

# Diagrammes d'état des fluides réels purs

## Extrait du programme

L'étude 1.3 des « Diagrammes d'état des fluides réels purs » est l'occasion de réinvestir les notions de thermodynamique différentielle. On y exploite également des diagrammes de fluides réels afin d'habituer les étudiants à ne pas se limiter à des situations « idéales » (gaz parfait, etc.).

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>3. Diagrammes d'état des fluides réels purs.</b>	
Enthalpie et entropie de changement d'état.	Citer l'ordre de grandeur de l'enthalpie massique de vaporisation de l'eau. Calculer l'énergie récupérable par transfert thermique lors d'une liquéfaction isobare. Relier l'entropie de changement d'état à l'enthalpie de changement d'état
Titre massique.	Utiliser la règle des moments.
Diagrammes de Clapeyron, entropique et des frigoristes.	Représenter, pour le diagramme de Clapeyron, l'allure des courbes isothermes et isentropiques. Exploiter un diagramme fourni pour déterminer une grandeur physique.

# Sommaire

<b>EXTRAIT DU PROGRAMME</b> .....	<b>1</b>
<b>SOMMAIRE</b> .....	<b>2</b>
<b>1 RAPPELS SUR LES TRANSITIONS DE PHASE D'UN CORPS PUR</b> .....	<b>3</b>
1.1 ETATS PHYSIQUES D'UN CORPS PUR .....	3
1.2 DIAGRAMME DE PHASES (P, T).....	3
<b>2 EQUILIBRE LIQUIDE-VAPEUR</b> .....	<b>4</b>
2.1 SYSTEME .....	4
2.2 ENTHALPIE DE VAPORISATION.....	5
2.3 ENTROPIE DE VAPORISATION .....	7
2.4 TITRE MASSIQUE EN VAPEUR .....	8
2.5 REGLE DES MOMENTS .....	8
<b>3 DIAGRAMME DE CLAPEYRON (P,V)</b> .....	<b>10</b>
3.1 PRESENTATION .....	10
3.2 EQUATIONS DES COURBES DANS LA LIMITE DU GAZ PARFAIT ET DU LIQUIDE INCOMPRESSIBLE ET INDILATABLE .....	11
3.3 REGLE DES SEGMENTS .....	13
<b>4 DIAGRAMME DES FRIGORISTES (P,H)</b> .....	<b>14</b>
4.1 PRESENTATION .....	14
4.2 EQUATIONS DES ISOTHERMES DANS LA LIMITE DU GAZ PARFAIT ET DU LIQUIDE INCOMPRESSIBLE ET INDILATABLE .....	15
4.3 REGLE DES SEGMENTS .....	16
<b>5 DIAGRAMME ENTROPIQUE (T,S)</b> .....	<b>17</b>
5.1 PRESENTATION .....	17
5.2 EQUATIONS DES ISOBARES DANS LA LIMITE DU GAZ PARFAIT ET DU LIQUIDE INCOMPRESSIBLE ET INDILATABLE .....	18
5.3 REGLE DES SEGMENTS .....	19
<b>6 APPLICATIONS DES DIAGRAMMES AUX FLUIDES REELS : ETUDE D'UNE MACHINE FRIGORIFIQUE</b> .....	<b>20</b>
<b>7 QUESTIONS DE COURS</b> .....	<b>23</b>
<b>8 EXERCICES TYPE ORAL</b> .....	<b>24</b>
8.1 MELANGE EAU-GLACE.....	24
8.2 DETERMINATION DE L'ETAT DU FLUIDE .....	24
8.3 DETERMINATION DE L'ETAT D'UNE VAPEUR .....	24
8.4 DETENTE ISENTROPIQUE .....	24
8.5 MACHINE A VAPEUR : CYCLE DE RANKINE .....	25
8.6 EXTRAIT CENTRALE TSI 2016.....	28
<b>9 DM2 POUR LE 18/09/2023</b> .....	<b>31</b>

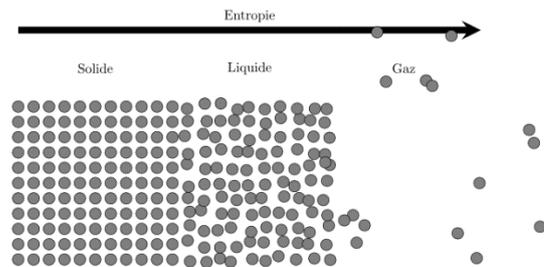
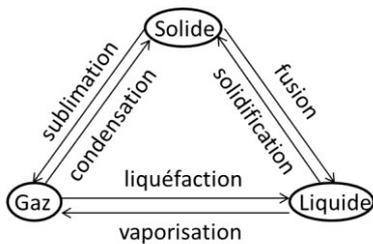
# 1 Rappels sur les transitions de phase d'un corps pur

## 1.1 Etats physiques d'un corps pur

On distingue 3 états physiques différents d'un corps pur :

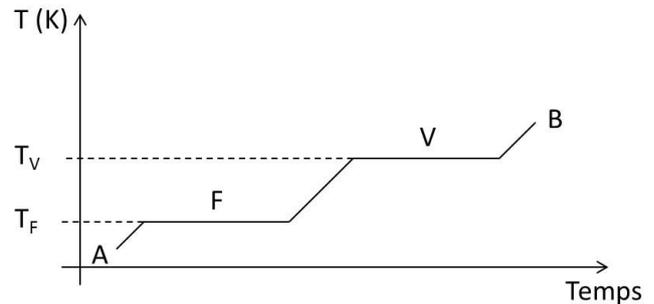
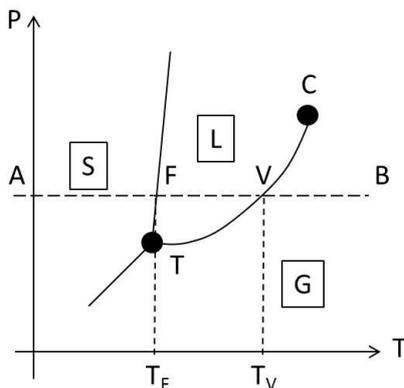
- **solide** : les atomes ou molécules occupent une place déterminée, un ordre existe.
- **liquide** : les atomes ou molécules se déplacent les uns par rapport aux autres. Cet état est qualifié de condensé car la distance entre atomes ou molécules voisins est faible. Sa densité est de l'ordre de grandeur du solide.
- **gaz** : les distances entre particules sont beaucoup plus grandes, c'est l'état le moins ordonné.

Terminologie pour les changements d'état :



## 1.2 Diagramme de phases (P, T)

Pour un corps pur soumis aux seules forces de pression, il suffit de la donnée de deux paramètres intensifs pour caractériser un état d'équilibre. Ces paramètres peuvent être la pression,  $P$ , et la température,  $T$ .



Les **changements d'état** se font à **température constante**. Lors d'un changement d'état si la température est fixée, alors la pression l'est aussi. Un de ces deux paramètres intensifs suffit à décrire l'état d'équilibre.

## 2 Equilibre liquide-vapeur

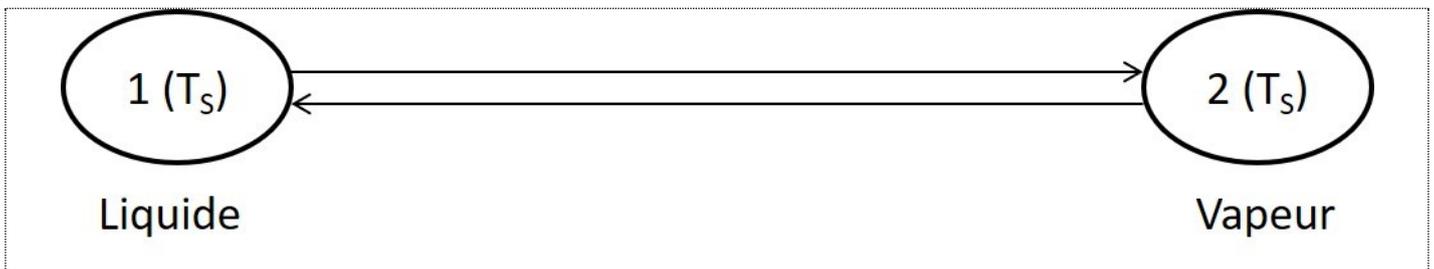
Nous allons nous intéresser en particulier à un type de changement d'état :

- le passage de liquide à vapeur : .....
- et inversement le passage de vapeur à liquide : .....

et tenter de décrire l'état du fluide pendant ce changement d'état : l'équilibre liquide-vapeur.

Soit : - la pression du changement d'état ..... (aussi appelée pression de vapeur saturante)

- la température du changement d'état .....



### 2.1 Système

Si le corps pur est entièrement sous forme de liquide, à la température de changement d'état, on parle de :

.....

Si le corps pur est entièrement sous forme de vapeur, à la température de changement d'état, on parle de :

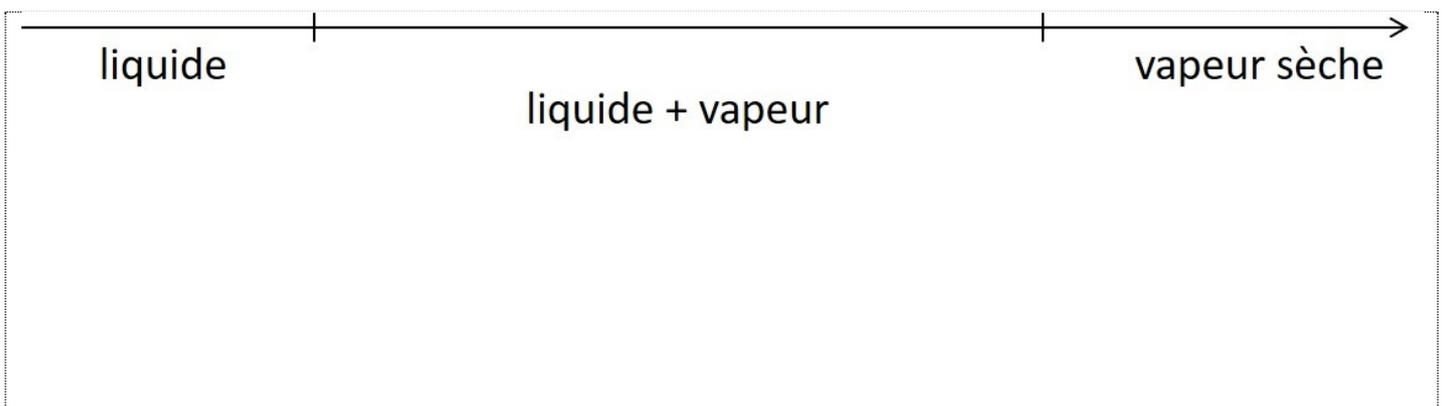
.....

Si le corps pur sous deux phase vapeur et liquide, on parle de :

.....

On considère une masse,  $m$ , de corps pur en équilibre sous deux phases vapeur et liquide.

On note  $m_v$  sa masse de vapeur et  $m_l$  sa masse de liquide tels que : .....



## 2.2 Enthalpie de vaporisation

### 2.2.1 Enthalpie de changement d'état

Les changements d'état effectués **sous pression constante** nécessitent un apport d'énergie thermique.

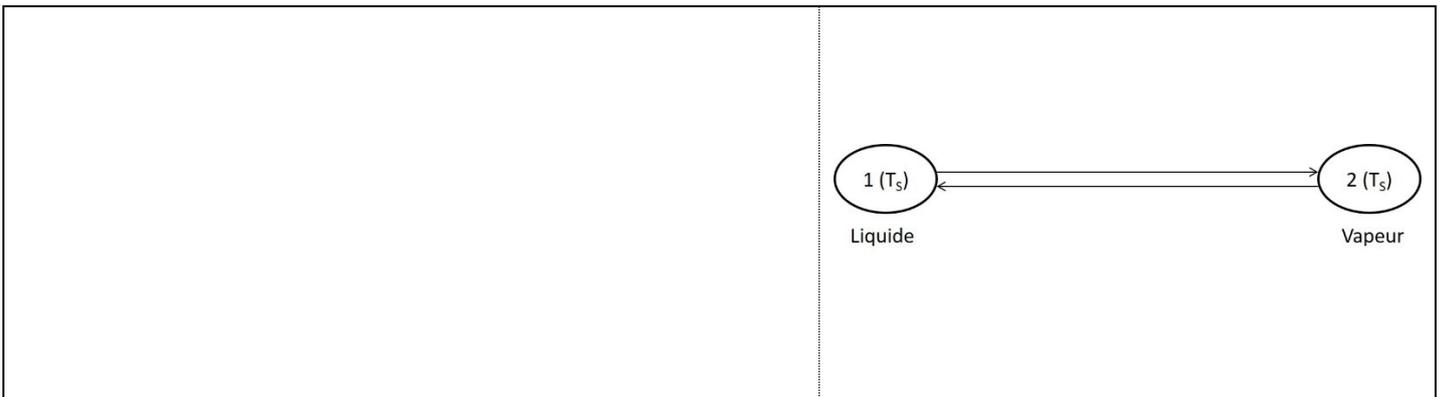
Or, pour une transformation **isobare** :  $dH = \delta Q_p$  ou encore en intégrant entre l'état 1 et l'état 2 :

.....

L'énergie thermique apportée peut donc être identifiée à la variation d'enthalpie du système, qu'on appelle alors **enthalpie de changement d'état**.

### 2.2.2 Enthalpie massique de vaporisation

Définition :



La quantité d'énergie,  $dH$ , mise en jeu est proportionnelle à la masse,  $\delta m$ , du corps pur se vaporisant, on peut donc utiliser des grandeurs massiques et on introduit :

.....

.....

ou encore en intégrant entre l'état 1 et l'état 2 :

.....

.....

où :  $h_1(T_S)$  : enthalpie massique du fluide à l'état de liquide saturant

$h_2(T_S)$  : enthalpie massique du fluide à l'état de vapeur saturante sèche

Remarque :

L'enthalpie massique de vaporisation est couramment appelée **chaleur latente massique de vaporisation**. Elle est constante pour une température fixée. Elle peut être notée  $l_v$ .

### 2.2.3 Ordres de grandeur

Enthalpies massiques de vaporisation (énergie à fournir au fluide) : sous  $P_S = 10^5 Pa$  et  $T_S = 373K$

- pour l'eau : .....

- pour un fluide utilisé dans une machine frigorifique : .....

**2.2.4 Energie récupérable par transfert thermique lors de la liquéfaction isobare d'un fluide**

Soit une masse  $m$  de gaz dans les conditions de pression et de température  $(P_S, T_S)$ . Ce gaz subit une liquéfaction isobare. On sait que la liquéfaction (à l'opposé de la vaporisation) permet de restituer une énergie thermique.

Soit  $l_v(T_S)$  l'enthalpie massique de vaporisation du gaz sous la température  $T_S$ ,  $h_v(T_S)$  l'enthalpie massique du système sous forme de vapeur saturante sèche et  $h_l(T_S)$  l'enthalpie massique du système sous forme de liquide saturant, alors :

.....  
.....

Si on prend une masse de 1 kg d'eau, on peut donc récupérer sous  $P_S = 10^5 Pa$  et  $T_S = 373K$  :

.....  
.....

### 2.3 Entropie de vaporisation

On s'intéresse maintenant à la variation d'entropie lors d'une vaporisation. Comme précédemment, on définit :

$s_1(T_S)$  l'entropie massique du liquide saturant à la température de changement d'état,  $T_S$ ,

$s_2(T_S)$  l'entropie massique de la vapeur saturante sèche à la même température.

Alors l'**entropie massique de vaporisation** est donnée par :

Si on considère la **vaporisation totale** réversible d'une masse,  $m$ , de fluide. Alors en appliquant le deuxième principe :

en intégrant entre l'état 1 et l'état 2, cela donne :

On a donc :

L'**entropie massique de vaporisation**,  $\Delta s_{12}(T_S)$ , est reliée à l'enthalpie massique de vaporisation par :

$$\Delta s_{12}(T_S) = \frac{l_{12}(T_S)}{T_S}$$

Remarque :

Cette dernière expression n'est valable **qu'à la température de changement d'état,  $T_S$** , lorsque le système se vaporise totalement.

Cette dernière expression est généralisable à tout changement d'état. Elle est utile pour savoir si un changement d'état demande de l'énergie ou en produit. Le **signe de l'entropie** massique de changement d'état dépend en effet du fait que l'on aille de la phase plus organisée vers moins organisée ou vice versa.

- Ainsi, pour la vaporisation, la fusion et la sublimation,

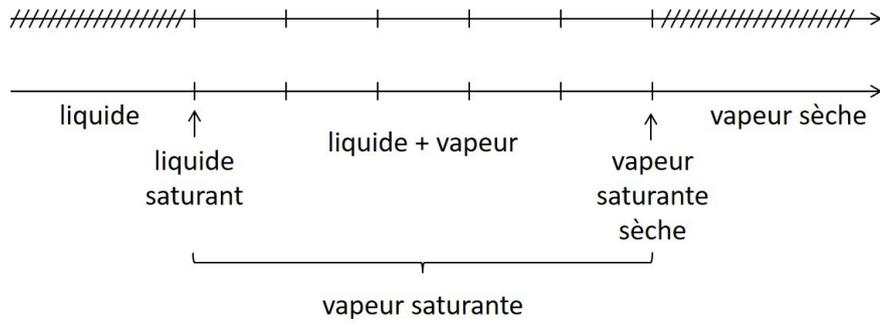
- Alors que pour la liquéfaction, la condensation et la solidification,

## 2.4 Titre massique en vapeur

L'état du corps pur est défini par deux paramètres intensifs :

- la pression,  $P_s$ , ou la température,  $T_s$
- la proportion de masse de vapeur,  $m_v$ , ou encore son taux de vapeur.

On définit le **taux de vapeur** ou **titre massique en vapeur**,  $x$ , par : .....



Remarques :

- Si le système est sous forme de :
- liquide saturant,  $x = 0$
  - vapeur saturante sèche,  $x = 1$

En dehors du changement d'état, le titre massique en vapeur n'est pas défini.

## 2.5 Règle des moments

Lorsque le liquide est saturant, son enthalpie massique est appelée :

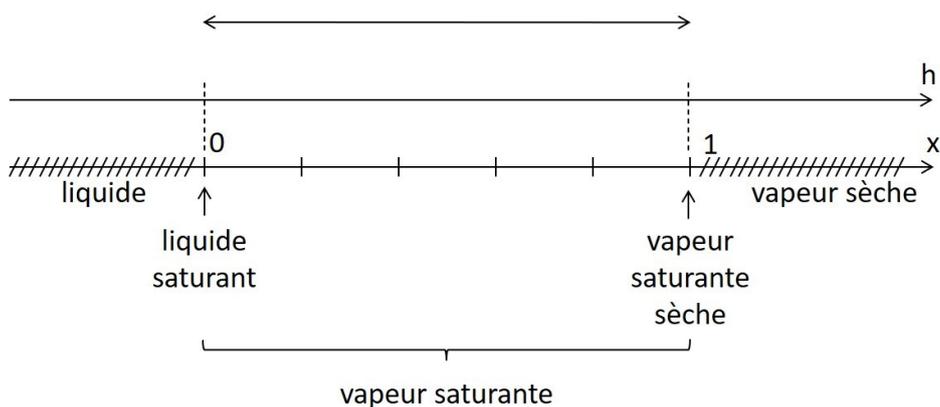
.....

Lorsque la vapeur est saturante sèche, son enthalpie massique est appelée :

.....

L'**enthalpie massique de vaporisation** est alors égale à : .....

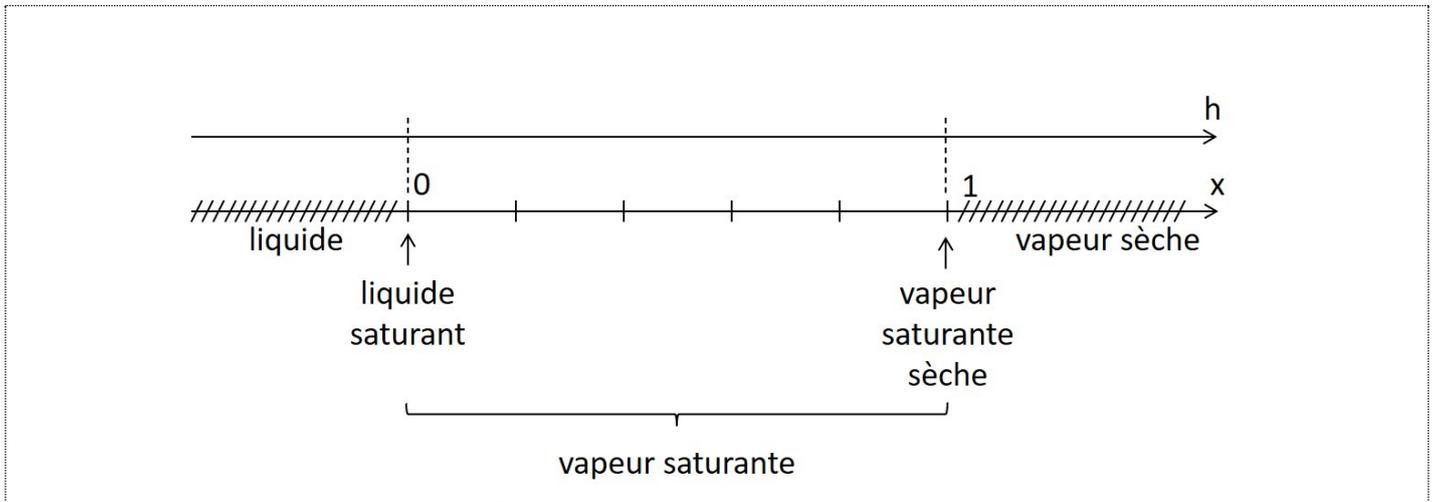
C'est l'enthalpie nécessaire pour faire passer toute la masse unitaire de fluide de l'état de liquide saturante à vapeur saturante sèche ( $x$  passant de 0 à 1).



La règle des moments permet de donner la valeur de l'enthalpie (mais aussi entropie ou volume massique) du corps pur en équilibre sous deux phases vapeur et liquide.

On va dans un premier temps chercher à obtenir la valeur de l'enthalpie d'un corps pur sous deux phases.

L'enthalpie massique dépend donc de  $T_S$  (ou  $P_S$ ) et de  $x$  (ou  $m_v$ ) : .....



Si seulement  $x\%$  du corps pur a changé d'état alors :

.....

On peut aussi écrire :

.....

La **règle des moments** permet de trouver la valeur de fonctions intensives du fluide au cours de son changement d'état connaissant son titre massique en vapeur,  $x$ . On l'énonce pour l'enthalpie massique :

$$h(T_S, x) = h_1(T_S) + x(h_2(T_S) - h_1(T_S))$$

Remarque :

La règle des moments est valable aussi pour l'entropie massique :

.....

Où  $s_1(T_S)$  l'entropie massique du liquide saturant à la température de changement d'état,  $T_S$ ,

Et  $s_2(T_S)$  l'entropie massique de la vapeur saturante sèche à la même température.

La règle des moments est valable aussi pour le volume massique :

.....

où  $v_l(T_S)$  est le volume massique du liquide saturant à la température de changement d'état,  $T_S$ ,

et  $v_v(T_S)$  est le volume massique de la vapeur saturante sèche à la même température.

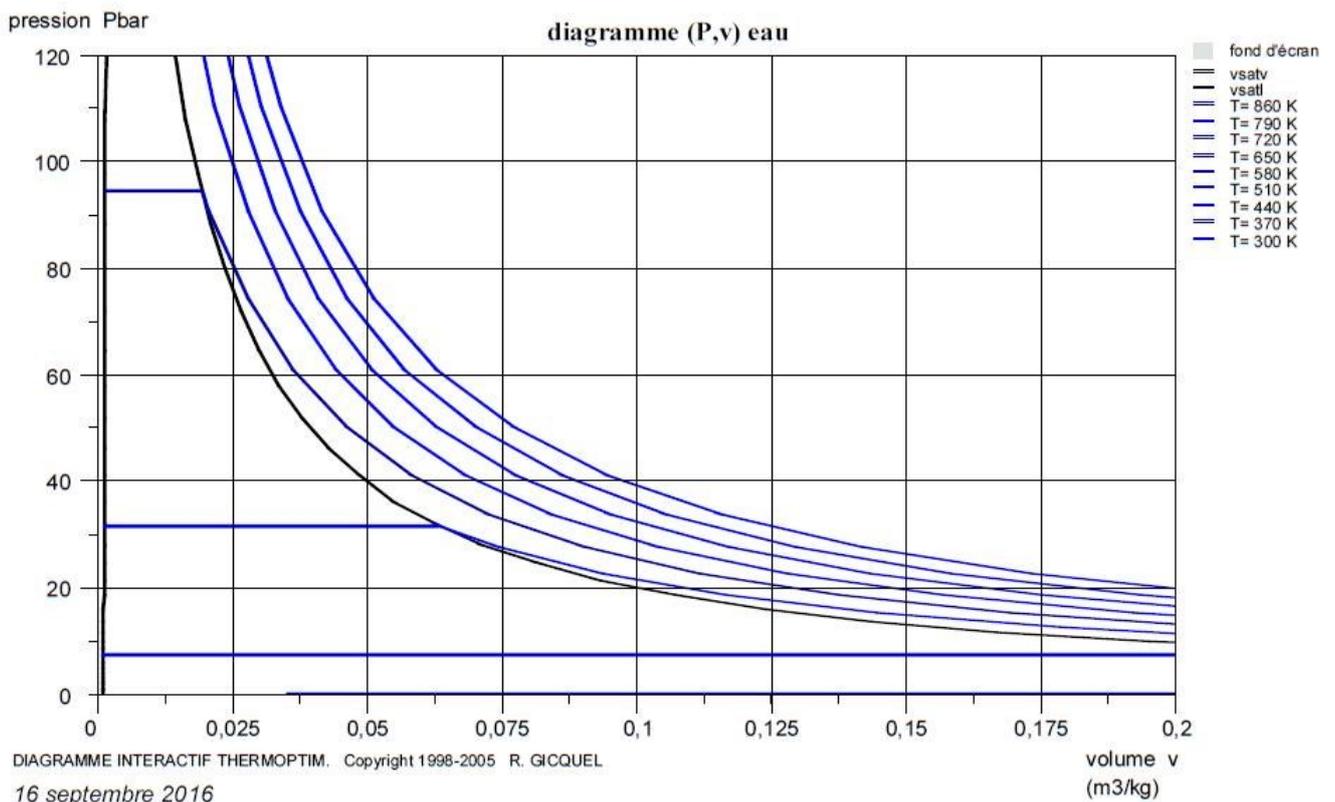
Il existe des tables de données thermodynamiques donnant les valeurs de ces volumes, enthalpies et entropies massiques.

### 3 Diagramme de Clapeyron (P,v)

#### 3.1 Présentation

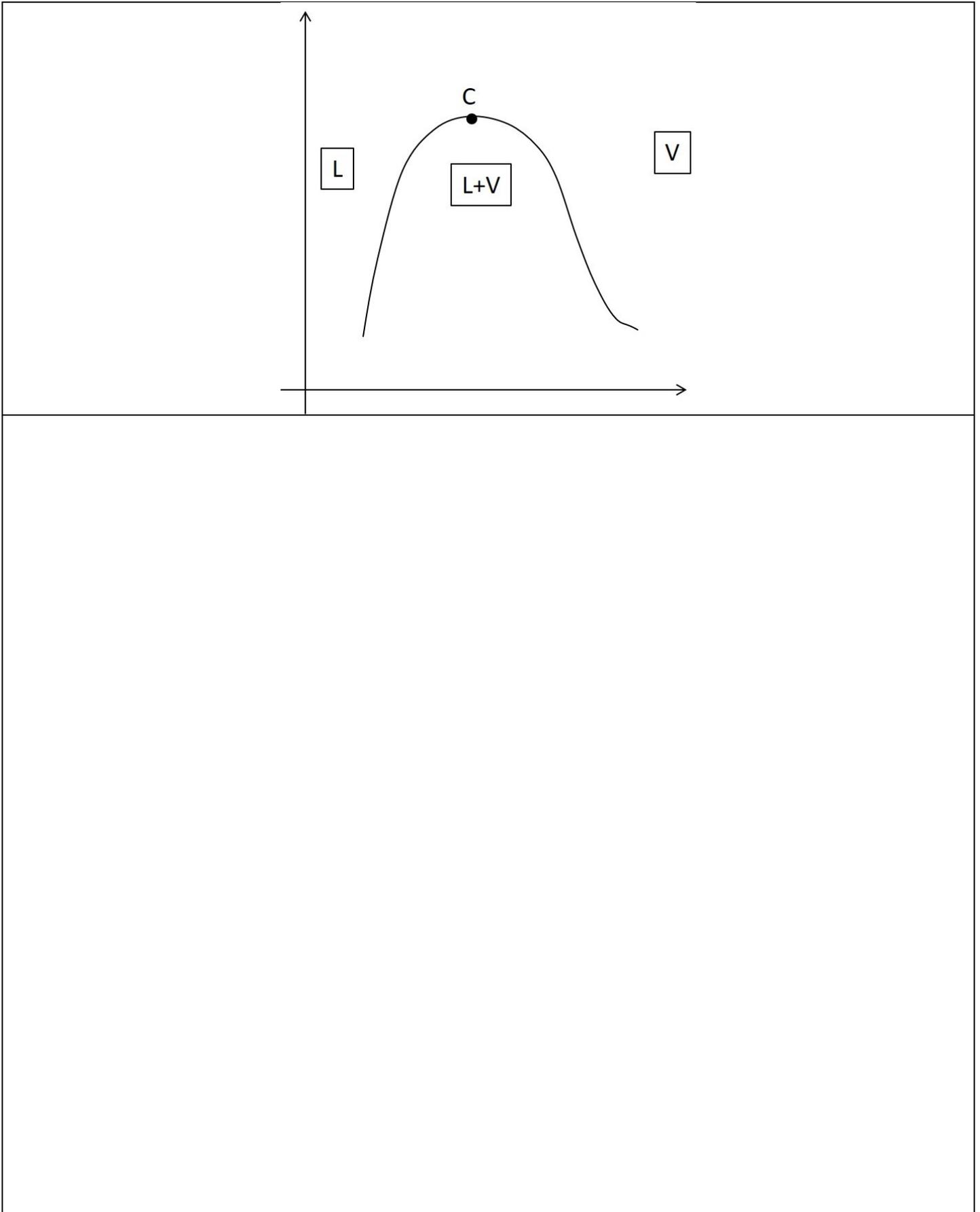


Exemple de diagramme (P,v) de l'eau avec réseau d'isothermes:

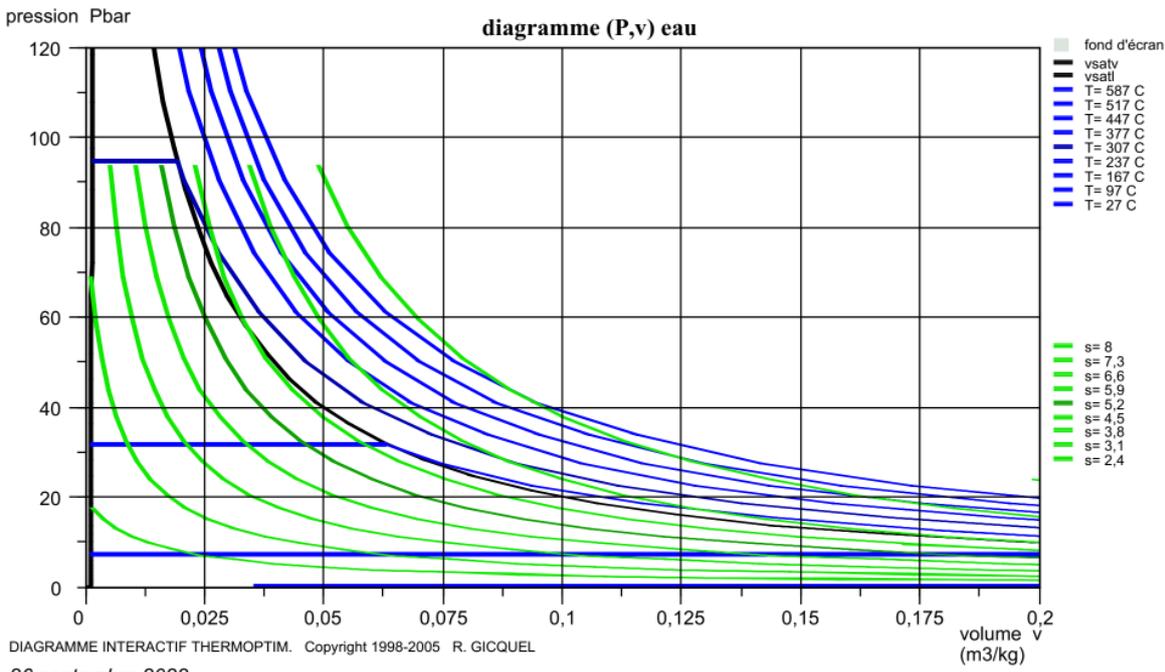
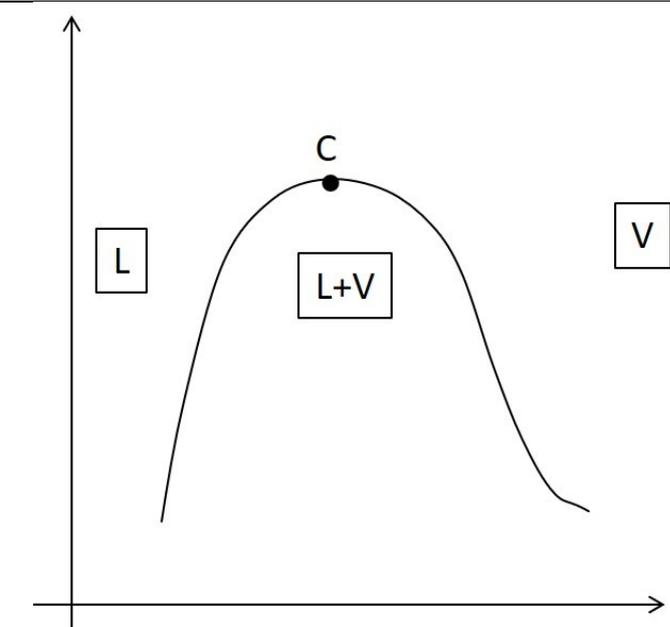


### 3.2 Equations des courbes dans la limite du gaz parfait et du liquide incompressible et indilatable

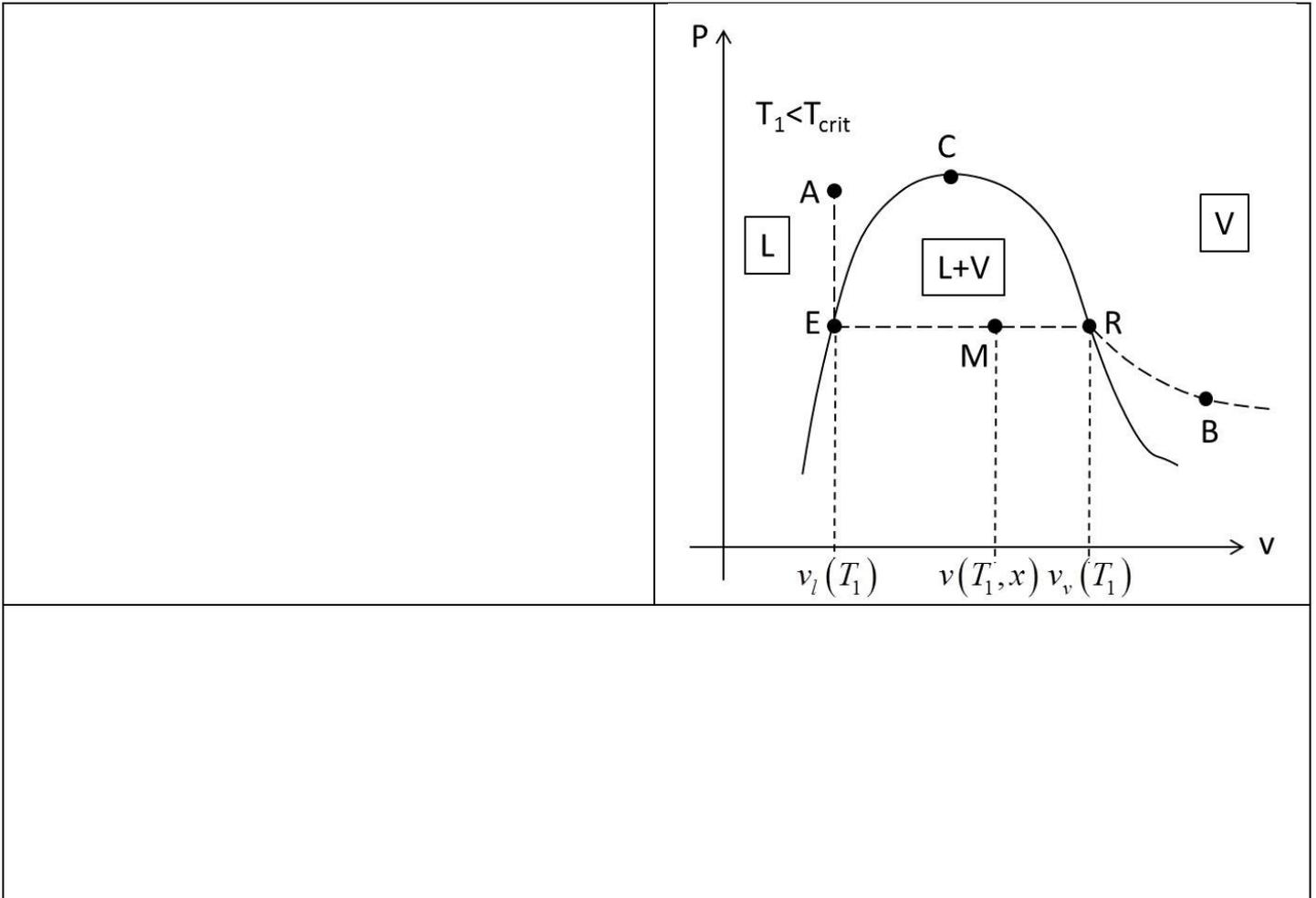
#### 3.2.1 Isothermes (aussi appelé isothermes d'Andrews) :



3.2.2 Isentropiques

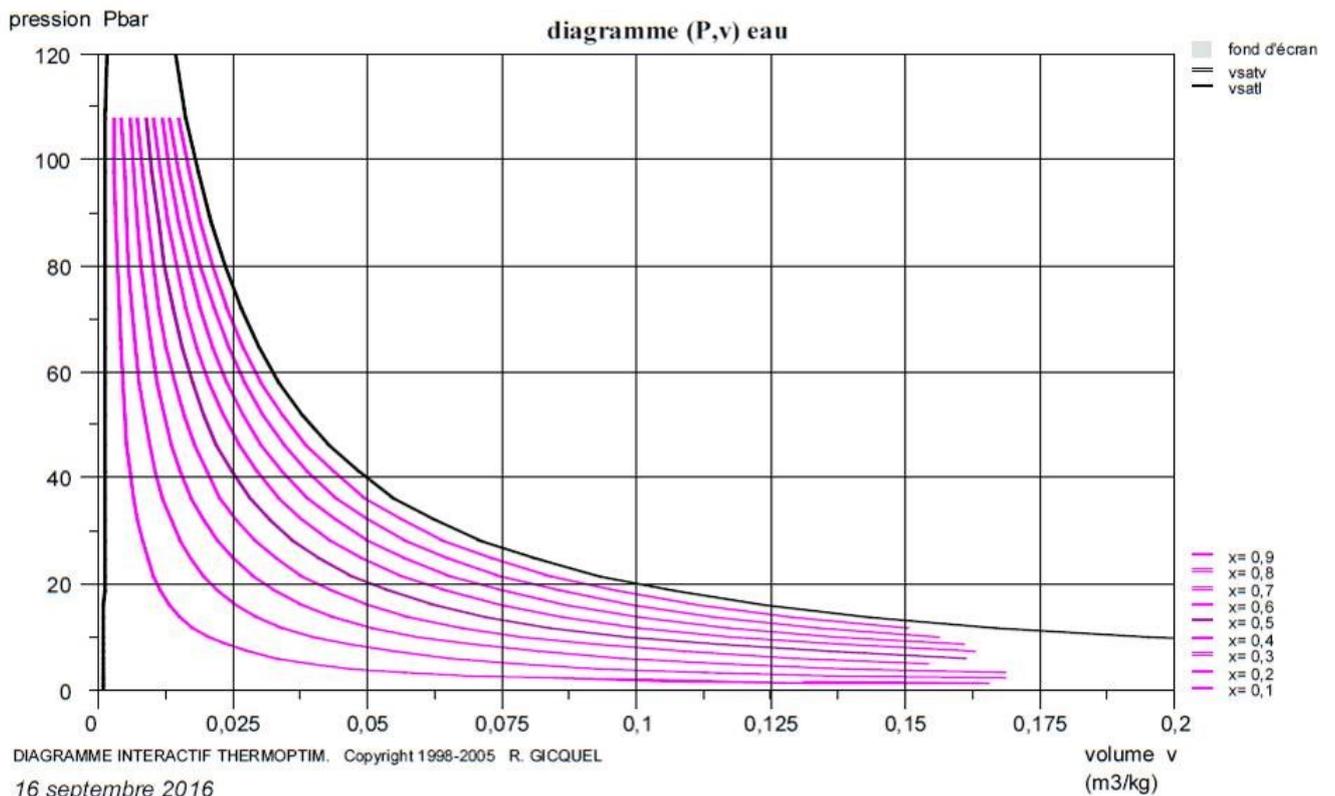


### 3.3 Règle des segments



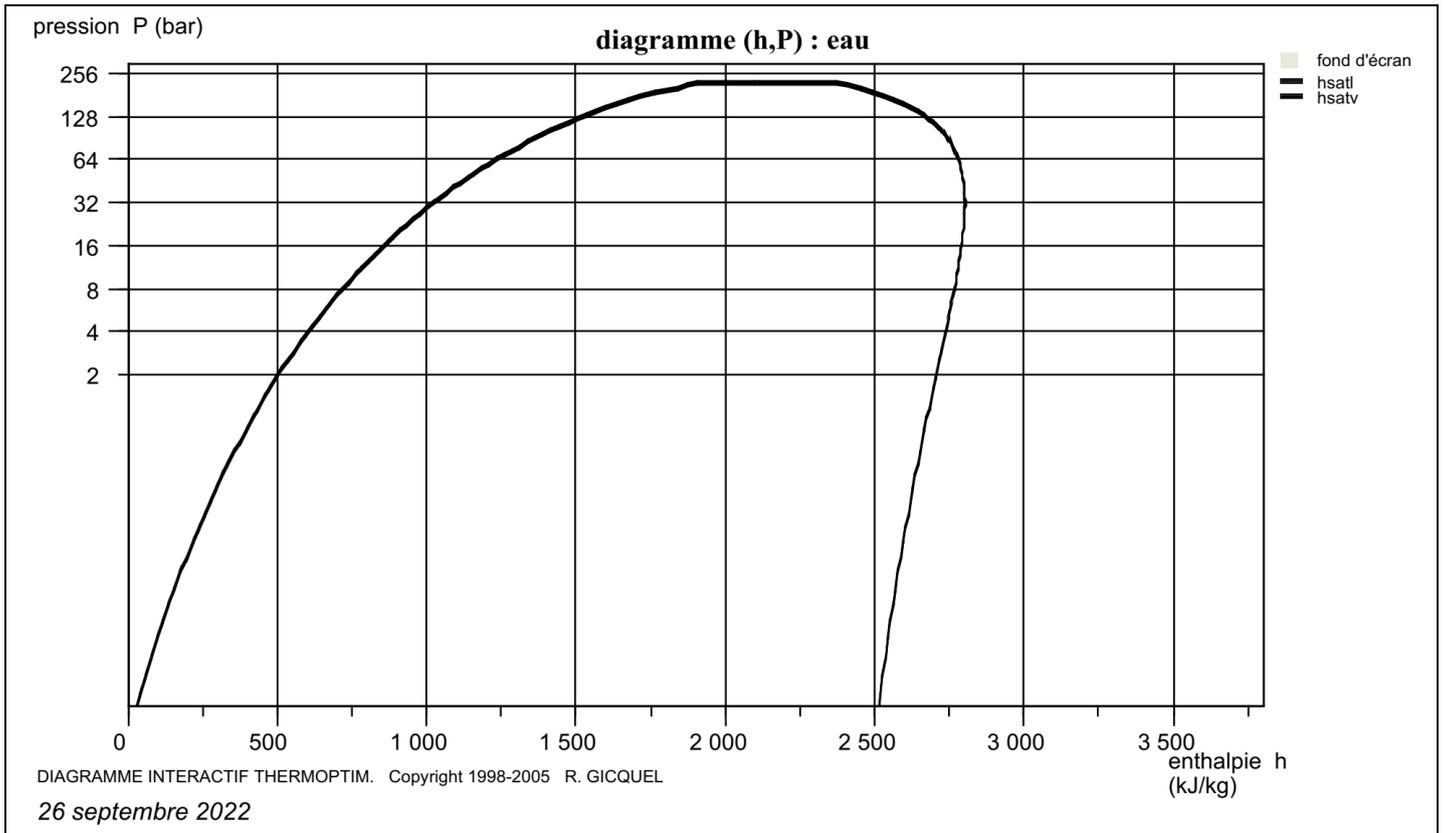
Remarque :

On peut ainsi définir des courbes isotitre : courbes sur lesquelles le titre massique en vapeur reste constant.

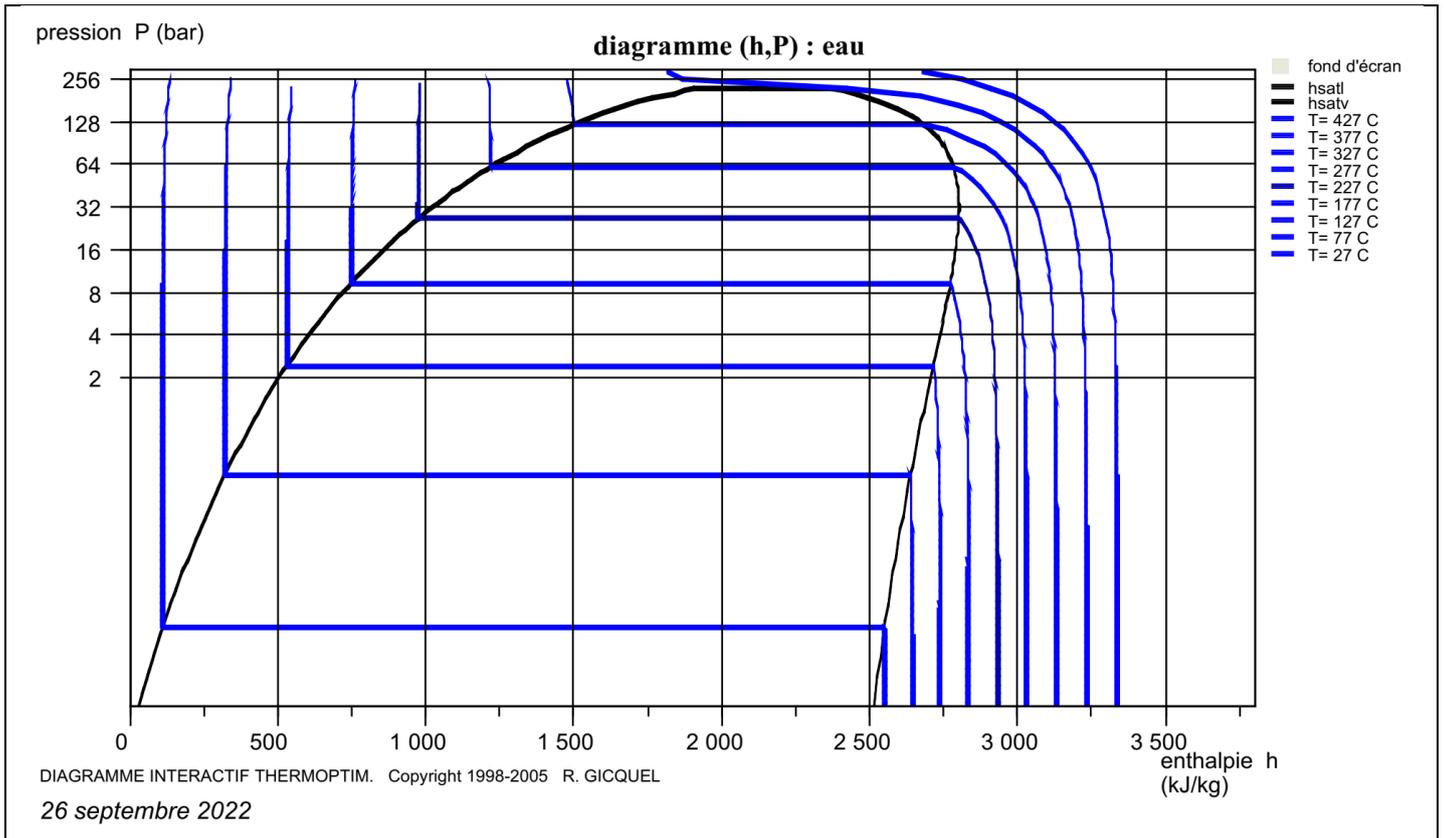


## 4 Diagramme des frigorigères (P,h)

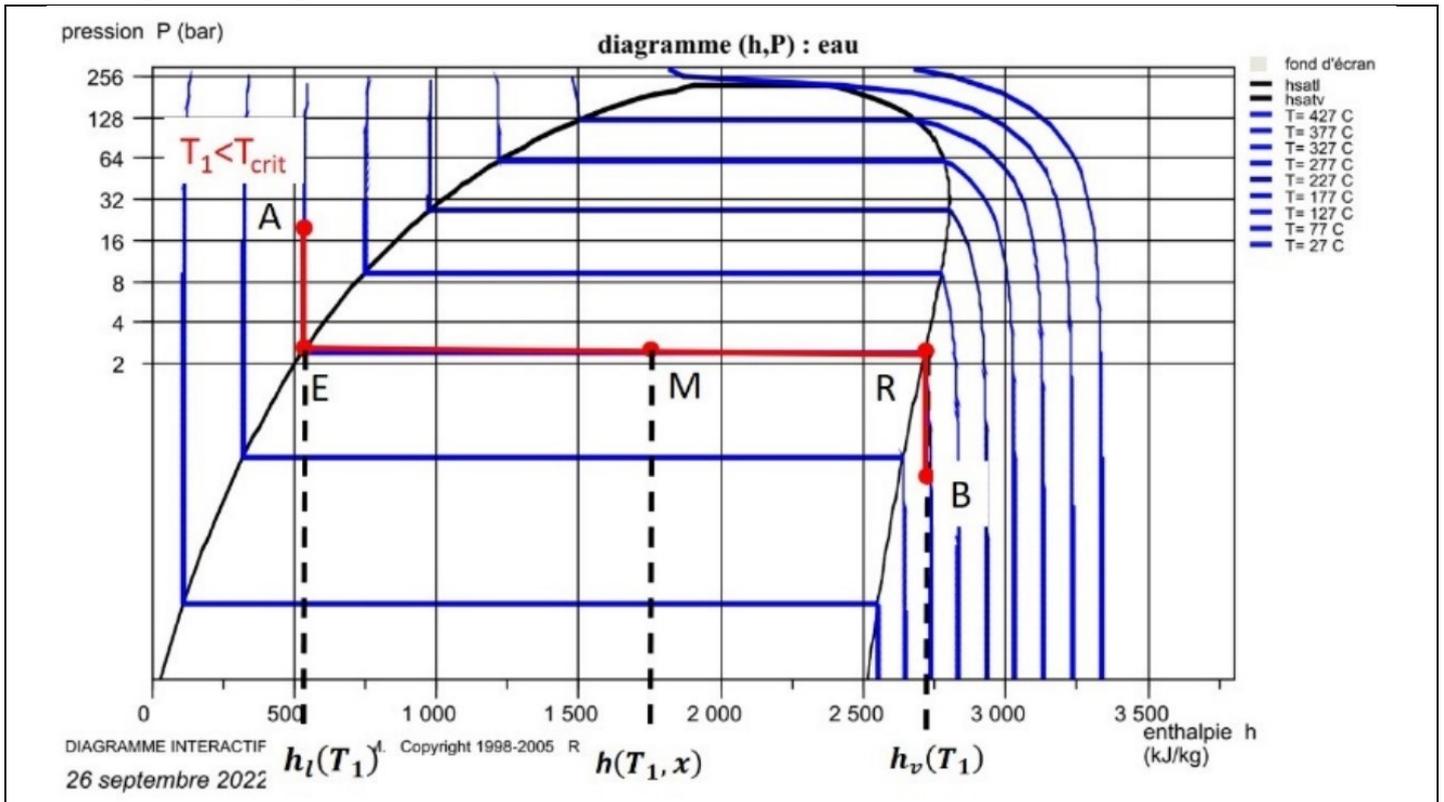
### 4.1 Présentation



## 4.2 Equations des isothermes dans la limite du gaz parfait et du liquide incompressible et indilatable

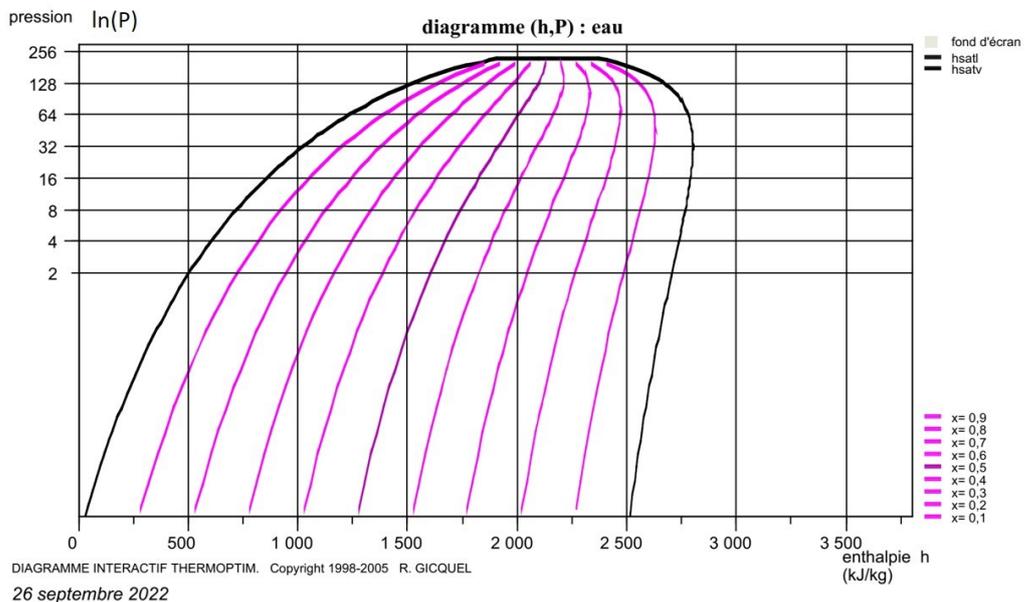


### 4.3 Règle des segments



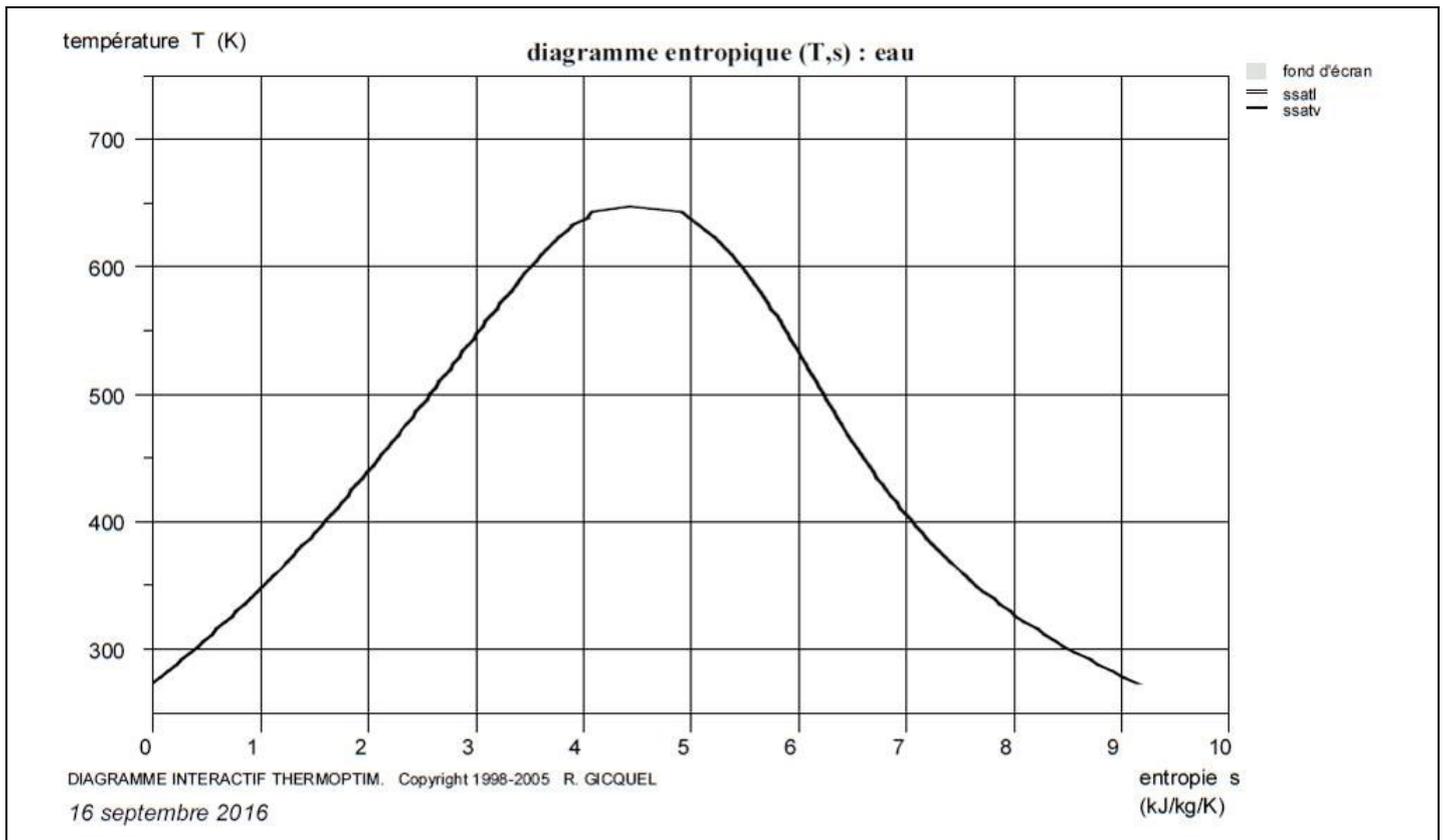
**Remarque :**

On peut ainsi définir des courbes isotitre : courbes sur lesquelles le titre massique en vapeur reste constant.

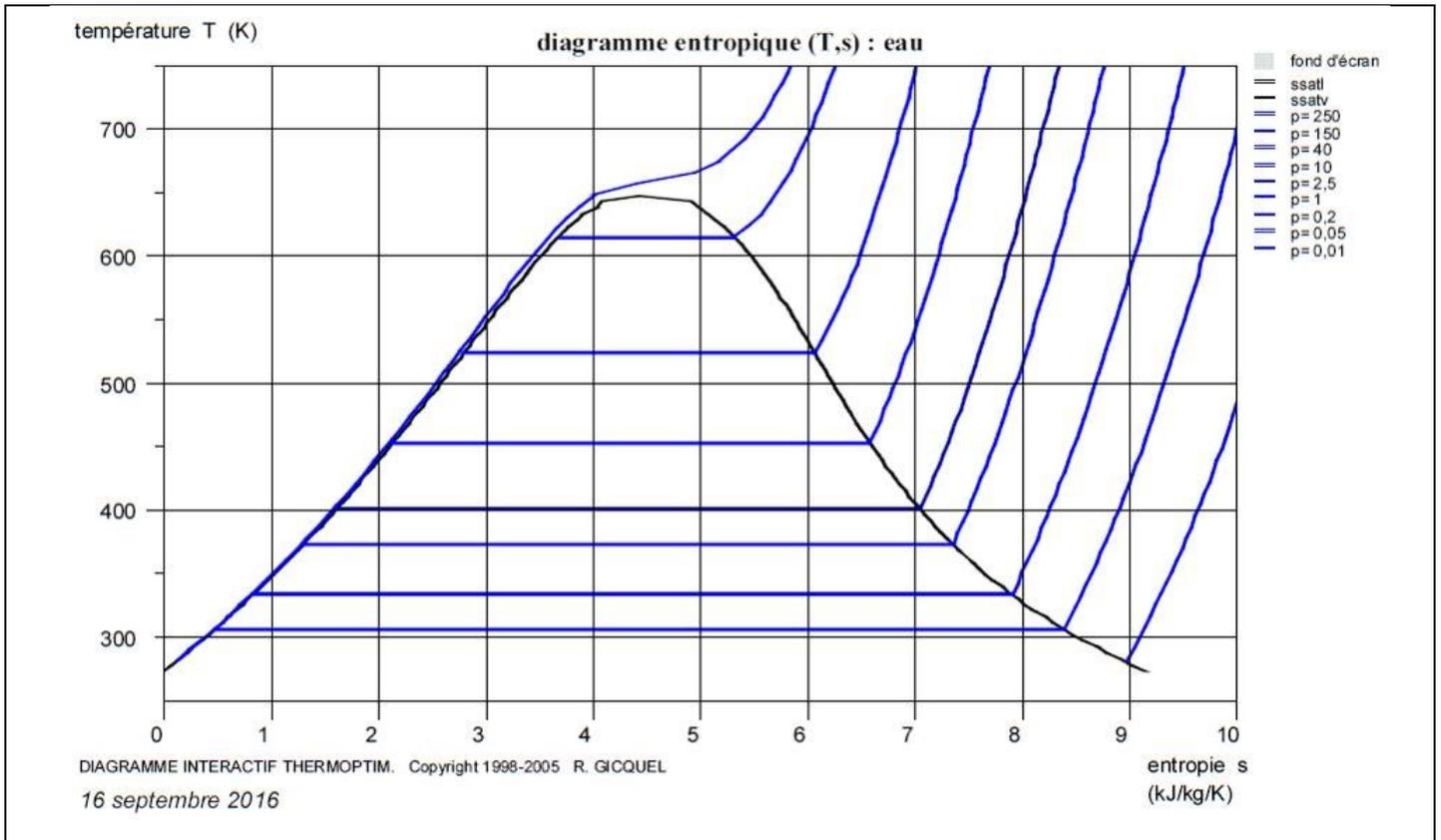


## 5 Diagramme entropique (T,s)

### 5.1 Présentation



## 5.2 Equations des isobares dans la limite du gaz parfait et du liquide incompressible et indilatable



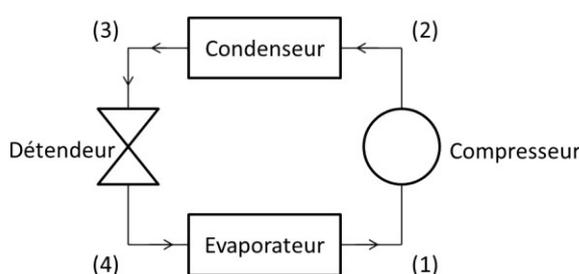


## 6 Applications des diagrammes aux fluides réels : étude d'une machine frigorifique

L'étude des réfrigérateurs sera reprise au chapitre 6 du cours de thermodynamique, mais nous allons nous appuyer sur son étude ici pour utiliser le diagramme entropique d'un fluide réel. Ce fluide est le fluide frigorifique R134a que l'on retrouve dans un réfrigérateur.

Son cycle est composé de la manière suivante :

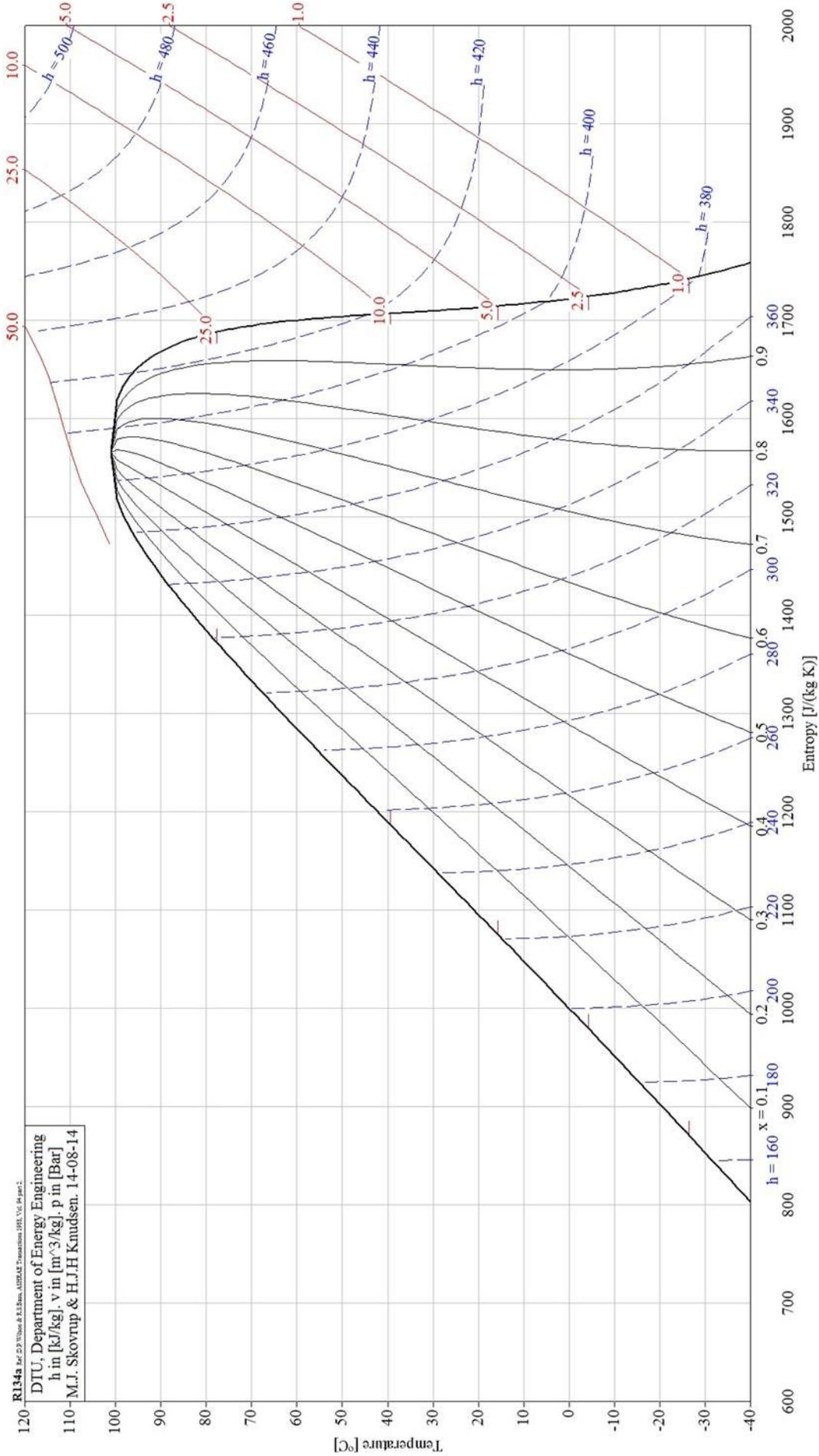
- de (1) à (2) : le fluide est à l'état de vapeur saturante sèche à la température  $T_1 = -30^\circ\text{C}$ . Il subit une compression adiabatique réversible le menant à la pression  $P_2$ . Cette transformation est donc isentropique et mène à un état de vapeur sèche.
- de (2) à (3) : l'évolution est isobare. Un transfert thermique a lieu entre le fluide et une source chaude. Dans l'état (3), le liquide est saturant à la pression  $P_2$  et à la température  $T_3 = 40^\circ\text{C}$ .
- de (3) à (4) : le fluide subit une détente isenthalpique (adiabatique). L'état (4) ramène à la même pression que l'état (1). On notera  $x_4$  le taux de vapeur correspondant.
- de (4) à (1) : l'évolution est isobare. Un transfert thermique a lieu entre le fluide et la source froide (enceinte réfrigérée).

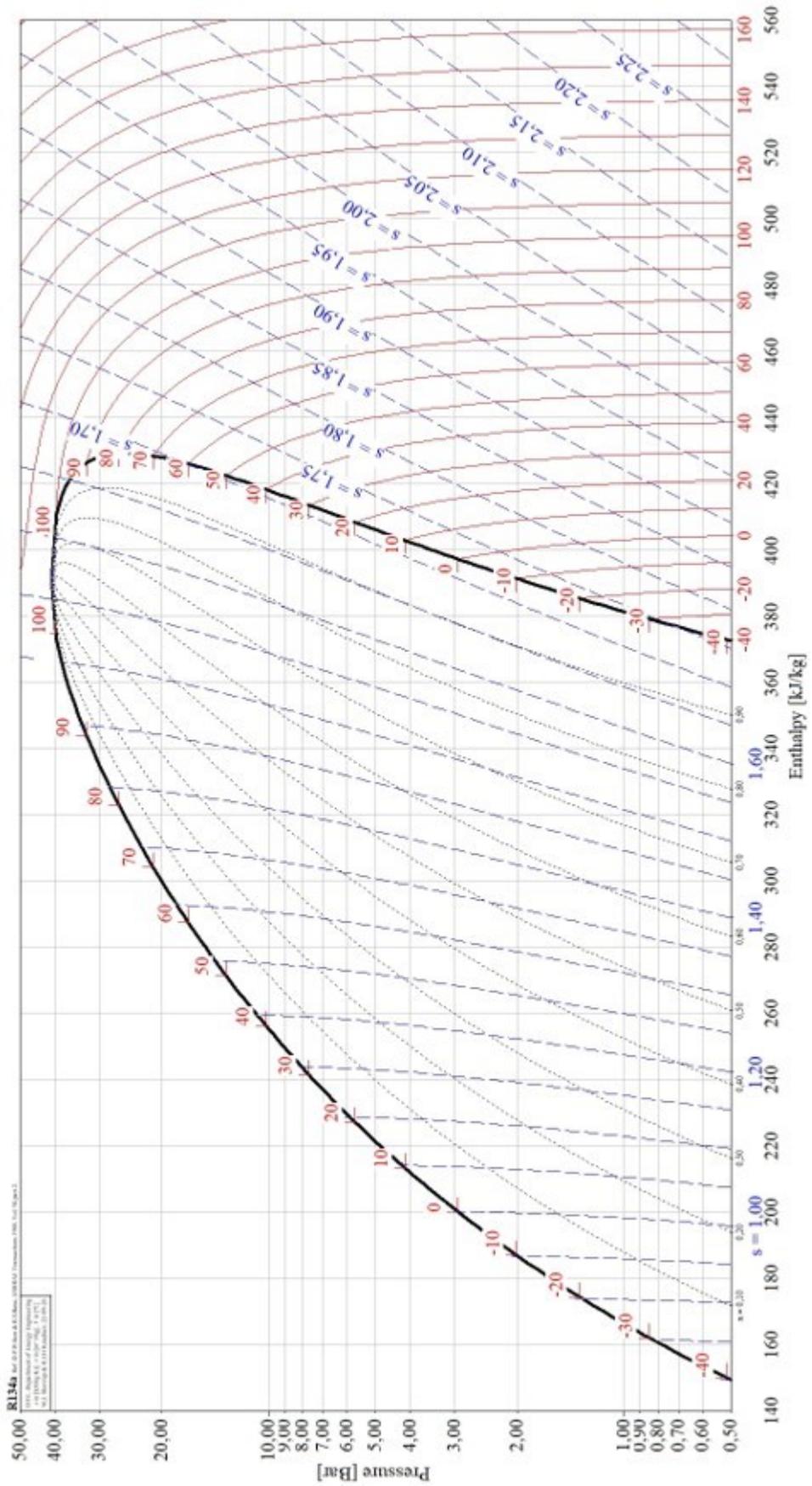


- 1) Tracer son cycle dans un diagramme de Clapeyron.
- 2) Tracer son cycle sur le diagramme des frigoristes fourni.
- 3) Tracer son cycle sur le diagramme entropique fourni.
- 4) Lire sur le diagramme :  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $T_2$ ,  $x_4$ ,  $h_4$ ,  $s_4$ .
- 5) Retrouver la valeur de  $x_4$  par une règle des moments.
- 6) On donne la table thermodynamique suivante :

$T [^\circ\text{C}]$	$P [\text{Bar}]$	$h_{gas} [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	$h_{liq} [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	$s_{gas} [\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}]$	$s_{liq} [\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}]$
-30	0.8	379.31	161,91	1,75	0,85
40	10	418.65	256,16	1,71	1,19

Retrouver la valeur de  $x_4$ .





## 7 Questions de cours

- 1) Nommer les différents états physiques d'un corps pur et les transitions de phases associées.
- 2) Donner le diagramme (P,T) d'un corps pur en y faisant apparaître toutes les phases, les points triple et critique.
- 3) Expliquer la notion d'enthalpie massique de vaporisation. Citer l'ordre de grandeur de l'enthalpie massique de vaporisation de l'eau. Quelles transformations sont associées à des enthalpies massiques de changement d'état positives ?
- 4) Lier l'entropie massique de vaporisation à l'enthalpie massique de vaporisation.
- 5) Définir le titre massique en vapeur.
- 6) Donner la règle des moments.
- 7) Représenter un diagramme de Clapeyron avec différentes isothermes et nommer les courbes qui s'y trouvent. Retrouver les équations des courbes isothermes dans la limite du gaz parfait et dans la limite du liquide incompressible et indilatable.
- 8) Sur un diagramme de Clapeyron, représenter l'allure des courbes isentropiques. Retrouver leur équation dans la limite du gaz parfait et dans la limite du liquide incompressible et indilatable

## 8 Exercices type oral

### 8.1 Mélange eau-glace

On mélange sous  $P = 1\text{bar}$  une masse  $m_1$  d'eau liquide à  $T_1 = 300\text{K}$  et une masse  $m_2$  de glace à  $T_2 = 270\text{K}$ . La température de changement d'état sous cette pression est  $T_f = 273\text{K}$ , avec une enthalpie de fusion  $l_f = 334\text{kJ.kg}^{-1}$ . Les capacités thermiques massiques de l'eau liquide et de la glace sont respectivement  $c_1 = 4,2.10^3\text{J.kg}^{-1}.K^{-1}$  et  $c_2 = 2,1.10^3\text{J.kg}^{-1}.K^{-1}$ .

On suppose que le récipient dans lequel évolue le système est calorifugé : on considère la transformation adiabatique et isobare.

- 1) A partir de quelle valeur du rapport  $m_1/m_2$ , l'eau est-elle intégralement liquide dans l'état final à la température  $T_f$  ?
- 2) Faire un bilan entropique. Que vaut l'entropie créée lors de cette transformation ?
- 3) Même question pour un état solide.
- 4) Entre les deux valeurs trouvées précédemment, quel est l'état du système à l'équilibre ?

### 8.2 Détermination de l'état du fluide

A la sortie d'une turbine, sous  $P = 20\text{bar}$ , un fluide a été récupéré. L'équilibre liquide-vapeur a lieu à  $T_e$ . Son enthalpie massique est notée  $h$ . Les tables de vapeur fournissent les renseignements suivants :

Pression	Température	Enthalpie massique du liquide saturant	Enthalpie massique de la vapeur saturante sèche
$P = 20\text{bar}$	$T_e = 485\text{K}$	$h_l(T_e) = 909\text{kJ.kg}^{-1}$	$h_v(T_e) = 2801\text{kJ.kg}^{-1}$

Déterminer l'état du fluide (phase, titre massique) si  $h = 2000\text{kJ.kg}^{-1}$ . Quelle est alors la température ?

### 8.3 Détermination de l'état d'une vapeur

On considère un extrait d'une table thermodynamique d'un fluide très utilisé dans les installations domestiques.

Pression	Température	Enthalpie massique du liquide saturant	Enthalpie massique de la vapeur saturante sèche
$5\text{bar}$	$T_1 = 273\text{K}$	$h_l(T_1) = 200\text{kJ.kg}^{-1}$	$h_v(T_1) = 405\text{kJ.kg}^{-1}$
$13\text{bar}$	$T_2 = 307\text{K}$	$h_l(T_2) = 242\text{kJ.kg}^{-1}$	$h_v(T_2) = 416\text{kJ.kg}^{-1}$

- 1) Quelles sont l'enthalpie et l'entropie massiques de vaporisation de ce fluide à  $0^\circ\text{C}$  ?
- 2) Préciser la température et l'enthalpie massique d'un mélange liquide-vapeur de titre massique égal à 30%, sous une pression de 13 bar.
- 3) Une évolution isenthalpique fait passer une quantité fixée de fluide, de la pression 13 bar à la pression 5 bar. L'état initial est liquide saturant. Déterminer la température et la composition du fluide après évolution.
- 4) Lorsque les pressions dans l'état initial et dans l'état final sont les mêmes que précédemment, mais à partir d'un état initial de vapeur saturante sèche, l'état final est-il un mélange liquide-vapeur ? Peut-on en préciser la température à l'aide des données fournies ?

### 8.4 Détente isentropique

Dans un cycle de machine à vapeur, la phase motrice est une détente de la vapeur d'eau dans un cylindre fermé par un piston mobile.

Cette détente est suffisamment rapide pour que les transferts thermiques puissent être négligés. On supposera également cette détente réversible.

Cette détente a lieu à partir de vapeur saturante sèche à  $T_1 = 485\text{K}$  et on obtient un mélange liquide-vapeur à  $T_2 = 373\text{K}$ . les enthalpies de vaporisations sont  $l_1 = 1892\text{kJ/kg}$  à  $T_1$  et  $l_2 = 2258\text{kJ/kg}$  à  $T_2$ . On donne la capacité thermique de l'eau liquide :  $c = 4,18\text{kJ.K}^{-1}.kg^{-1}$ .

Calculer le titre en vapeur final. On pourra s'aider d'une représentation de la détente dans un diagramme entropique.

## 8.5 Machine à vapeur : cycle de Rankine

Dans une machine à vapeur, l'eau décrit un cycle de Rankine :

- AB : l'eau liquide ( $P_1, T_1$ ) à saturation est comprimée de façon isentropique dans une pompe jusqu'à la pression  $P_2$  de la chaudière. Cette transformation se fait pratiquement sans variation de volume. On raisonne sur l'unité de masse.

- BD et DE : l'eau liquide est injectée dans la chaudière, s'y réchauffe jusqu'à  $T_2$  (BD) et s'y vaporise (DE) à la pression  $P_2$ .

- EF : la vapeur est admise dans le cylindre ( $T_2, P_2$ ) et on effectue une détente isentropique jusqu'à la température initiale  $T_1$  : on obtient un mélange liquide-vapeur de titre massique  $x$  en vapeur.

- FA : le piston par son retour chasse le mélange dans le condenseur où il se liquéfie totalement.

1) Donner l'allure du cycle dans le diagramme de Clapeyron en faisant figurer les deux isothermes  $T_1$  et  $T_2$ . On justifiera que la température de B est très voisine de celle de A.

2) Donner l'allure du cycle en diagramme entropique (T,s) fourni.

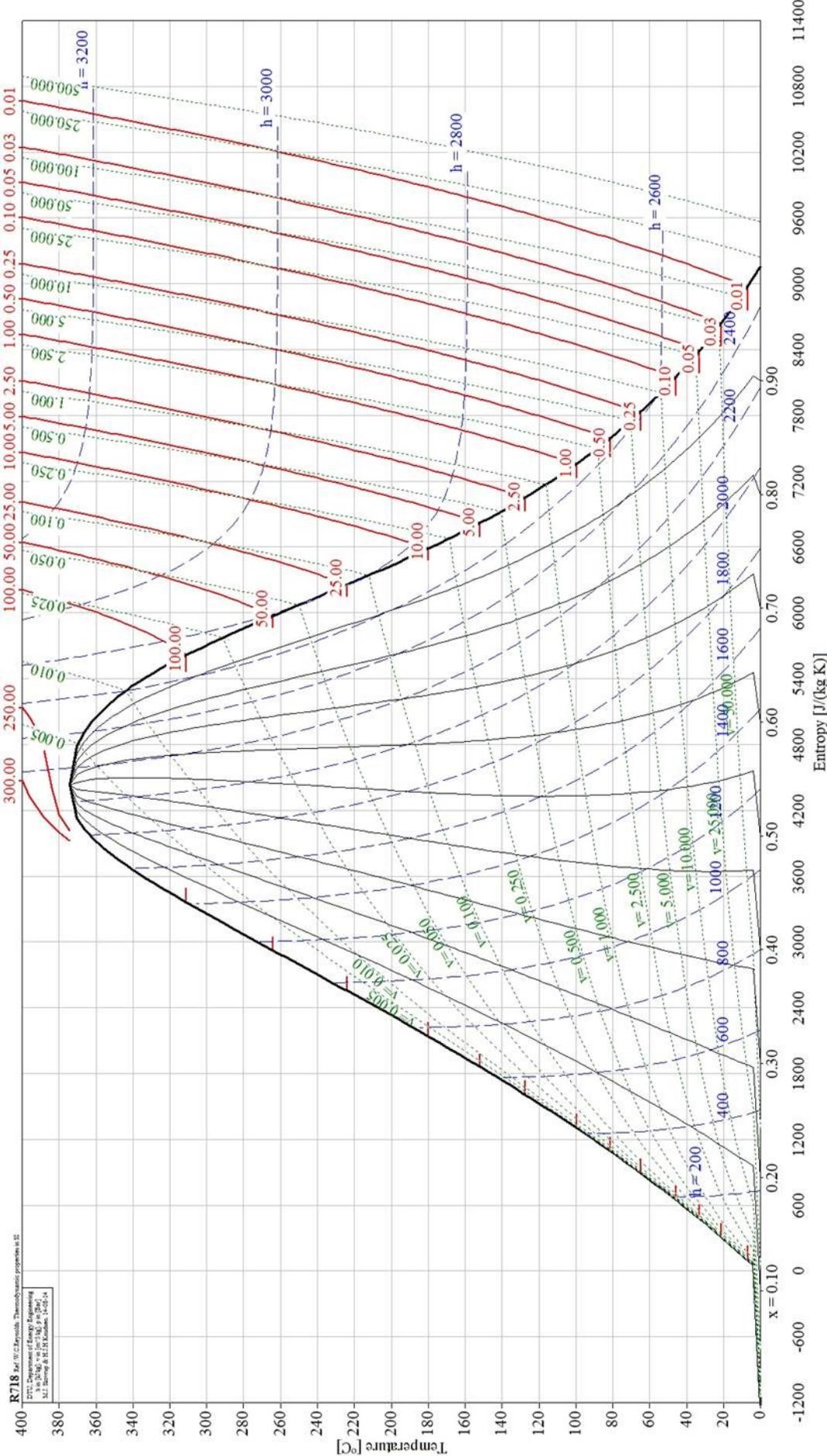
3) Donner l'allure du cycle en diagramme des frigoristes ( $\ln(P), h$ ) fourni.

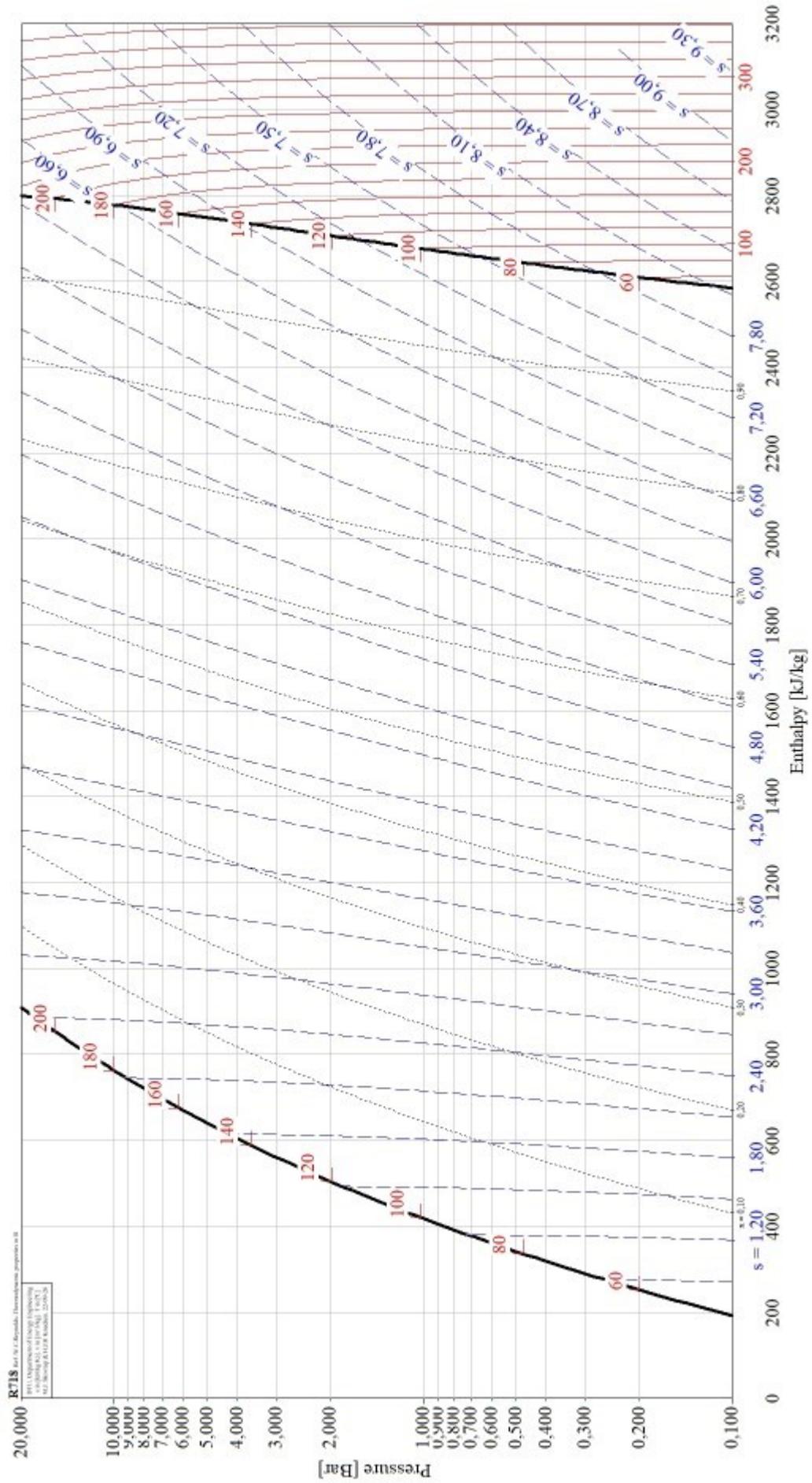
4) Exprimer le rendement de ce moteur thermique uniquement en termes enthalpiques :  $\rho = f(H_A, H_B, H_E, H_F)$ .

5) A partir de données expérimentales, calculer le rendement du cycle.

Données :

$P(\text{bar})$	$T(^{\circ}\text{C})$	Liquide		Vapeur	
		$s_l(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$h_l(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	$s_v(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$h_v(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$
$P_1 = 0,2$	$T_1 = 60$	0,83	251	7,9	2608
$P_2 = 12$	$T_2 = 188$	2,2	798	6,52	2783





## 8.6 Extrait Centrale TSI 2016

En régime permanent d'écoulement, le fluide R134a subit les transformations suivantes (on peut se reporter à la figure 5)

- $1 \rightarrow 2$  : le fluide à l'état gazeux sous la pression  $P_b$  est comprimé dans un compresseur à piston. Il ressort à la pression  $P_h$ . On considère que cette compression est isentropique ;
- $2 \rightarrow 3$  : le gaz se refroidit de façon isobare jusqu'au condenseur (seau de droite contenant une masse d'eau  $m_c$ ). On parle de désurchauffe. Au point  $3$  le gaz est assimilé à de la vapeur saturante sèche ;
- $3 \rightarrow 3'$  : le gaz se condense au contact thermique de l'eau du condenseur (seau de droite) jusqu'au liquide saturé ;
- $3' \rightarrow 4$  : dans le tuyau de cuivre, le liquide se refroidit de façon isobare jusqu'au détendeur. On parle de sous-refroidissement ;
- $4 \rightarrow 5$  : le liquide subit une détente dans le détendeur ; il commence à se vaporiser ; la pression de sortie est  $P_b$  (manomètre de gauche). Cette détente peut être considérée comme adiabatique ;
- $5 \rightarrow 6$  : le fluide poursuit sa vaporisation à la pression  $P_b$  notamment dans le serpentin évaporateur baignant dans de l'eau (seau de gauche contenant une masse d'eau  $m_e$ ) ;
- $6 \rightarrow 1$  : dans le tuyau de cuivre, le gaz se réchauffe de façon isobare jusqu'à l'entrée du compresseur. On parle de surchauffe. Elle permet de s'assurer qu'aucune goutte de liquide ne pénètre dans le compresseur.

On obtient le tableau 2.

	1	2	3	3'	4	5	6
$P$ (bar)	2,9	6,8	6,8	6,8	6,8	2,9	2,9
$\theta$ (°C)	12	44	26	26	19	0	0
$T$ (K)	285	317	299	299	292	273	273
$x$	vapeur sèche	vapeur sèche	1	0	Liquide	$x_5$	1
$v$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ )	0,073	0,033	0,030	$8,3 \times 10^{-4}$	$8,1 \times 10^{-4}$	0,012	0,070
$h$ ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	408	430	412	233	226	$h_5$	396
$s$ ( $\text{kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	1,76	$s_2$	1,72	1,13	1,09	1,08	1,72

Tableau 2

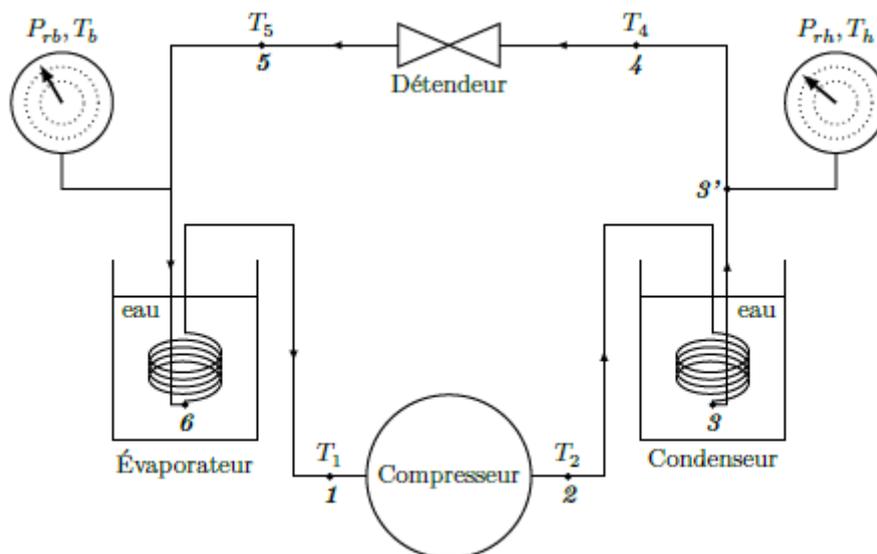


Figure 5 Schéma d'ensemble de la pompe à chaleur

### II.B – Diagramme enthalpique

On considère le diagramme enthalpique (ou diagramme des frigoristes) fourni sur le document réponse. Sur ce diagramme, on peut identifier la courbe de saturation composée de la courbe d'ébullition (liquide saturé,  $x = 0$ ,

courbe de gauche) et de la courbe de rosée (vapeur saturante sèche,  $x = 1$ , courbe de droite). On peut également identifier les isotitres, les isothermes, les isentropiques et les isochores.

**II.B.1)** Commenter l'allure des isothermes dans chaque domaine (vapeur sèche, état diphasé, phase liquide).

**II.B.2)** Placer les points **1**, **2**, **3**, **3'**, **4**, **5** et **6** sur le diagramme des frigoristes et tracer le cycle parcouru par le fluide.

**II.B.3)**

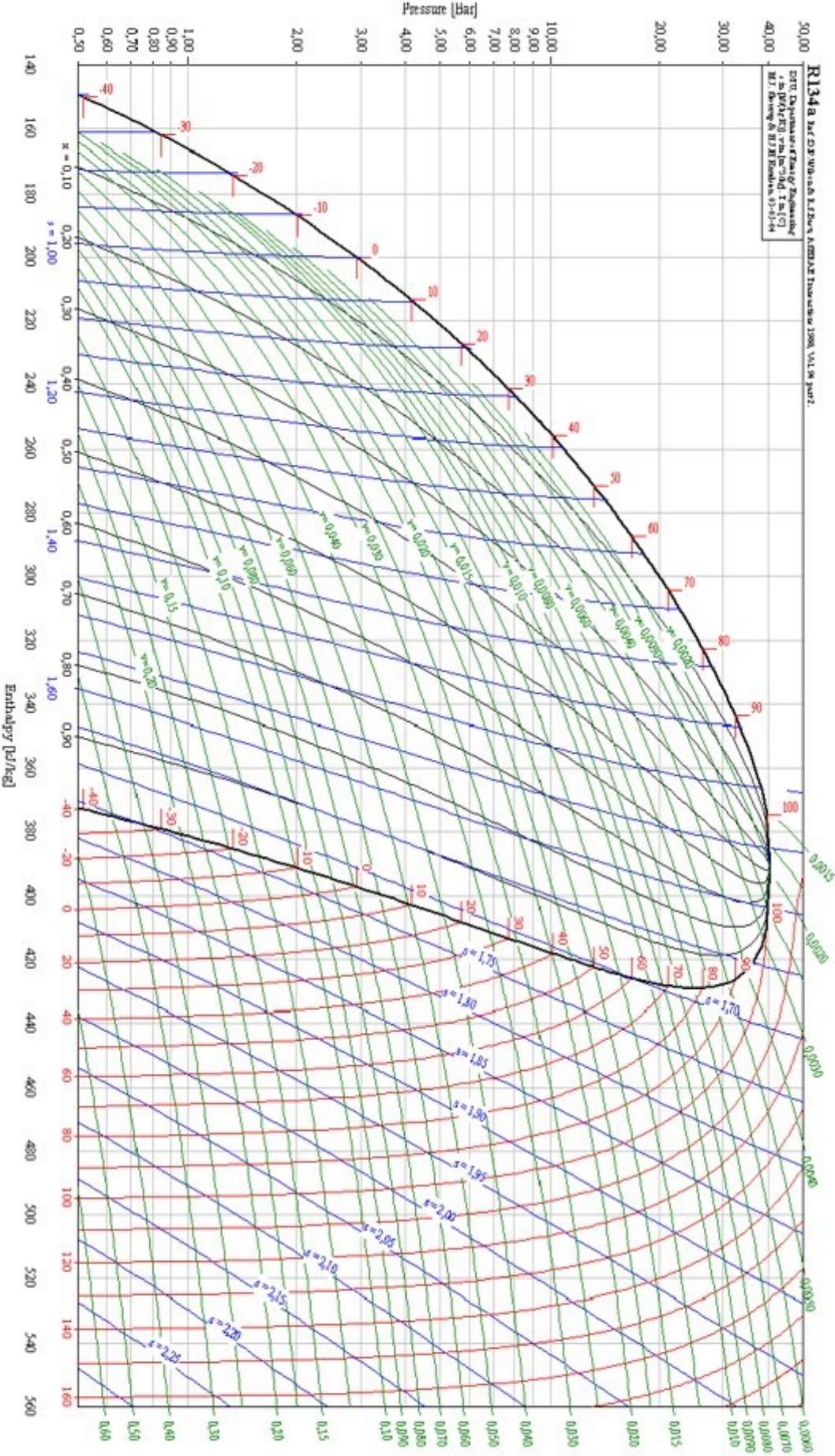
a) Lors du changement d'état  $A \rightarrow B$  d'un corps pur à la température  $T$ , quelle relation a-t-on entre  $\Delta s_{AB}(T)$  et  $\Delta h_{AB}(T)$  ?

b) Vérifier numériquement cette relation pour  $T = 299 \text{ K}$ .

c) Déterminer graphiquement la valeur de l'enthalpie massique de vaporisation du fluide R134a pour  $T = 273 \text{ K}$ . Commenter l'ordre de grandeur en comparant à des ordres de grandeur connus.

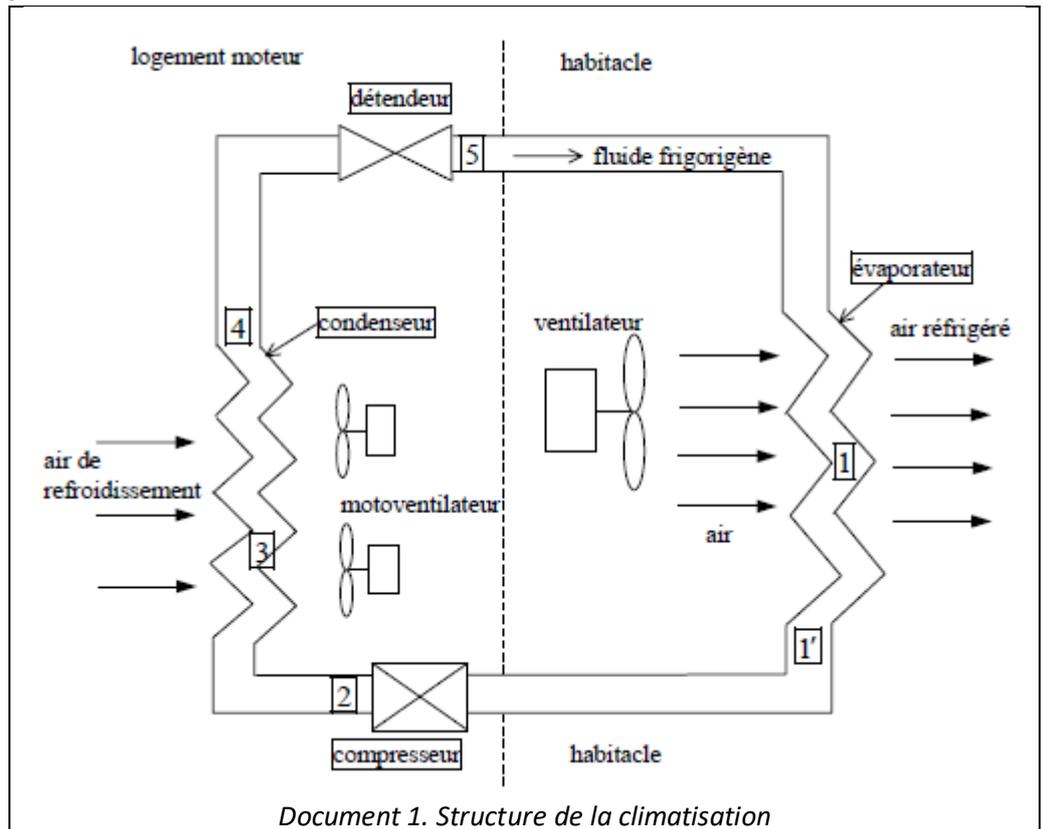
**II.B.4)** Déterminer la valeur de la fraction massique  $x = m_g/m$  au point **5**.

Annexe 1. Diagramme enthalpique du R134A (A rendre avec la copie)



## 9 DM2 pour le 18/09/2023

La quasi-totalité des véhicules neufs sont aujourd'hui équipés d'une climatisation. Destiné à maintenir dans l'habitacle un débit d'air et une température régulée, le système de climatisation se compose : d'un circuit d'air pulsé dans lequel un débit d'air est créé par la rotation d'un ventilateur, et d'un circuit frigorifique composé d'un compresseur, d'un condenseur, d'un détendeur et d'un évaporateur, dans lesquels circule un fluide frigorigène dont la vaporisation dans l'évaporateur absorbe de l'énergie provenant de l'habitacle, permettant ainsi la régulation de température souhaitée (Document 1).



Document 1. Structure de la climatisation

Pour refroidir l'air intérieur du véhicule, un fluide frigorigène effectue en continu des transferts énergétiques entre l'intérieur, l'extérieur du véhicule et le compresseur. Le fluide frigorigène utilisé depuis 1995, en remplacement du fréon utilisé jusqu'alors est du tétrafluoroéthane, connu sous l'appellation R134A.

- 1) Montrer que la variation d'enthalpie massique  $\Delta h_{GP}$  et de l'entropie massique  $\Delta s_{GP}$  d'un gaz parfait en fonction de la température  $T$ , de la pression  $P$ , de la masse molaire  $M$  du gaz, et de  $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$  où  $c_p$  et  $c_v$  désignent respectivement la capacité thermique massique à pression constante, et la capacité thermique massique à volume constant, peuvent s'écrire :

$$\Delta h_{GP} = \frac{R}{M} \frac{\gamma}{\gamma - 1} (T_F - T_I)$$

$$\Delta s_{GP} = \frac{R}{M} \frac{\gamma}{\gamma - 1} \ln\left(\frac{T_F}{T_I}\right) - \frac{R}{M} \ln\left(\frac{P_F}{P_I}\right)$$

Avec :  $(T_I, P_I)$  : température et pression initiales et  $(T_F, P_F)$  : température et pression finales

- 2) Dans le diagramme entropique, expliquer la forme des courbes isobares dans le domaine de la vapeur assimilée à un gaz parfait.
- 3) Dans le diagramme des frigoristes, expliquer la forme des courbes isothermes dans le domaine du liquide assimilée à une phase condensée incompressible et indilatable.
- 4) Donner l'expression de l'enthalpie massique  $h(T, x)$  et de l'entropie massique  $s(T, x)$  d'un fluide diphasé (liquide, vapeur) en fonction de l'enthalpie massique de la phase liquide en équilibre avec la vapeur  $h_l(T)$ , de l'enthalpie massique de vapeur en équilibre avec la phase liquide  $h_v(T)$ , de l'entropie massique de la phase liquide en équilibre avec la vapeur  $s_l(T)$ , ainsi que du titre massique en vapeur  $x$  et de la température  $T$ .
- 5) Donner alors les expressions de  $h(T, x)$  et  $s(T, x)$  en fonction de  $x$ ,  $h_l(T)$  (ou  $s_l(T)$  respectivement) et de  $L_v(T)$ , enthalpie massique de vaporisation.
- 6) On suppose la compression adiabatique réversible dans le compresseur. Calculer  $T_2$ .
- 7) Tracer le cycle décrit par le fluide dans le circuit frigorifique sur le diagramme entropique (Annexe 1).
- 8) Tracer le cycle décrit par le fluide dans le circuit frigorifique sur le diagramme des frigoristes (Annexe 2).

- 9) Indiquer la température  $T_i$ , la pression  $p_i$  et l'état du fluide (liquide, vapeur ou diphasé) pour chaque état  $i$  ( $i = 1, 1', 2, 3, 4, 5$ ). Donner le titre massique  $x_i$  en vapeur pour chacun de ces points lorsqu'il existe.

*Document 2. Description du cycle*

On désire maintenir une température  $T_F = 293K$  ( $20^\circ C$ ) dans l'habitacle, la température de l'extérieur étant  $T_F = 308K$  ( $35^\circ C$ ).

Dans un premier temps, on considère que le fluide décrit, entre les pressions  $p_B$  et  $p_H$ , le cycle suivant :

**Compresseur** : A la sortie de l'évaporateur, de l'état 1' où il se trouve à l'état de vapeur sèche, le fluide est comprimé jusqu'à l'état 2.

**Condenseur** : Le condenseur situé à l'avant du véhicule entre le radiateur de refroidissement du moteur et des motoventilateurs de refroidissement, est un échangeur thermique dans lequel le fluide frigorigène échange de l'énergie avec le flux d'air créé par les motoventilateurs.

Dans la première partie du condenseur, le fluide passe de l'état 2 à l'état 3 en se refroidissant à la pression constante  $p_H$  jusqu'à ce que sa température atteigne la température de vapeur saturante correspondant à  $p_H$ . La condensation totale du fluide s'effectue ensuite dans la partie centrale à la pression  $p_H$  (état 4).

**Détendeur** : Dans le détendeur, parfaitement calorifugé et ne comportant pas de pièces mobiles, le fluide, de l'état 4, subit une détente isenthalpique jusqu'à la pression  $p_B$ , au cours de laquelle, une partie du fluide se vaporise (état 5).

**Evaporateur** : L'évaporateur est un échangeur thermique placé dans l'habitacle devant un ventilateur commandé par le conducteur, soufflant l'air qui se refroidit en échangeant de l'énergie avec le fluide frigorigène.

Le fluide frigorigène, partiellement vaporisé en 5 achève de se vaporiser à la pression  $p_B$  jusqu'à l'état 1.

Pour être sûr que le compresseur n'aspire que de la vapeur sèche (le liquide peu compressible peut provoquer la rupture de certaines pièces), la vapeur est surchauffée à la pression constante  $p_B$  de la température  $T_1$  à la température  $T_{1'}$  (état 1').

**Régulation du débit du liquide frigorigène** : Le fonctionnement correct du compresseur exige que la température à la sortie de l'évaporateur  $T_{1'}$ , soit supérieure à celle du changement d'état  $T_B$  afin d'éviter les traces de liquide dans le compresseur. La température  $T_{1'}$ , reste égale à une valeur de consigne  $T_0 = 283K$ .

On étudie dans la suite l'évolution du fluide au cours d'un cycle en régime permanent. Le débit massique est  $D_m = 0,1kg.s^{-1}$ .

*Document 3. Données*

Pour le fluide R134A, on donne :

La capacité thermique du liquide :  $c = 1,35kJ.kg^{-1}.K^{-1}$ .

La capacité thermique massique du gaz à pression constante :  $c_p = 0,488kJ.kg^{-1}.K^{-1}$ .

Le rapport  $\gamma$  :  $\gamma = 1,2$

La masse molaire du fluide R134A :  $M = 102g.mol^{-1}$ .

Constante des gaz parfaits :  $R = 8,31J.K^{-1}.mol^{-1}$

On suppose que le fluide à l'état liquide est incompressible et qu'il se conduit à l'état vapeur comme un gaz parfait.

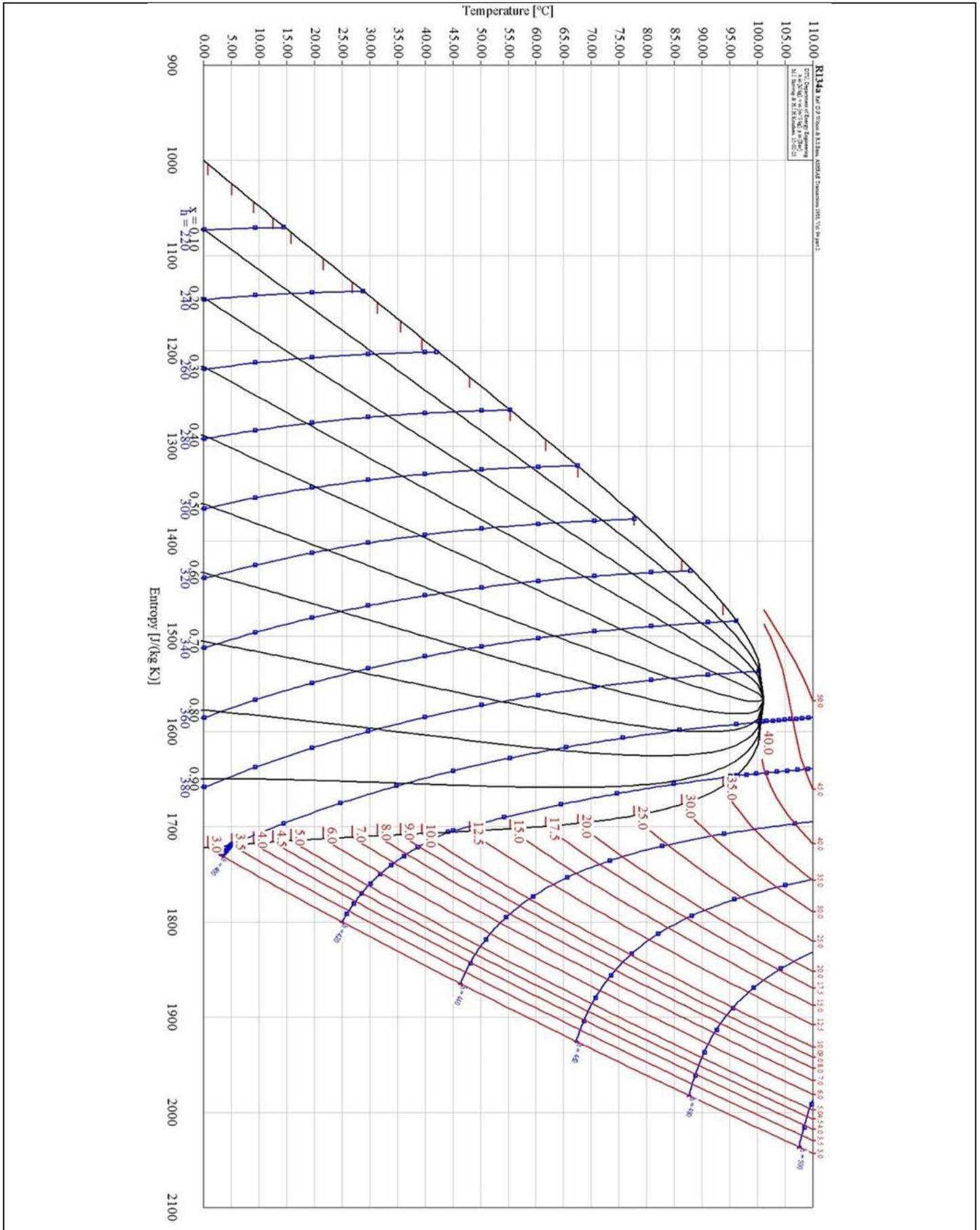
On suppose que les conduites reliant les différents appareils sont parfaitement calorifugées et que la pression qui y règne est constante. On néglige toutes les variations de vitesse du fluide et on raisonne sur 1 kg de fluide.

Température de changement d'état	$T_B = 278K(5^\circ C)$	$T_H = 323K(50^\circ C)$
Pression de vapeur saturante	$p_B = 3,5bar$ avec $p_B = p(T_B)$	$p_H = 14bar$ avec $p_H = p(T_H)$
Enthalpie massique de vaporisation	$L_v(T_B) = 196kJ.kg^{-1}$	$L_v(T_H) = 150kJ.kg^{-1}$

On rappelle que  $h_v(T)$  et  $h_l(T)$  sont respectivement l'enthalpie massique de la vapeur saturante et l'enthalpie massique du liquide saturant à la température T.

Annexe 1. Diagramme entropique du R134A (A rendre avec la copie)

Les isobares sont en bar avec  $p \in [3,0; 50]$ , les isenthalpes en  $\text{kJ.kg}^{-1}$  avec  $h \in [220; 500]$



Annexe 2. Diagramme enthalpique du R134A (A rendre avec la copie)

Les isothermes sont en °C avec  $T \in [-40; 100]$ , les isentropes en  $\text{kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$  avec  $s \in [0,85; 2,30]$

