TD T1 - Thermodynamique

Diagrammes d'état des fluides réels purs

Questions de cours

Pour apprendre le cours : vérifiez que vous savez répondre à chaque question.

1. Donner la définition du titre en liquide et du titre en vapeur pour un corps pur diphasé.

2. Donner et établir le théorème des moments.

3. Donner l'allure dans les diagrammes de Clapeyron, des frigoristes, de Mollier et du diagramme entropique de la courbe de saturation et des courbes iso.

Exercices de cours - Savoirs-Faire - Gymnastique

SF 1 - Exploiter un diagramme réel

Sur le diagramme des frigoristes du R22 (cf doc de cours), déterminer :

1. L'enthalpie de vaporisation sous 20 bar.
2. La pression saturante à 20°C.
3. L'entropie de vaporisation à 0°C.
4. L'état physique et l'enthalpie massique à 3 bar et 50°C.
5. Le transfert thermique massique échangé lors de la vaporisation du R22 à 50° *(on considère qu'on arrête la transformation une fois qu'on est à la vapeur juste saturante).*

Sur le diagramme de Mollier de l'eau (cf doc de cours) :
On considère une surchauffe de vapeur d'eau ($P_1 = 15$ bar, $T_1 = 325$°C. Cette vapeur d'eau subit une détente adiatique jusqu'à $P_2 = 0,1$ bar.

1. Représenter la transformation sur le diagramme.
2. Déterminer T_2 et x_2.
3. On appelle surchauffe la différence de température entre la vapeur surchauffée et la vapeur saturante sèche à la même pression. Déterminer la surchauffe initiale.

Gymnastique - Théorème des moments

On considère une citerne d'argon pressurisé, composé d'argon liquide et d'argon sous forme gazeuse. Dans ces conditions de stockage, le mélange a une masse $m = 180$ kg et un volume

$V = 100$ m^3.
Par ailleurs, dans ces conditions de stockage, l'argon liquide occupe un volume de 0,7 L.kg^{-1} et l'argon gazeux 592 L.kg^{-1}.

Exprimer la fraction massique w_l d'argon liquide et la fraction massique w_v de l'argon vapeur.

Reprendre la question si $m = 10$ kg.

Gymnastique - Table thermodynamique et théorème des moments

Un extrait incomplet de la table des grandeurs thermodynamiques relatives à l'eau à saturation est donné ci-dessous.
T est la température et P_S la pression de vapeur saturante à la température T. Les grandeurs notées « prime » ($'$) sont relatives au liquide saturant, et les grandeurs notées « seconde » ($''$) sont relatives à la vapeur saturante. l_{vap} et s_{vap} désignent respectivement l'enthalpie et l'entropie massique de vaporisation.
La dernière ligne correspond au point critique.

T °C	P_s kPa	v' $m^3 \cdot kg^{-1}$	v'' $m^3 \cdot kg^{-1}$	h' $kJ \cdot kg^{-1}$	h'' $kJ \cdot kg^{-1}$	l_{vap} $kJ \cdot kg^{-1}$	s' $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	s'' $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	s_{vap} $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
0,01	0,6117	0,001000	206,14	0,01	2500,9	2500,9	0,000	9,1556	9,1556
20	2,3392	0,001002	57,762	83,915	?	2453,5	0,2965	8,6661	8,3696
40	7,3851	0,001008	19,515	167,53	2573,5	2406,0	?	8,2556	7,6832
60	19,947	0,001017	7,6670	251,18	2608,8	2357,7	0,8313	?	?
80	47,416	0,001029	3,4053	335,02	2643,0	2308,0	1,0756	7,6111	6,5355
100	101,42	0,001043	1,6720	419,17	2675,6	2256,4	1,3071	7,3542	6,0470
200	1554,9	0,001157	0,1272	852,26	2792,0	1939,8	2,3305	6,4302	4,0997
374,14	22090	0,003106	?	?	2084,3	?	4,4070	?	0

Compléter le tableau.

Exercice phare

Exercice 1 - Chaudière d'une centrale à vapeur

En sortie de chaudière d'une centrale thermique à vapeur, de l'eau est portée à l'état de vapeur surchauffée à $P = 150$ bar, $T = 500$°C (état 1).

1. Donner son enthalpie massique en kJ/kg.

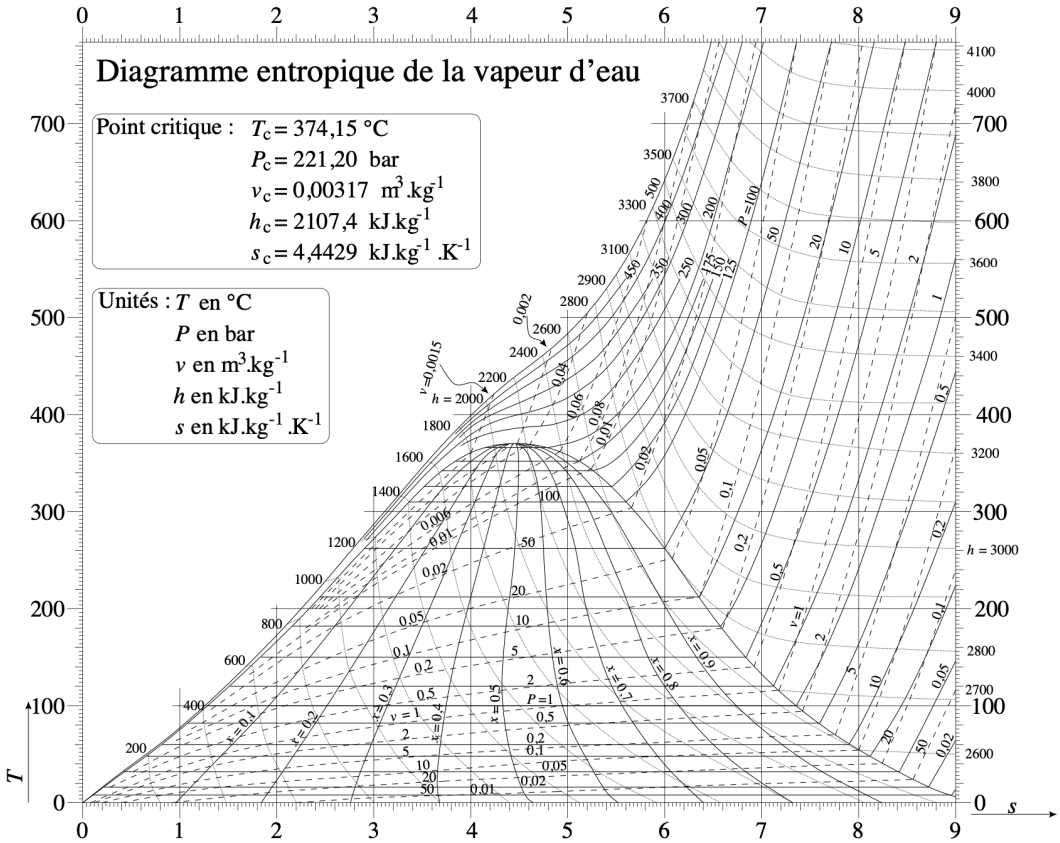
Cette vapeur entre désormais dans une turbine où elle subit une détente isentropique jusqu'à 0,05 bar (état 2).

2. Déterminer à quelle pression et quelle température la vapeur commencera à se condenser.
3. Caractériser l'état 2, en fin de détente : déterminer sa température, son titre, son volume massique approximatif. Commenter.

L'application du premier principe industriel permet de montrer que la puissance mécanique P_m de la turbine vérifie l'équation $P_m = D_m(h_2 - h_1)$ avec $D_m = 10$ kg/s le débit massique de l'écoulement.

4. Déterminer graphiquement l'enthalpie massique en sortie de turbine. En déduire la valeur de la puissance mécanique de la turbine. Commenter.

La figure ci-dessous est le diagramme entropique de l'eau.



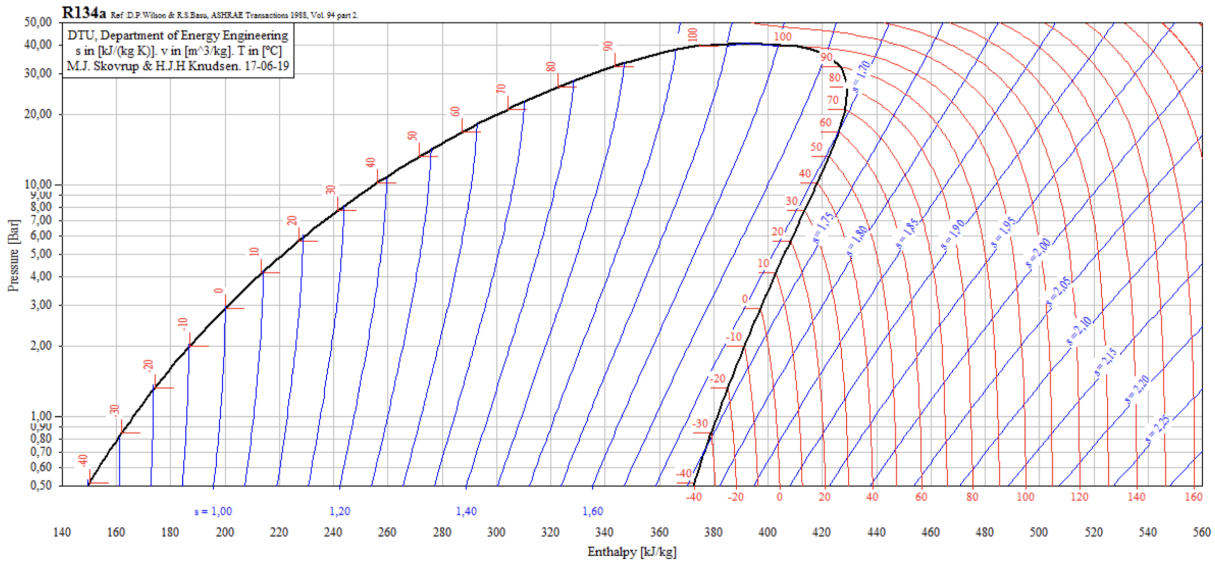
Exercices en plus

Exercice 2 - Lecture du diagramme des frigoristes

Exercice facile

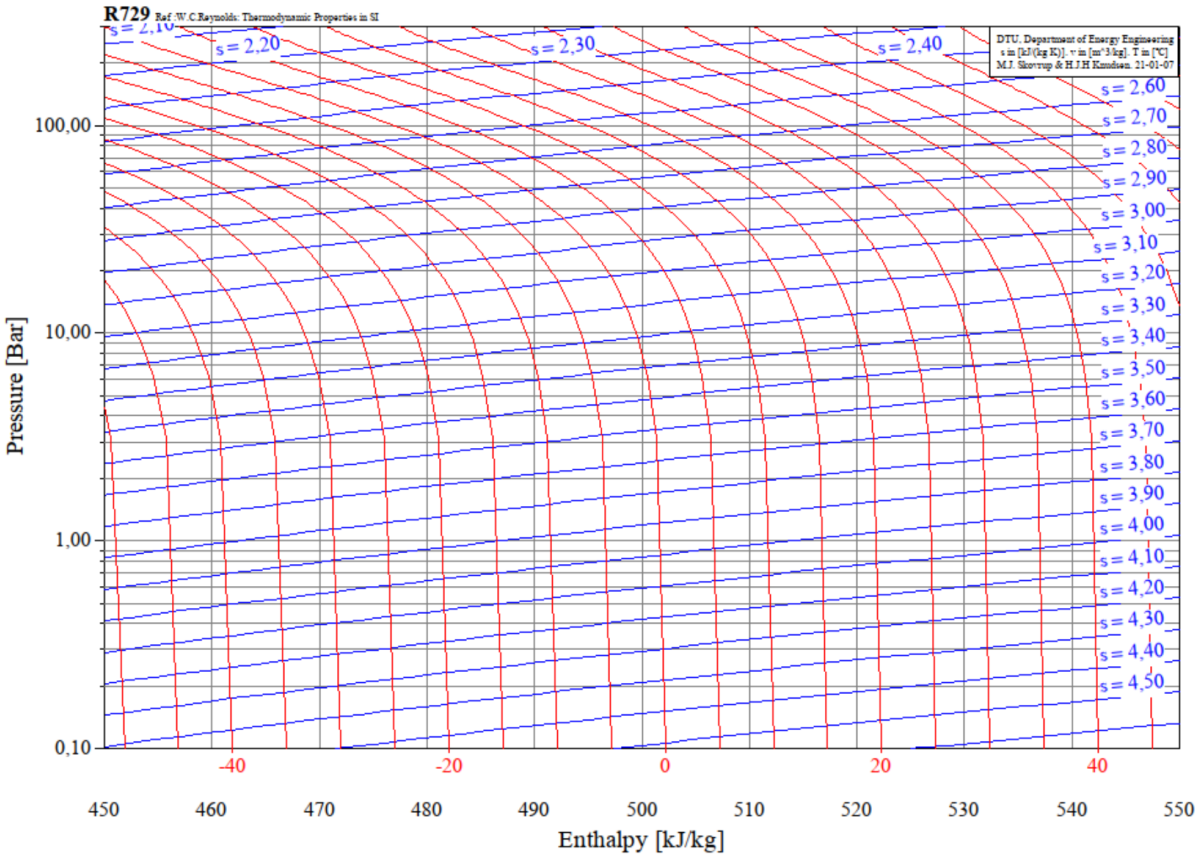
Du fluide réfrigérant R134a subit le cycle thermodynamique suivant. À la sortie du condenseur, le fluide est dans l'état, noté (1), de liquide saturant à la température $T = 40°C$. Il subit alors une détente isenthalpique dans un détendeur qui abaisse sa pression de 8 bar et l'amène à l'état noté (2). Il traverse, sans chute de pression, un évaporateur dans lequel il reçoit une grande quantité d'énergie, suffisante pour l'amener à sa température de vapeur saturante augmentée de +10°C qui représente l'état (3). La vapeur sèche est alors comprimée de façon isentropique jusqu'à atteindre l'isobare de départ au point (4).

1. Placer les états (1) à (4) sur le diagramme des frigoristes dont on reproduira l'allure au tableau.
2. Quelle est la température des points (2), (3) et (4) ?
3. Quelle est l'enthalpie massique du fluide au point (2), et des points correspondants au liquide et à la vapeur saturants ?
4. En déduire le titre de vapeur en (2).



Exercice 3 - Détendeur de plongée

Exercice très complet



L'air des bouteilles de plongée sous-marine est stocké sous forme de gaz comprimé, en équilibre thermique avec l'eau environnante supposée à 20°C. À l'aide d'un système complexe de membrane déformable et de ressort, un détendeur fait circuler l'air au travers d'un mince étranglement en lui faisant subir une détente isenthalpique et adiabatique. Pour la plongée, un détendeur primaire placé sur la bouteille assure une première détente de l'étage haute pression

(200 bar, point 1) vers l'étage moyenne pression (10 bar, point 2), où l'air retrouve l'équilibre thermique avec l'eau (point 3). Un second détendeur, placé au niveau de la bouche du plongeur, assure la détente vers la basse pression (1 bar, point 4). Le plongeur inhale environ 0,5 L d'air par inspiration.
Donnée : masse molaire de l'air 29 g /mol .

1. Représenter l'évolution subie par l'air sur le diagramme des frigoristes de l'air.
2. Montrer que la première détente s'accompagne d'une forte baisse de température. Qu'aurait donné le modèle du gaz parfait ? Quel aspect du diagramme permet d'anticiper que ce modèle n'est pas valable ?
3. En pratique, le plongeur ne ressent pas de sensation d'air froid lors de l'inspiration. Expliquer.
4. À quel point le modèle du gaz parfait est-il le mieux vérifié ? En raisonnant en ce point, déterminer la masse d'air inhalée à chaque inspiration.
5. En déduire le transfert thermique que reçoit cette masse d'air lors de son passage dans le tube séparant les deux détendeurs, puis l'entropie créée lors de la totalité du processus.

Exercice 4 - Détente isochore de l'eau

Exercice sans diagramme mais exploitation d'une table thermodynamique
Un récipient fermé et indéformable, de volume $V = 1,00$L, contient dans l'état initial I de la vapeur d'eau saturante à $T_I = 485$ K. On le met en contact avec un thermostat à température $T_0 = 373$ K. L'équilibre atteint est l'état F.

Donnée : extrait de la table de la vapeur saturante

		Liquide juste saturé $x_V = 0$			Vapeur saturante $x_V = 1$		
T	p	v_L	h_L	s_L	v_V	h_V	s_V
K	bar	m^3.kg^{-1}	kJ.kg^{-1}	kJ.kg^{-1}.K^{-1}	m^3.kg^{-1}	kJ.kg^{-1}	kJ.kg^{-1}.K^{-1}
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. Déterminer la masse d'eau contenue dans le récipient.
2. Montrer que l'état final est un mélange diphasé. Calculer son titre en vapeur.
3. Quelles sont les caractéristiques de la transformation ? Déterminer la chaleur échangée par l'eau.
4. Calculer l'entropie dans les états I et F. Conclure sur le caractère réversible ou non de la transformation étudiée.

Exercice pour aller plus loin ⋆⋆⋆

Exercice 5 - Condensation de la vapeur dans un congélateur

Extrait Banque PT 2013, pas classique
On s'intéresse à la puissance nécessaire au fonctionnement d'un congélateur en régime permanent, en été, alors qu'il est à moitié rempli en volume par une masse $m = 20$ kg d'aliments. Dans le congélateur la température intérieure est maintenue à -10°C, été comme hiver. On considèrera que la température extérieure est 20°C en hiver et 30°C en été.

On commence par évaluer la puissance perdue due au passage à l'état solide de la vapeur d'eau contenue dans l'air humide à l'intérieur du congélateur lorsqu'on l'ouvre et le referme (condensation de la vapeur d'eau). On considère que, lors d'une ouverture-fermeture, tout l'air du congélateur est renouvelé. Il faut aussi tenir compte de l'étanchéité imparfaite des compartiments. Pour cela, on estime que tout se passe comme si l'on ouvrait 40 fois par demi-journée (12h) le congélateur.
La quantité de vapeur d'eau présente dans l'air peut se caractériser par son humidité relative, H_R, rapport de la pression partielle de l'eau à sa pression de vapeur saturante à la même température, ou par son humidité absolue, H_A, rapport de la masse de vapeur d'eau exprimée en gramme présente dans un volume donné à la masse d'air sec de ce volume exprimé en kilogramme.

Le diagramme de l'air humide est fourni dans la figure 3 : il porte en ordonnée H_A, et en abscisse les températures. Les courbes obliques donnent la valeur de H_R. La courbe limitant le graphique à gauche correspond à la quantité maximale de vapeur d'eau que l'air peut contenir sans qu'elle ne se condense.
Lorsque l'air contient cette quantité de vapeur, on dit qu'il est saturé en humidité ou que son hygrométrie est de 100 %.

1. Sachant que le taux d'humidité relative moyen est de 60 % en été, calculer H_A à partir des données fournies en fin d'énoncé. Vérifier cette valeur sur le diagramme de l'air humide fourni en figure 3.

2. Sur ce même diagramme déterminer la température du point de rosée, température en dessous de laquelle la vapeur d'eau présente dans l'air humide se condense.

3. Calculer la perte de puissance, P_{eau}, que représente la condensation totale à l'état solide de la vapeur d'eau présente dans l'air ambiant l'été ? On fera le calcul en prenant la valeur de la chaleur latente de vaporisation de l'eau à 0°C. (On rappelle que le compartiment du congélateur est à moitié rempli).

Données :

- ▷ dimensions du congélateur : 20 cm × 50 cm × 50 cm ;
- ▷ masses molaires : $M_{eau} = 18$ g/mol et $M_{air} = 29$ g/mol ;
- ▷ pression atmosphérique $P_{atm} = 1013$ mbar ;
- ▷ pression saturante de l'eau à 30°C : $P_{sat} = 4000$ Pa ;
- ▷ capacité thermique massique de l'eau vapeur : $c_{vap} = 1410$ J.kg^{-1}.K^{-1} ;
- ▷ capacité thermique massique de l'eau liquide : $c_l = 4200$ J.kg^{-1}.K^{-1} ;
- ▷ capacité thermique massique de la glace : $c_s = 2100$ J.kg^{-1}.K^{-1} ;
- ▷ chaleur latente massique de vaporisation de l'eau à 0°C : $l_v = 2500$ kJ/kg ;
- ▷ chaleur latente massique de fusion de la glace à 0°C : $l_f = 300$ kJ/kg

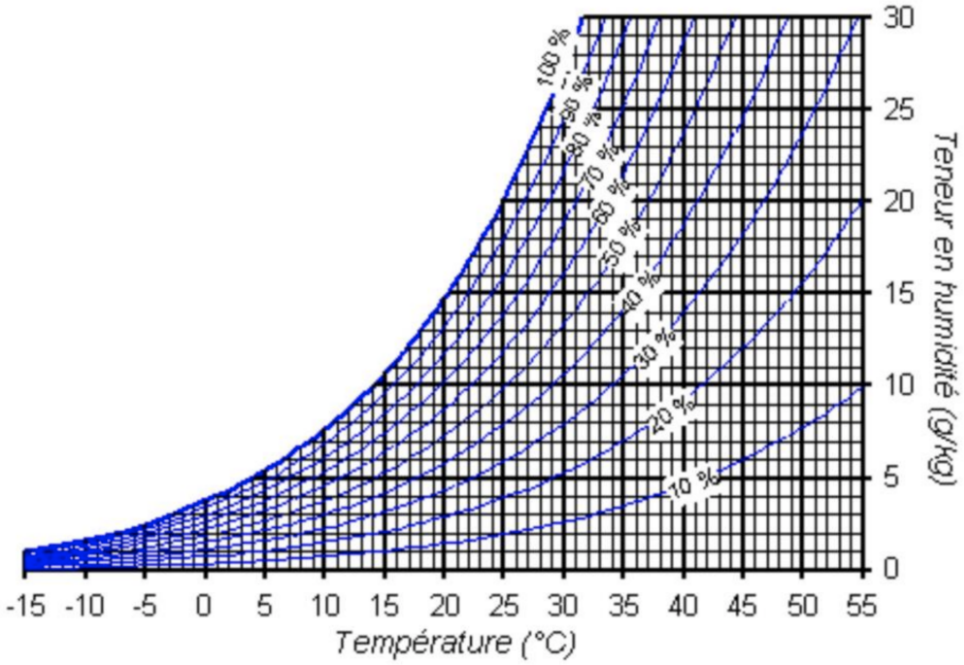


Figure 3 – Diagramme de l'air humide.