



BLAISE PASCAL  
PT 2024-2025

TD 14 – Thermodynamique

# Diagrammes et tables thermodynamiques

- Difficulté d'analyse et compréhension, initiative requise ;
- Difficulté technique et calculatoire ;
- Exercice important.



Flasher ou cliquer pour accéder au corrigé

Ceinture		Proposition de parcours d'entraînement
	Ceinture blanche	Applications + exercices 1 et 4
	Ceinture jaune	Applications + exercices 1, 3, 4 et 6
	Ceinture rouge	Applications (★) + exercices 3 à 8
	Ceinture noire	Applications (★) + exercices 3 à 8

## Applications de cours

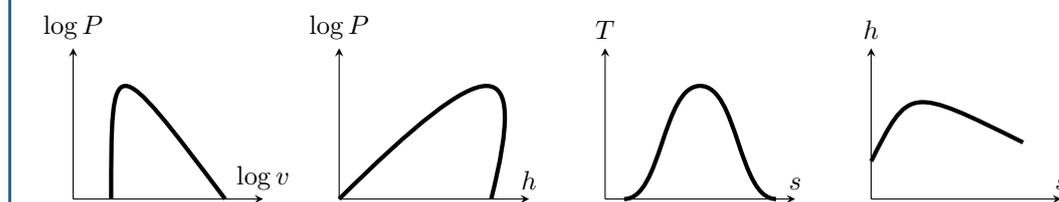
Seuls les étudiants du groupe PT\* seront interrogés en colle sur les applications marquées d'une étoile, car elles sont plus techniques et/ou moins essentielles ... mais tous les étudiants sont bien sûr invités à les travailler !

(★) 14.1 - Établir le théorème des moments pour une fonction au choix de l'interrogateur : volume, enthalpie ou entropie.

14.2 - Représenter l'allure d'un diagramme au choix de l'interrogateur et établir l'allure d'une famille de courbe iso dans des cas limites.

- ▷ diagramme de Clapeyron ( $P, v$ ) : isothermes (liquide + diphasé + gaz parfait) ;
- ▷ diagramme des frigoristes ( $P, h$ ) : isothermes (liquide + diphasé + gaz parfait) ;
- ▷ diagramme entropique ( $T, s$ ) : isobares (diphasé + gaz parfait) et isenthalpe (gaz parfait) ;
- ▷ diagramme de Mollier ( $h, s$ ) : isobares (diphasé) et isothermes (gaz parfait).

Je rappelle que l'allure de la courbe de saturation n'est pas une vague patate identique dans tous les diagrammes ...



14.3 - Par lecture du diagramme des frigoristes du R22 (page suivante), déterminer

- ▷ l'enthalpie de vaporisation sous 20 bar ;
- ▷ la pression de vapeur saturante à 20 °C ;
- ▷ l'état physique, l'enthalpie massique et l'entropie massique du fluide sous 3 bar et à 50 °C.

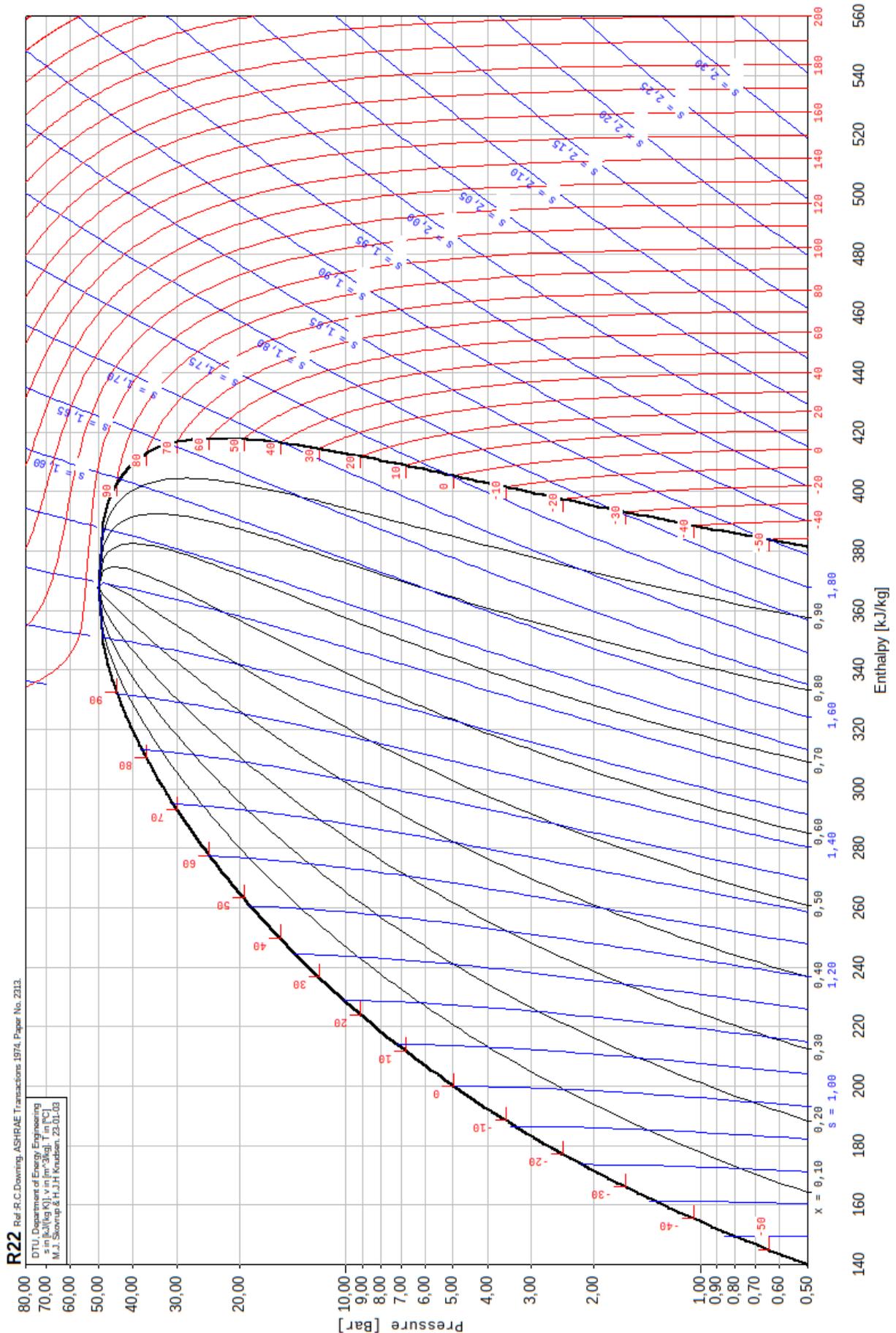


Figure 1 – Diagramme des frigorisistes du R22. Le cadre en haut à gauche indique les grandeurs représentées et leur unité : « s in kJ/(kgK), T in °C, v in m<sup>3</sup>/kg »

## Diagrammes thermodynamiques

### Exercice 1 : Lecture du diagramme des frigoristes



▷ *Diagramme des frigoristes.*

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  $T = 40^\circ\text{C}$ . 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  $+10^\circ\text{C}$  qui représente l'état (3). La vapeur sèche est alors comprimée de façon isentropique jusqu'à atteindre l'isobare de départ au point (4).

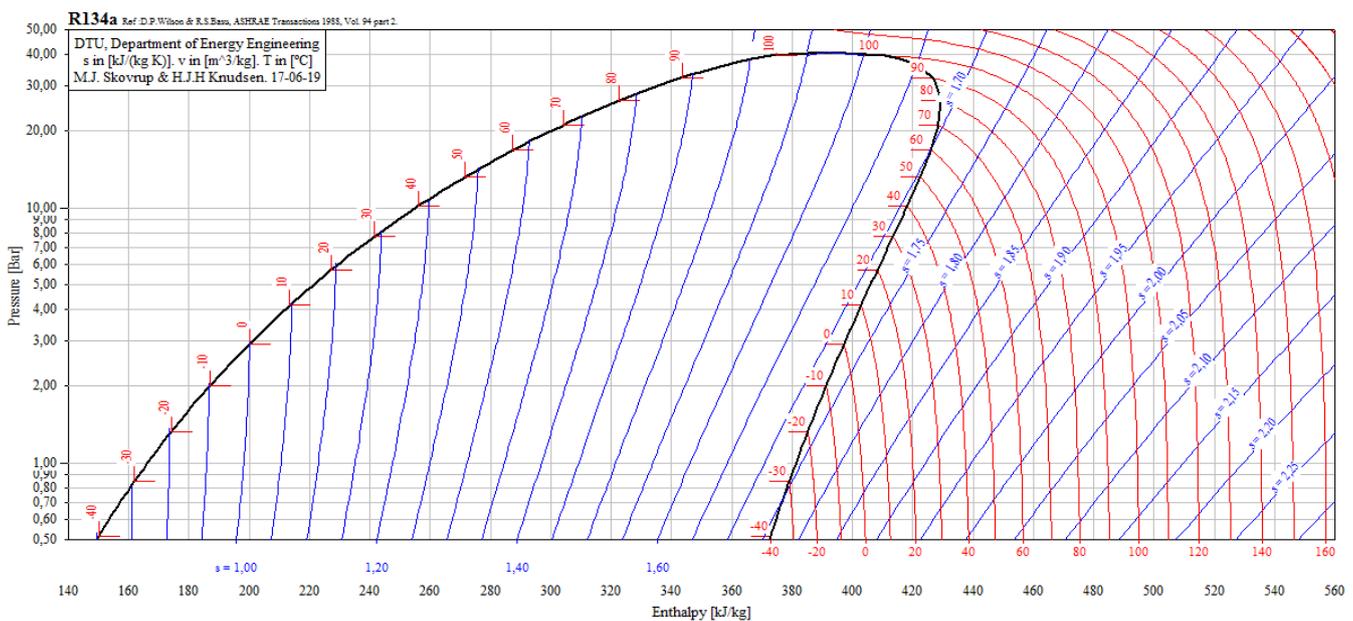


Figure 2 – Diagrammes des frigoristes du R134a.

- 1 - Placer les points (1) à (4) sur le diagramme des frigoristes représenté figure 2.
- 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 correspondant au liquide et à la vapeur saturants ?
- 4 - En déduire le titre en vapeur du point (2).

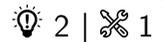
### Exercice 2 : Transformation affine dans le diagramme de Watt



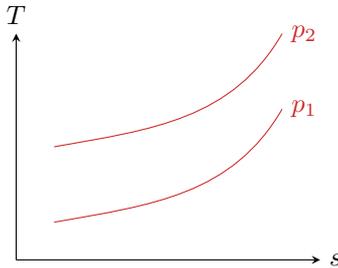
▷ *Diagramme de Watt ;*  
 ▷ *Modèle du gaz parfait.*

Un système contenant  $n_0$  mol de gaz parfait passe d'un état initial  $(P_0, V_0)$  à un état final  $(P_0/k, k V_0)$  lors d'une évolution mécaniquement réversible représentable par une droite dans le diagramme de Watt.

- 1 - Que peut-on dire des températures initiale et finale ?
- 2 - Par un argument graphique, montrer que la transformation n'est pourtant pas isotherme. Déterminer si la température passe par un maximum ou par un minimum au cours de la transformation.
- 3 - Établir l'équation de la courbe représentant la transformation en fonction de  $P_0$ ,  $V_0$  et  $k$ .
- 4 - Déterminer la température extrême.

**Exercice 3 : Positionnement relatif des isobares en diagramme entropique**

- ▷ *Diagramme entropique ;*
- ▷ *Modèle du gaz parfait.*



Le but de l'exercice est de déterminer la position relative des isobares en diagramme entropique en se plaçant dans la limite du gaz parfait : les isobares haute pression sont-elles au dessus ou au dessous des isobares basse pression ?

Pour répondre à la question initiale, raisonnons sur la compression isentropique d'un gaz parfait de la pression  $p_1$  à la pression  $p_2$ . On note  $T_1$  et  $T_2$  les températures initiale et finale.

- 1 - Établir l'équation d'une isobare en diagramme entropique dans la limite du gaz parfait.
- 2 - Représenter la transformation sur le diagramme ci-dessus.
- 3 - Exprimer  $p_2$  en fonction de  $p_1$ ,  $\gamma = c_P/c_V$ , et des températures.
- 4 - Justifier que  $\gamma > 1$ , et conclure.

**Exercice 4 : Détendeur de plongée**

- ▷ *Diagramme des frigoristes ;*
- ▷ *Principes de la thermodynamique.*

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  $29 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ .

- 1 - Représenter l'évolution subie par l'air sur le diagramme de la figure 3.
- 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.

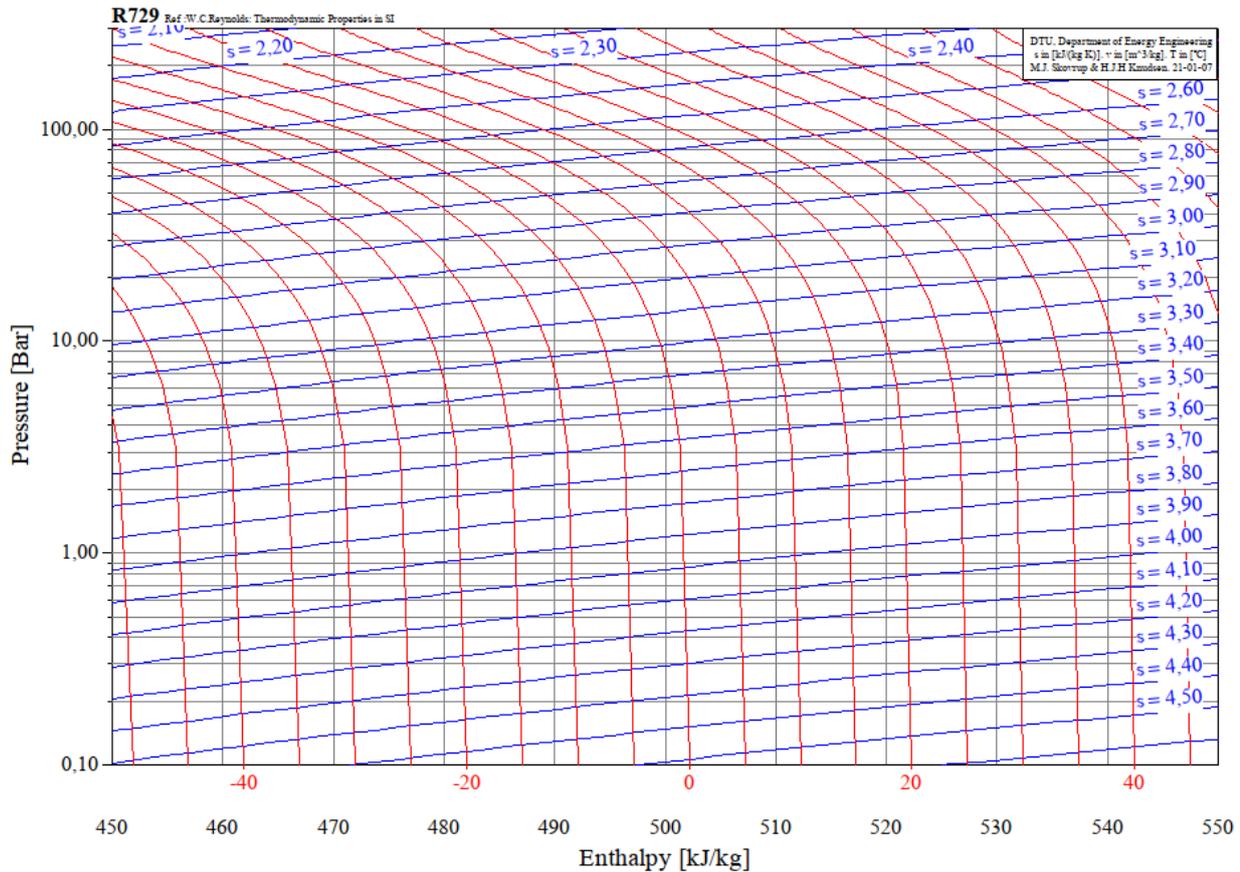
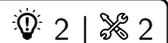


Figure 3 – Diagrammes des frigoris de l'air.  $T$  en  $^{\circ}\text{C}$ ,  $s$  en  $\text{kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

### Exercice 5 : L'air ambiant est-il un gaz parfait ?



- ▷ *Diagramme des frigoris;*
- ▷ *Représentation graphique.*

La figure 4 représente le diagramme  $(P, h)$  de l'air entre 0,1 et 200 bar. On cherche à savoir s'il est pertinent de le décrire par le modèle du gaz parfait dans les conditions atmosphériques usuelles  $P_A = 1 \text{ bar}$ ,  $T_A = 20^{\circ}\text{C}$ .

*Donnée :* masse molaire de l'air  $M = 29 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ .

- 1 - L'air vérifie-t-il l'équation d'état des gaz parfaits dans les conditions ambiantes ?
- 2 - L'allure des isothermes est-elle compatible avec la loi de Joule en tout point du diagramme ? dans les conditions ambiantes ?
- 3 - L'air dans les conditions atmosphériques vérifie-t-il la loi de Laplace ? En déduire une valeur de  $\gamma$ . On s'appuiera sur une représentation graphique adaptée. On donne figure 5 un pointage précis réalisé le long d'une isentrope.
- 4 - Estimer numériquement la capacité thermique massique  $c_p$  de l'air en ce point. Comparer à ce que prévoit le modèle du gaz parfait :

$$c_p = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{R}{M}.$$

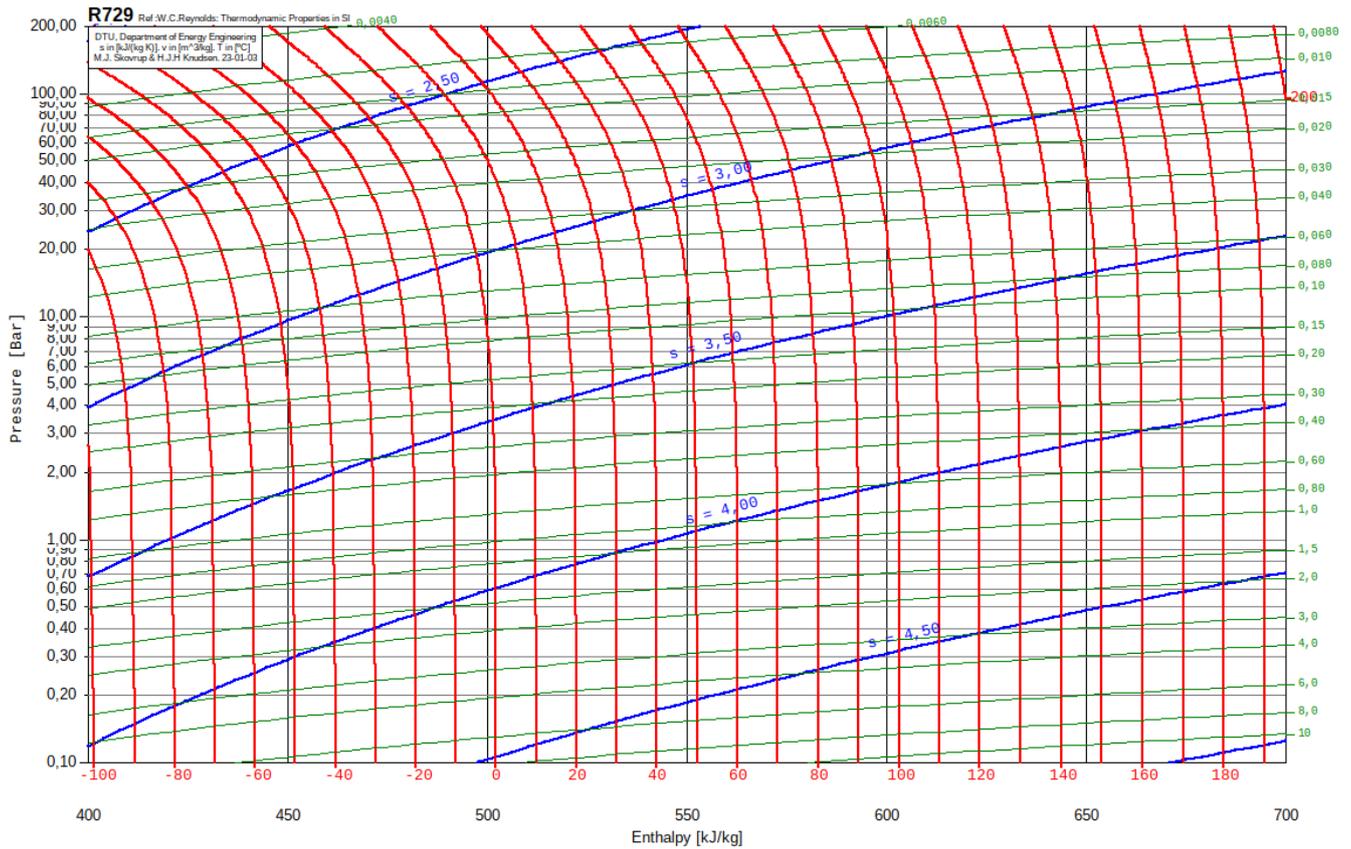


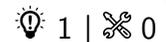
Figure 4 – Diagramme (P, h) de l'air. Les courbes représentées en trait fin légendées sur la droite du diagramme sont des isochores, c'est-à-dire des courbes le long desquelles  $v = cte$ .

$s$ ( $\text{kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
$T$ (K)	273	283	293	303	313
$\log T$	2,436	2,451	2,467	2,481	2,496
$P$ (bar)	0,605	0,689	0,772	0,868	0,982
$\log P$	-0,218	-0,162	-0,112	-0,061	-0,008
$v$ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	1,296	1,180	1,090	1,000	0,915
$\log v$	0,113	0,072	0,037	0	-0,039

Figure 5 – Coordonnées de différents points dans le diagramme.

## Tables thermodynamiques

### Exercice 6 : Table incomplète



- ▷ Table thermodynamique ;
- ▷ Relations entre grandeurs d'état.

Un extrait incomplet de la table des grandeurs thermodynamiques relatives à l'eau à saturation est donné figure 6.  $T$  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 la chaleur latente et l'entropie massique de vaporisation.

- 1 - Rappeler l'allure du diagramme des phase ( $P, T$ ) de l'eau. Quelles sont les limites de la courbe de vaporisation ? En déduire d'après la table la température et la pression au point triple et au point critique.
- 2 - Rappelez la relation entre  $h'$ ,  $h''$  et  $l_{vap}$  ainsi que celle entre  $s'$ ,  $s''$  et  $s_{vap}$ .
- 3 - Quelle est, d'après la table, l'origine des entropies massiques ? Commenter.
- 4 - Rappelez la relation entre l'énergie interne massique  $u$ , l'enthalpie massique  $h$ , la pression  $P$  et le volume

$T$ °C	$P_s$ kPa	$v'$ $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	$v''$ $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	$h'$ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	$h''$ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	$l_{\text{vap}}$ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	$s'$ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$s''$ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$s_{\text{vap}}$ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
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

Figure 6 – Extrait de table incomplet.

massique  $v$ . Justifier alors qu'il ne soit pas nécessaire d'ajouter à la table les valeurs de  $u'$  et  $u''$ .

5 - Compléter les cases vacantes du tableau.

### Exercice 7 : Détente isochore d'une vapeur d'eau

💡 2 | ✂ 1



- ▷ Table thermodynamique ;
- ▷ Principes de la thermodynamique.

Un récipient fermé et indéformable, de volume  $V = 1,00 \text{ L}$ , contient dans l'état initial  $I$  de la vapeur d'eau saturante à  $T_I = 485 \text{ K}$ . On le met en contact avec un thermostat à température  $T_0 = 373 \text{ K}$ . L'équilibre atteint est l'état  $F$ .

Donnée : extrait de table de la vapeur saturante.

		Liquide juste saturé $x_V = 0$			Vapeur saturante $x_V = 1$		
$T$ K	$p$ bar	$v_L$ $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	$h_L$ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	$s_L$ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$v_V$ $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	$h_V$ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	$s_V$ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
485	20	$1,18 \times 10^{-3}$	909	2,45	0,0998	2801	6,35
373	1	$1,04 \times 10^{-3}$	418	1,30	1,70	2676	7,36

- Déterminer la masse d'eau contenue dans le récipient.
- Montrer que l'état final est un mélange diphasé. Calculer son titre en vapeur.
- Quelles sont les caractéristiques de la transformation ? Déterminer la chaleur échangée par l'eau.
- Calculer l'entropie dans les états  $I$  et  $F$ . Conclure sur le caractère réversible ou non de la transformation étudiée.

### Exercice 8 : Table de vapeur sèche

💡 2 | ✂ 1



- ▷ Table thermodynamique ;
- ▷ Modèle du gaz parfait.

La figure 7 reproduit une table de la vapeur sèche pour l'eau. On rappelle sa masse molaire  $M = 18 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ .

- Déterminer la masse volumique de la vapeur d'eau à  $300 \text{ °C}$  sous pression de 1 bar.
- À quelle température faut-il se placer pour obtenir un mélange diphasique liquide-vapeur sous une pression de 200 kPa ?
- Quel est l'état physique d'eau portée à une température de  $150 \text{ °C}$  sous une pression de 500 kPa ?
- De la vapeur d'eau à  $100 \text{ °C}$  sous 1 bar peut-elle être assimilée à un gaz parfait ?

$p$ (kPa) $T_{\text{sat}}$ (°C)		$T$ en °C				
		100	150	200	250	300
<b>100</b> (99,606)	$v$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ )	1,6960	1,9367	2,1725	2,4062	2,6389
	$h$ ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	2675,77	2776,59	2875,48	2974,54	3074,54
	$s$ ( $\text{kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	7,3610	7,6147	7,8356	8,0346	8,2171
<b>200</b> (120,21)	$v$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ )		0,96989	1,0805	1,1989	1,3162
	$h$ ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )		2769,09	2870,78	2971,26	3072,08
	$s$ ( $\text{kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ )		7,2809	7,5081	7,7100	7,8940
<b>500</b> (151,84)	$v$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ )			0,42503	0,47443	0,52260
	$h$ ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )			2855,90	2961,13	3064,60
	$s$ ( $\text{kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ )			7,0611	7,2726	7,4614

Figure 7 – Table de la vapeur sèche.