée sèche d'azote (état 6) est utilisée pour refroidir l'azote dans l'échangeur; on admettra que cette vapeur d'azote est ramenée à l'état 1 à la sortie l'échangeur. L'étude de ce procédé de liquéfaction sera effectuée en utilisant les propriétés thermodynamiques réelles lues sur le diagramme (In P, h) fourni ci-après. Sur ce diagramme les températures sont en

°C, les volumes massiques en m3 kg^{-1}, les entropies massiques en
$kJ.K^{-1}.kg^{-1}$. Dans tout le problème, en négligera les variations d'énergie cinétique, d'énergie potentielle. On étudie le fonctionnement de l'installation en régime stationnaire .

1- On admet que la compression de l'azote s'effectue de façon isotherme réversible de l'état1 jusqu'à l'état 2 (P_2 = 200 bar).

a- Placer les points 1 et 2 sur le diagramme du diazote et déterminer leurs enthalpie et entropies massiques.

b- Par application du second principe, calculer le transfert thermique massique q_C reçu par le gaz dans le compresseur.

c- En déduire le travail utile massique wc reçu par le gaz dans le compresseur.

2- La transformation, qui s'effectue dans le détendeur, fait passer l'azote de 200 bar à 1,0 bar et le détendeur ne comporte pas de parties mobiles. Le détendeur, le séparateur, l'échangeur et tous les circuits de liaison sont supposés parfaitement calorifugés.

a- Quelle propriété remarquable a cette transformation?

b- En déduire, en utilisant le diagramme, qu'il faut que la température T_3 dans l'état 3 soit inférieure à une température T_{max} , pour que le fluide dans l'état 4 soit un mélange liquide- vapeur. Donner une valeur approchée de T_{max} .

c- Placer les points 5 et 6 sur le diagramme et déterminer leurs enthalpies massiques.

3- Dans l'échangeur thermique, les fluides s'écoulant en sens inverse dans les deux conduites échangent du transfert thermique entre eux. Il n'y a pas de pièce mobile et l'échangeur est parfaitement calorifugé. On note Dm le débit massique dans la conduite 2-3 et D'm le débit massique dans la conduite 6 - 1. On note Φ la puissance thermique passant de la conduite 2 - 3 à la conduite 6 -1.

a- Exprimer les transferts thermiques massiques q et q' reçus par le fluide respectivement dans les conduites 2-3 et 6 -1.

b- En déduire que: $D_m(h_3-h_2)+D'_m(h_1-h_6)=0$

4- On note y la fraction massique d'azote liquide dans l'état 4

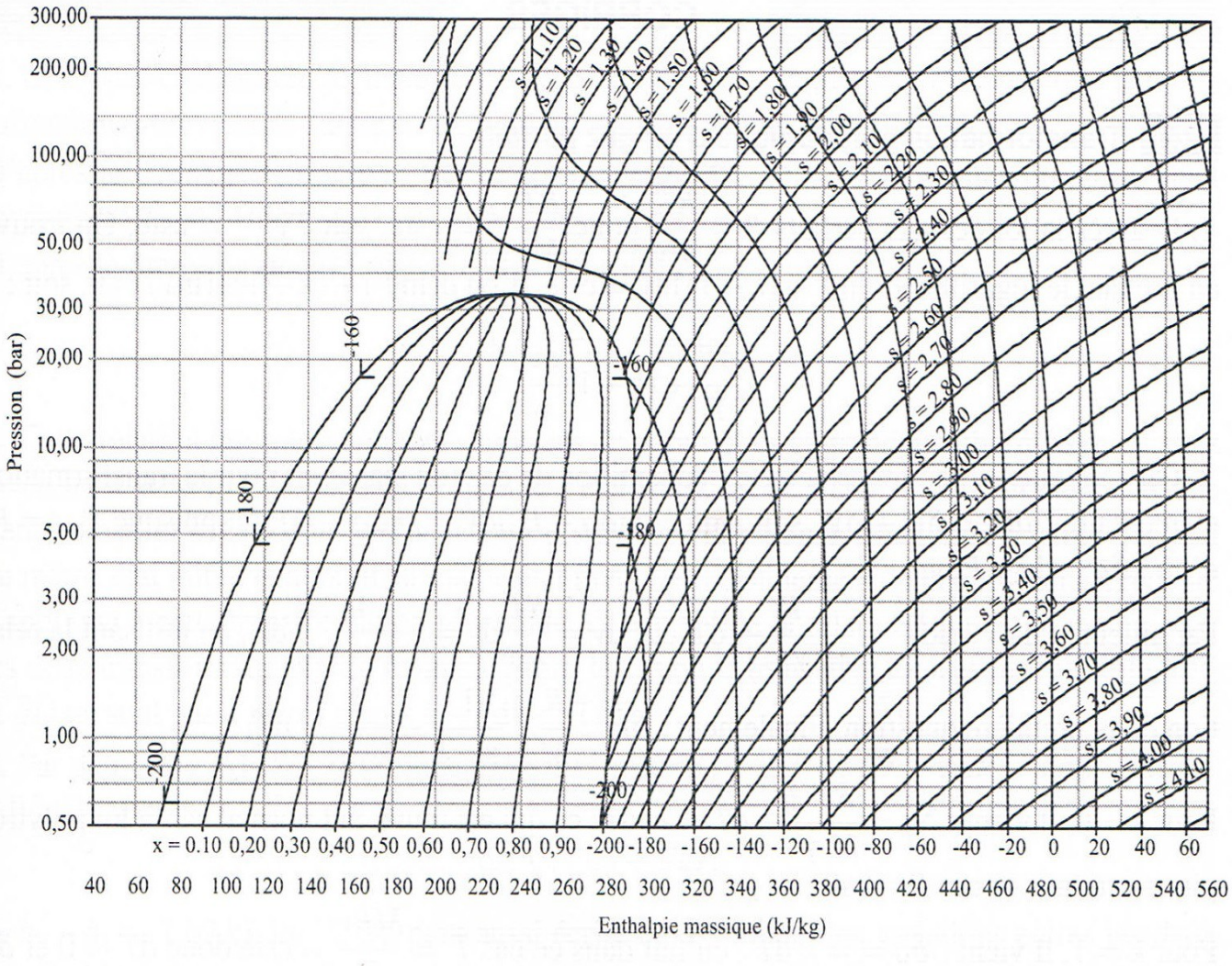
a- Exprimer h_4 en fonction de h_5 , h_6 et y .

b- Justifier qualitativement que le débit massique D'm dans la conduite 6 - 1 s'exprime en fonction du débit massique Dm dans la conduite 2-3 et de y sous la forme $D'_m=(1-y)D_m$. En déduire une relation liant h_1, h_2 , h_3, h_6 et y.

c- Montrer que $y=\dfrac{h_1-h_2}{h_1-h_5}$.

d-Calculer numériquement y puis h_3 et h_4. Placer les points 3 et 4 sur le diagramme

5- Calculer le travail de compression dépensé par kilogramme d'azote liquide produit. En déduire la puissance du compresseur lorsqu'on produit 50 kg par heure d'azote liquide.

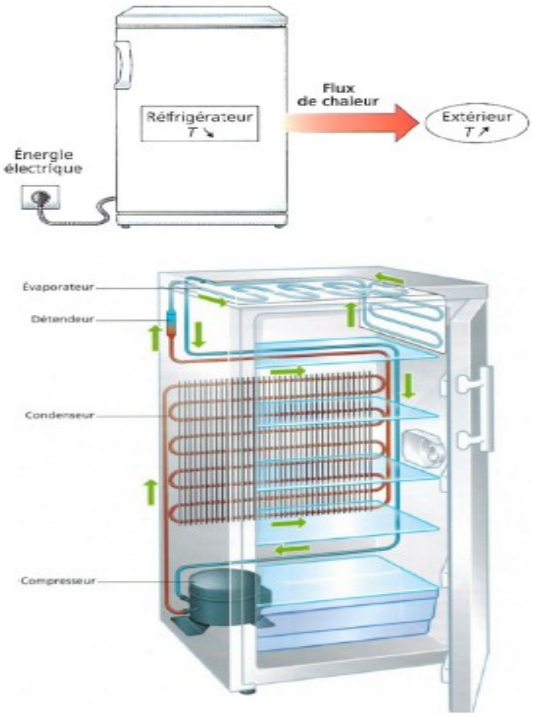


d-Calculer numériquement y puis h_3 et h_4. Placer les points 3 et 4 sur le diagramme
5- Calculer le travail de compression dépensé par kilogramme d'azote liquide produit. En déduire la puissance du compresseur lorsqu'on produit 50 kg par heure d'azote liquide.

Exercice 14:réfrigérateur à compresseur (ATS 2018)

Dans cette partie, on souhaite analyser le principe de fonctionnement du réfrigérateur à compresseur en s'appuyant d'extraits du livre « *La physique par les objets quotidiens* » de C. Ray et J.C. Poizat.

Le principe du réfrigérateur est simple : il assure un transfert de chaleur depuis ses compartiments internes, qui se refroidissent, vers la pièce où il se trouve, qui se réchauffe. Ce transfert consomme de l'énergie électrique. […]. Le compresseur comprime le fluide réfrigérant, alors froid et sous forme gazeuse, ce qui augmente sa température et sa pression. A la sortie du compresseur, le fluide est donc chaud et à haute pression. […]. Ce gaz chaud et à haute pression circule ensuite à travers le condenseur, où il cède de la chaleur par diffusion vers l'extérieur et subit un changement d'état : le gaz se transforme en un liquide chaud sous haute pression. La condensation (plus exactement la liquéfaction) peut se produire à température élevée car la pression est importante. […]. En poursuivant son chemin dans le circuit frigorifique, le liquide passe ensuite à travers un détendeur qui abaisse sa pression et sa température, ([…] la détente adiabatique s'effectue dans un fin capillaire). On obtient un mélange liquide-gaz à l'équilibre. Après cette chute de pression, le mélange liquide-gaz froid traverse l'évaporateur où il absorbe la chaleur de l'intérieur du réfrigérateur pour subir un second changement d'état : le liquide se met à bouillir, c'est-à-dire qu'il se vaporise. On obtient alors un gaz froid et à basse pression, qui repart dans le compresseur pour un nouveau cycle.

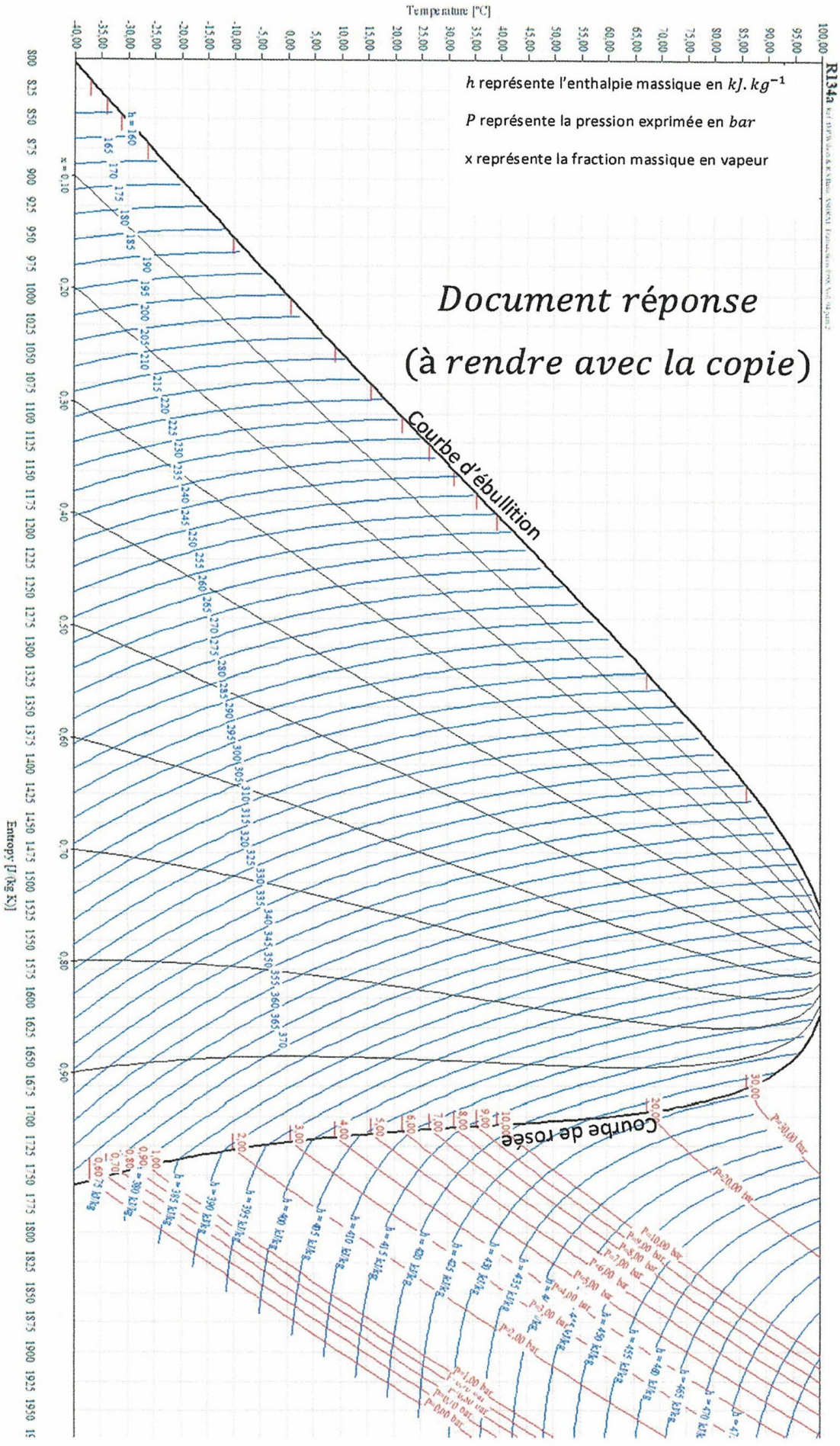


Nous allons étudier les différentes transformations que le fluide réfrigérant subit. L'écoulement du fluide réfrigérant est stationnaire, de débit massique D_m . Les variations d'énergies cinétique et potentielle du fluide seront négligées. Nous supposerons également que le fluide réfrigérant décrit le cycle suivant (on note $\{T_i , P_i\}$ le couple température-pression relatif à l'état i du fluide) :
→ Avant d'entrer dans le compresseur, le fluide est un gaz surchauffé (état A $\{T_A , P_A\}$). Le compresseur impose une compression adiabatique et irréversible. Le fluide reste à l'état gazeux (état B $\{T_B , P_B\}$).
→ Le fluide circule ensuite dans le condenseur où il opère un refroidissement isobare puis une liquéfaction complète isobare (et donc isotherme) à la pression P_B . On obtient un liquide saturant (état C $\{T_C , P_C\}$).
→ Le liquide subit une détente de type Joule-Thomson faisant apparaître un mélange diphasé après avoir traversé le détendeur (état D $\{T_D , P_D\}$).
→ Le fluide pénètre dans l'évaporateur et évolue de manière isobare jusqu'à l'état A.

On prendra les valeurs suivantes : $P_A = 2$ bar, $P_B = 7$ bar, $T_A = 5$ °C, $T_B = 55$ °C et $D_m = 10^{-2}$ kg.s^{-1} · Une tolérance de ±2 kJ. kg^{-1} sur la lecture de l'enthalpie massique sera acceptée. Une tolérance de ±1 °C sur la lecture des températures sera acceptée.

1- Rappeler , en tenant compte de nos hypothèses de travail, le premier principe de la thermodynamique appliqué à un fluide en écoulement dans une conduite, recevant une puissance thermique P_{th} et une puissance mécanique P_m (mise en jeu par les éventuelles parties mobiles d'une machine présente dans la conduite) avec h_e et h_s les enthalpies massiques du fluide à l'entrée et à la sortie de la conduite .
2- Repérer sur le diagramme entropique fourni en document-réponse les domaines liquide, diphasique et gazeux.
3- Reporter la position des points A, B, C et D sur le document-réponse fourni en annexe .
4- Donner, par lecture sur le diagramme entropique, la température T_l de liquéfaction du fluide réfrigérant observée pour le cycle étudié.
5- Donner, par lecture sur le diagramme entropique, la température T_v de vaporisation du fluide réfrigérant observée pour le cycle étudié.
6- Exprimer puis calculer la puissance $P_{th,2}$ reçue par le fluide pendant la transformation menant de l'état D à l'état A.
7- Exprimer puis calculer la puissance P_m reçue par le fluide pendant la transformation menant de l'état A à l'état B.
8- Exprimer puis calculer la puissance $P_{th,1}$ reçue par le fluide pendant la transformation menant de l'état B à l'état C.
9- Les résultats précédents, aux incertitudes de lecture près, permettent d'écrire $P_m = -(P_{th,1} + P_{th,2})$. Commenter

cette relation.
10- En déduire l'expression puis une estimation de la valeur du coefficient de performance COP_{vrai} (un seul chiffre significatif sera accepté pour la valeur de COP_{vrai} ( ).
11- Les résultats précédents impliquent que $COP_{vrai} < COP_c$ où COP_C est le coefficient de performance de Carnot . Interpréter ce résultat.
12- Lors d'un processus adiabatique, on peut déterminer, à l'aide du diagramme entropique, le travail massique w_f des forces de viscosité du fluide car $w_f = -\int_{Etat\ ini \rightarrow Etat\ final} T\,ds$. Estimer la puissance P_f associée à ces forces de viscosité lors de la compression (pour ce calcul la représentation de la transformation menant de l'état A à B sera linéarisée et donc assimilée à un simple segment reliant les points A et B). Commenter ce dernier résultat.


R134a
Temperature [°C]
Entropy [J/kg K]
h représente l'enthalpie massique en $kJ.kg^{-1}$
P représente la pression exprimée en bar
x représente la fraction massique en vapeur
Document réponse
(à rendre avec la copie)
Courbe d'ébullition
Courbe de rosée