Machines Thermiques – Diagrammes (logP,h) et (T,s)

1. Diagrammes (logP,h)

1.1. Présentation du diagramme monophasé de l'air

1.2. Application à l'étude d'un compresseur

1.3. Diagramme diphasé : application au stockage du GPL

2. Diagrammes (logP,h) et (T,S) : étude d'un congélateur

2.1. Présentation de la machine frigorifique

2.2. Etude l'aide du diagramme diphasé (logP,h)

2.3. Etude à l'aide du diagramme diphasé (T,S)

Intro : La donnée de ces diagrammes permet d'étudier des dispositifs concrets à l'aide de modèles réalistes de fluide. Ils permettent en outre de déterminer graphiquement des quantités que l'on devrait sinon obtenir via de longs calculs.

1. Diagrammes (logP,h)

Ce diagramme est utilisé pour visualiser aisément les propriétés d'un fluide et calculer les échanges énergétiques dans les machines. Il est appelé « diagramme enthalpique » ou diagramme des frigoristes, et représente ln(P) en fonction de l'enthalpie massique. On peut trouver des diagrammes monophasés ou diphasés.

1.1. Présentation du diagramme monophasé de l'air

La première figure à la fin du poly donne le diagramme de l'air entre $0{,}1$ et $200\ bars$.

Le diagramme comporte 3 réseaux de courbes :

- Des isentropiques, donnant les entropies massiques en $kJ.K^{-1}.kg^{-1}$;
- Des isothermes, donnant les températures en °C ;
- Des isochores donnant le volume massique en $m^3.kg^{-1}$

On rappelle que la masse molaire de l'air vaut environ M = 29 g.mol^{-1}.
On convient de définir les conditions ambiantes par les valeurs T_a = 20°C, P_a = 1 bar (point A sur le diagramme).

a) Quel est le volume massique au point A ? Le volume molaire ?
b) L'air vérifie-t-il l'équation d'état d'un gaz parfait dans les conditions ambiantes ?
c) Sur le diagramme (P, h), les isothermes sont-elles conformes aux propriétés d'un gaz parfait ? Qu'en est-il au voisinage du point A ?
d) Mesurer la capacité thermique massique à pression constante c_p au voisinage du point A. En déduire le coefficient γ en adoptant le modèle du gaz parfait.
e) En considérant l'isentropique s = 4 kJ.K^{-1}.kg^{-1}, valider ou invalider la loi de Laplace
f) Conclure sur l'intérêt du modèle de gaz parfait pour l'air dans les conditions ambiantes.

1.2. Application à l'étude d'un compresseur

On utilise le même diagramme que précédemment. *On souhaite comprimer de l'air initialement à t_1 = 20°C et $P_1 = 1\ bar$, jusqu'à P_2 = 200 bars,* ***sans dépasser 200°C***.
On utilise pour cela un compresseur à piston, modélisé par une machine adiabatique réversible, fournissant au fluide un travail massique utile w_u. On néglige toute variation d'énergie cinétique au cours des transformations.

a) En régime stationnaire, comment s'écrit le premier principe entre l'entrée et la sortie du compresseur ?
b) Quelle est la pression maximale atteinte par une étape de compression adiabatique réversible ?
c) La compression souhaitée est-elle possible en une seule étape ?
d) Quel est le travail massique utile que le compresseur devrait fournir pour parvenir à cette pression maximale ?
e) On réalise des compressions successives pour atteindre les 200 bars. Entre chaque compression, on réalise un refroidissement isobare pour revenir à la température ambiante. Combien doit-on réaliser de compressions successives pour atteindre 200 bars ?
f) Quel est alors le travail massique utile que doit fournir le compresseur ?
g) Aucune transformation réelle n'est réversible. Le travail massique utile calculé ci-dessus a-t-il été surestimé ou sous-estimé ? Justifier la réponse.

1.3. Diagramme diphasé : application au stockage du GPL

Le GPL (gaz de pétrole liquéfié) est un mélange de propane et de butane utilisé comme carburant par certains véhicules. Le GPL est stocké sous la forme d'un mélange liquide-gaz dans le réservoir.
Pour simplifier, nous allons assimiler le GPL à du propane pur dont on donne le diagramme LnP,h sur la 2e figure à la fin du polycopié.
Le diagramme comporte 4 réseaux de courbes :

- Des isentropiques
- Des isothermes
- Des isochores
- Des iso-titre, donnant le titre massique en vapeur

a) Identifier sur le diagramme la courbe de saturation, formée des courbes d'ébullition et de rosée
b) Identifier les zones monophasées et diphasées
c) Identifier le point critique
d) Vérifier que le théorème des moments est vérifié (comme dans le diagramme de Clapeyron)

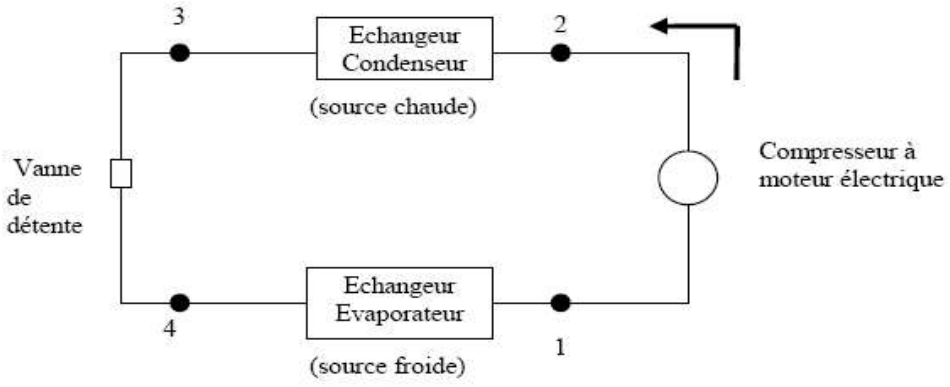
Le GPL est initialement stocké à 20°C avec le titre en vapeur x = 0, 2.

a) Quelle pression règne dans le réservoir ? Pour un réservoir de 50 L, quelle masse de propane est stockée ?
b) Le volume massique du liquide saturant vaut $2\ 10^{-3}\ m^3 kg^{-1}$. Quelle est la capacité max du réservoir en masse ?
c) Le réservoir est éprouvé pour résister à une pression de 30 bars. En cas d'incendie ou d'échauffement accidentel, préciser la transformation subie par le fluide. A quelle température y a-t-il risque d'explosion ?
d) Entre la sortie du réservoir et les injecteurs du moteur, le GPL circule dans un vapo-détendeur où il subit une détente isenthalpique. Comment évoluent la température et la composition du mélange liquide-vapeur lors de cette détente ?

2. Diagrammes (logP,h) et (T,S) : étude d'un congélateur

2.1. Présentation de la machine frigorifique

La machine frigorifique est constituée de quatre organes, représentés sur la figure suivante



Le *fluide frigorigène* circulant entre les différents organes est le 1,1,1,2-Tétrafluoroéthane, noté « *R134a* ».
Les transformations subies par ce fluide au cours d'un cycle sont les suivantes :

- $1 \rightarrow 2$: *compression isentropique* du fluide par le compresseur ;
- $2 \rightarrow 3$: *échange thermique isobare* à haute pression P_{hp} dans le condenseur ;
- $3 \rightarrow 4$: *détente adiabatique* dans le détendeur ;
- $4 \rightarrow 1$: *échange thermique isobare* à basse pression P_{bp} dans l'évaporateur.

Il n'y a pas de pièces mobiles en contact avec le fluide, sauf dans le compresseur.
On néglige les variations d'énergie cinétique et d'énergie potentielle de pesanteur.

Autres données :

- $T_1 = -20\,°C$;
- $P_2 = 10\ bars$.
- dans l'état 1 le fluide est à l'état de vapeur saturante
- dans l'état 3, le fluide est à l'état de liquide saturant

Le principe d'une machine frigorifique ditherme est le suivant : « Un fluide frigorigène circule entre les différents organes de la machine. Mis en mouvement par le compresseur, ce fluide refroidit la source froide et réchauffe la source chaude ».

a) Donner et justifier les signes des quantités algébriques suivantes : w_{12}, q_{23} et q_{41}.
b) Lors de la traversée du condenseur, le fluide frigorigène a-t-il une température supérieure ou inférieure à celle de la source chaude ? Lors de la traversée de l'évaporateur, le fluide a-t-il une température supérieure ou inférieure à celle de la source froide ?
c) Si l'on considère le réfrigérateur que l'on possède à la maison, où se situe la source froide ? Et la source chaude ?

2.2. Etude l'aide du diagramme diphasé (logP,h)

Le diagramme est donnée en figure 3 à la fin du polycopié.

a) Placer les états 1, 2, 3 et 4 sur le diagramme et donner les caractéristiques de chaque état. Tracer le cycle parcouru par le fluide.
b) Calculer les transferts thermiques q_{23} et q_{41} échangés resp. avec la source chaude et la source froide
c) Calculer le travail utile échangé dans le compresseur.
d) Définir et calculer l'efficacité du cycle.
e) Quelle serait l'efficacité d'un cycle de Carnot fonctionnant entre les températures extrêmes du cycle ?
f) Définir « la puissance utile » du compresseur et la « puissance frigorifique » du frigo

2.3. Etude à l'aide du diagramme diphasé (T,S)

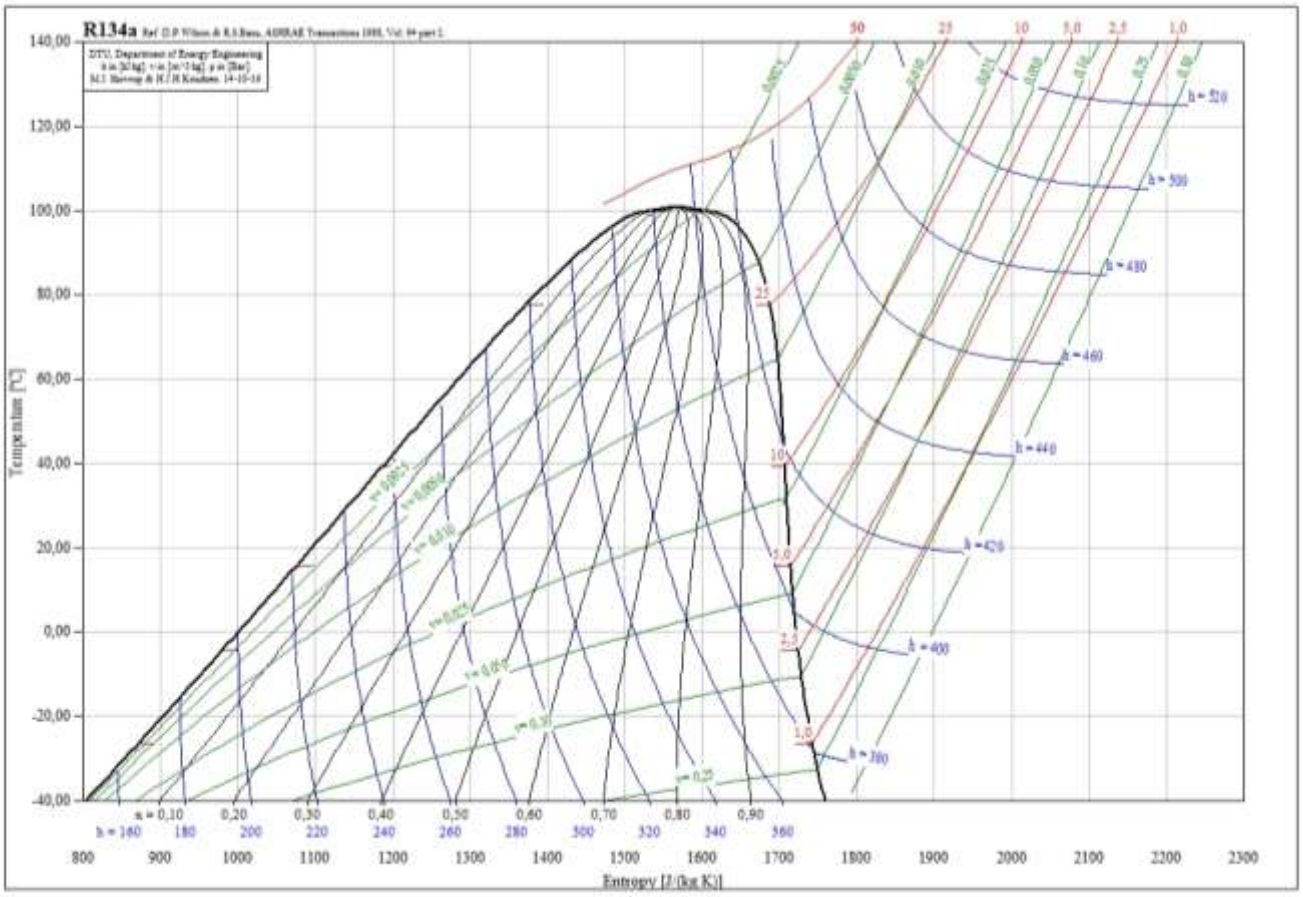
Ce diagramme est appelé « diagramme entropique ». Il permet les mêmes études que le diagramme (LogP,h).
Il permet en particulier de lire aisément les variations d'entropie, ainsi que les transferts thermiques réversibles.
En effet, sur un tel transfert : $\delta q_{rev} = Tds \Longrightarrow q_{rev} = \int T.ds$
q_{rev} représente donc l'aire sous la courbe représentant la transformation.

Mais ce type de transformation n'est pas réaliste, puisque un transfert thermique se fait nécessairement entre deux corps de températures différentes, et que cet échange est source d'irréversibilité.

Par contre, la 2e identité thermodynamique (vue en chimie) : $dh = Tds + vdP$, montre que pour une transformation isobare, sans travail utile, alors $q = \int T.ds$ et ce même si la transformation est réaliste, i.e. irréversible.

NB : on notera que les **isobares du liquide sont confondues avec la courbe de vaporisation** (car l'entropie des PCII ne dépend pas de la pression mais uniquement de la température).

On donne le diagramme T,S du tetrafluoroéthane ci-dessous :

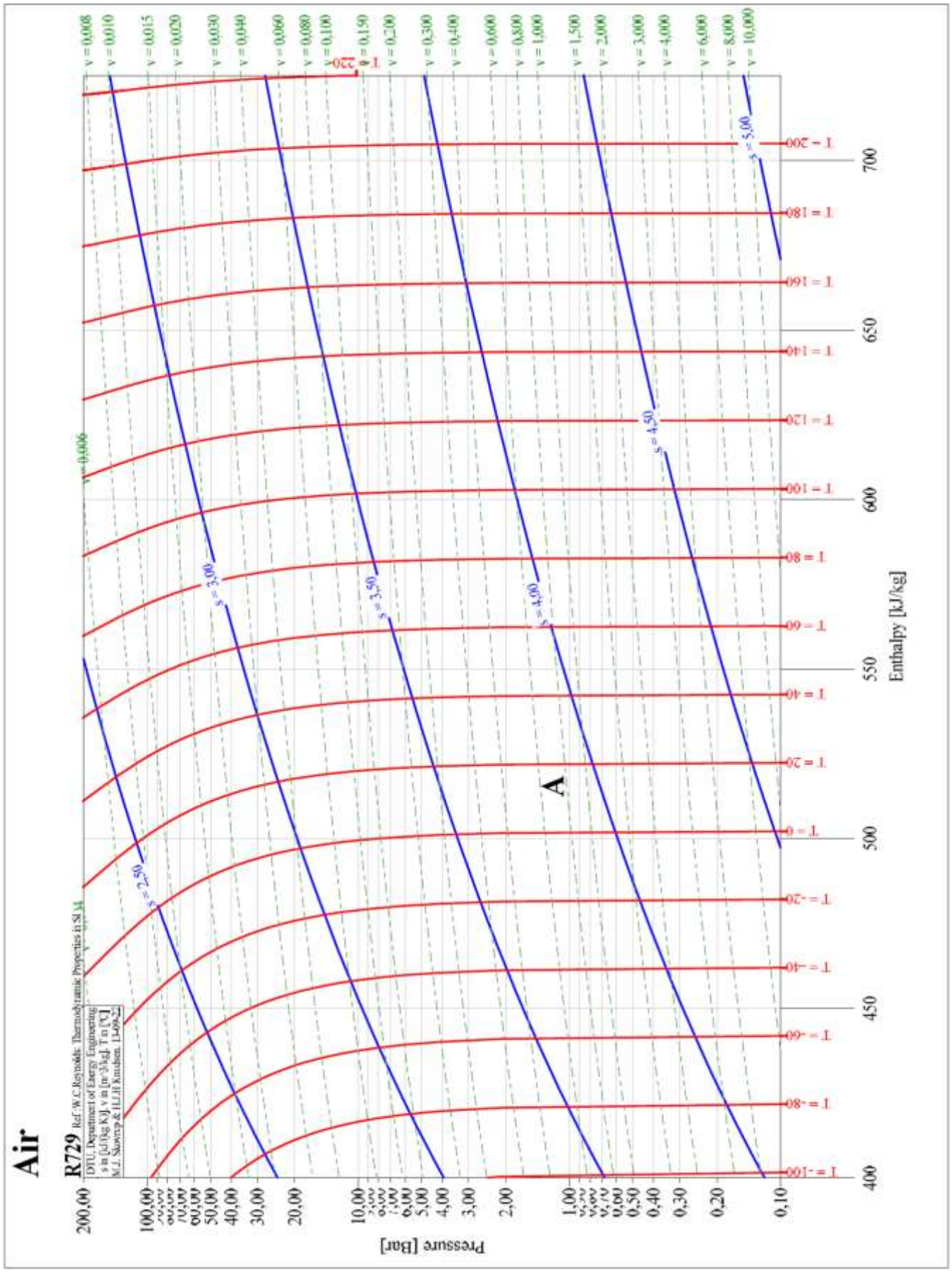


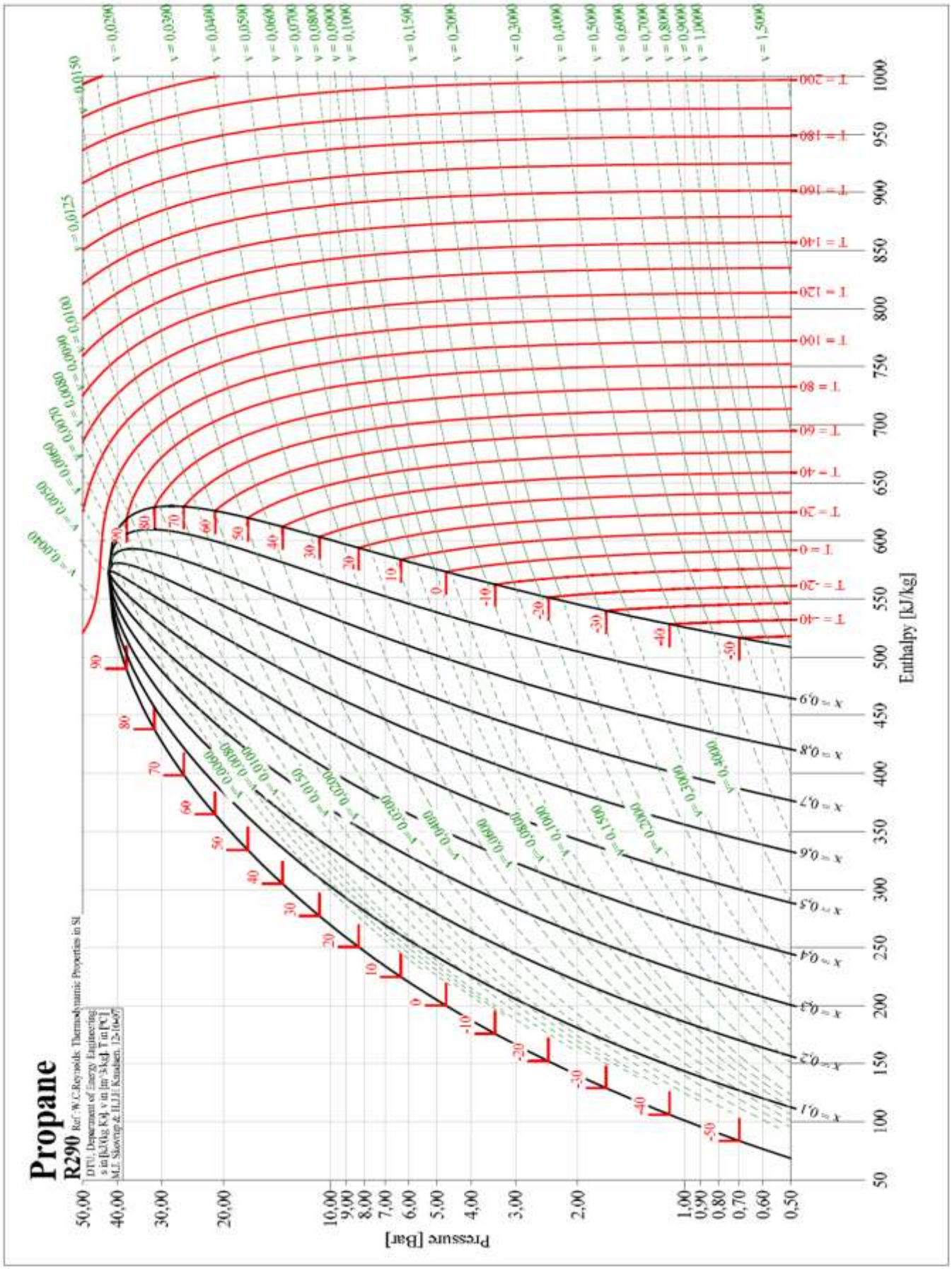
a) Identifier sur le diagramme la courbe de saturation, formée des courbes d'ébullition et de rosée
b) Identifier les zones monophasées et diphasées
c) Identifier le point critique
d) Vérifier que le théorème des moments est vérifié (comme dans le diagramme de Clapeyron)

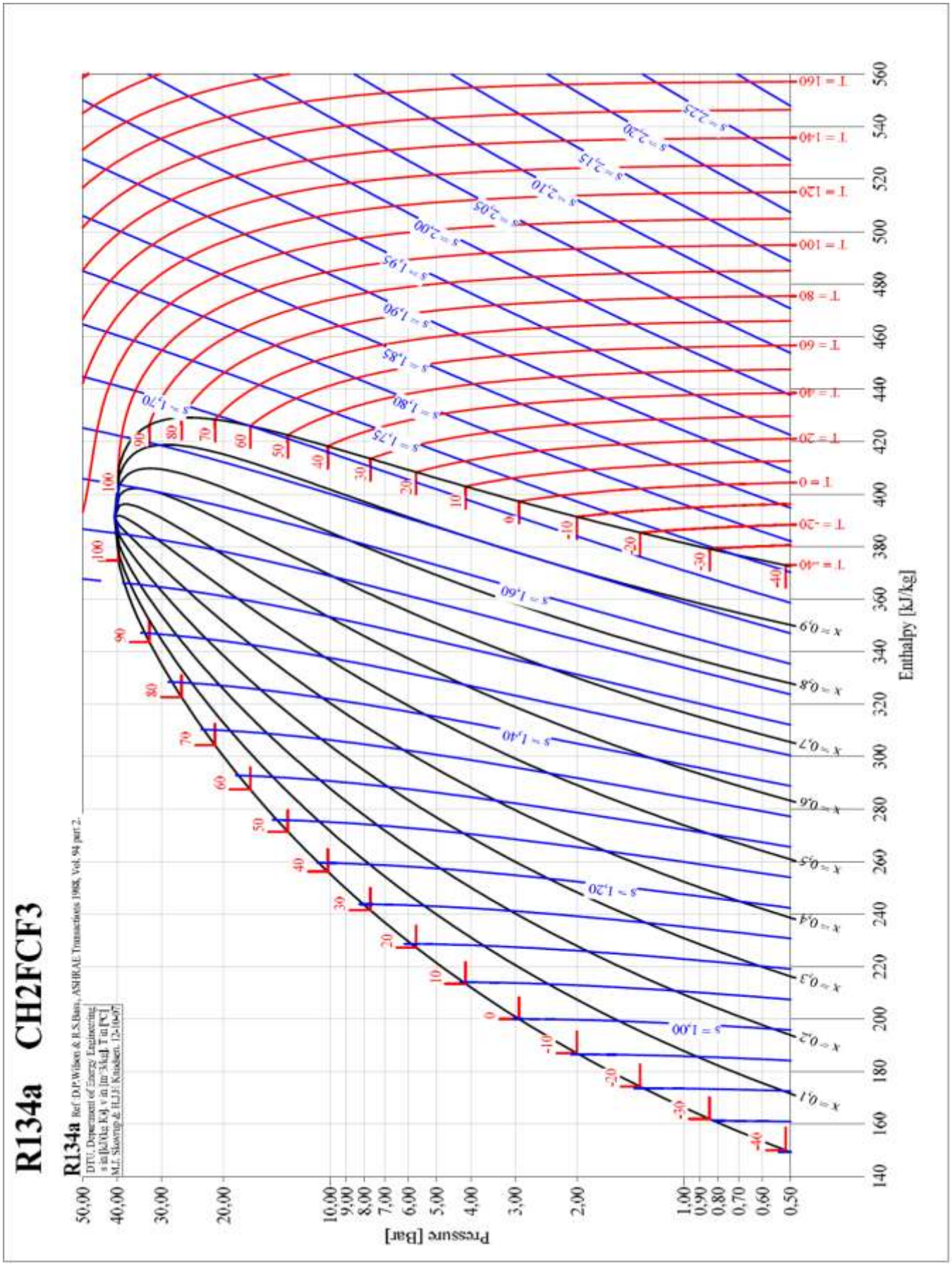
Le diagramme comporte 4 réseaux de courbes :

- Des isenthalpiques, pour lesquelles les enthalpies massiques sont en $kJ.kg^{-1}$;
- Des isobares, pour lesquelles les pressions sont en bars,
- Des iso-titre, donnant le titre massique en vapeur.
- Des isochores, donnant le volume massique en $m^3.kg^{-1}$.

Reprendre l'étude du congélateur précédent à l'aide du diagramme T,s.


Air
R729
Ref: W.C.Reynolds: Thermodynamic Properties in SI
DTU, Department of Energy Engineering
s in [kJ/(kg K)] v in [m^3/kg] T in [°C]
M.J. Skovrup & H.J.H. Knudsen, 1.4.09-2
A
Pressure [Bar]
Enthalpy [kJ/kg]
200,00
100,00
50,00
40,00
30,00
20,00
10,00
5,00
4,00
3,00
2,00
1,00
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
400
450
500
550
600
650
700


Propane
R290 Ref: W.C.Reynolds: Thermodynamic Properties in SI
DTU, Department of Energy Engineering
s in [kJ/(kg K)] v in [m^3/kg] T in [°C]
M.E. Skovrup & H.J.H. Knudsen, 12-10-07
Pressure [Bar]
Enthalpy [kJ/kg]


R134a CH2FCF3
R134a Ref: D.P.Wilson & R.S.Basu, ASHRAE Transactions 1988, Vol. 94, part 2.
DTU, Department of Energy Engineering
s in [kJ/(kg K)], v in [m^3/kg], T in [°C]
M.F. Skovrup & H.J.F. Knudsen, 12-10-07
Pressure [Bar]
Enthalpy [kJ/kg]