

Figure – Les différents usuels de l'eau

	solide	liquide	vapeur
$\rho$ en $kg.m^{-3}$	917	1000	0,58

**Table** – Masse volumique de l'eau glace (à  $0^{\circ}C$ ), liquide (à  $20^{\circ}C$ ) et vapeur ( $100^{\circ}C$ )

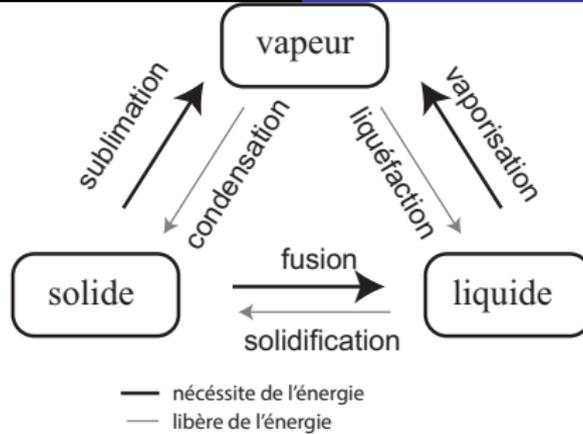


Figure – Dénomination des différents changement d'état

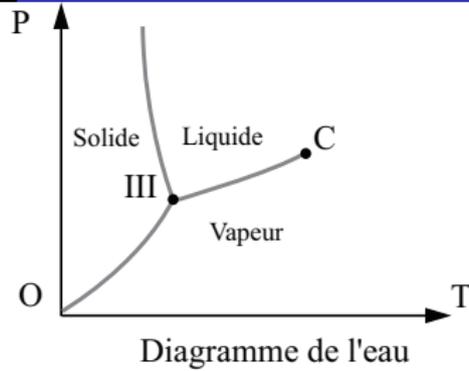
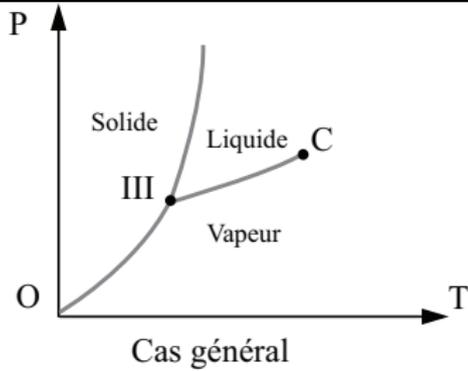
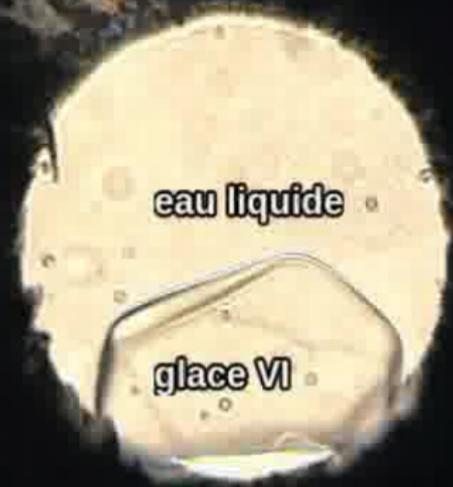


Figure – Diagramme P,T usuels et exceptionnels.





$T \approx 295\text{K}$  diam. chambre  $\approx 150\mu\text{m}$   
 $P \approx 0,9\text{Gpa}$



(C) ENS Lyon 2011



Figure – Glace VI "qui coule" dans une enclume à diamant.

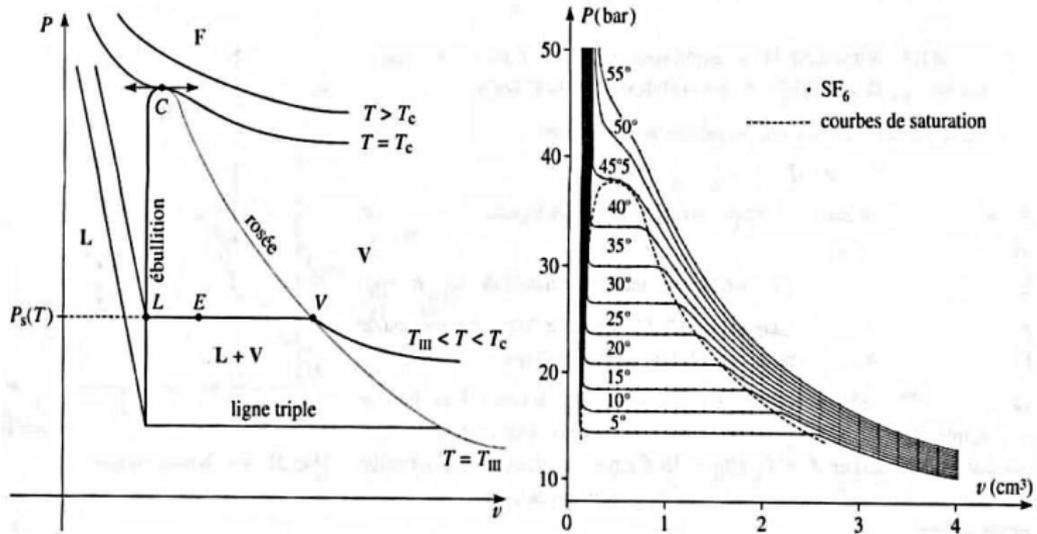


Figure – Réseau isotherme d'Andrews

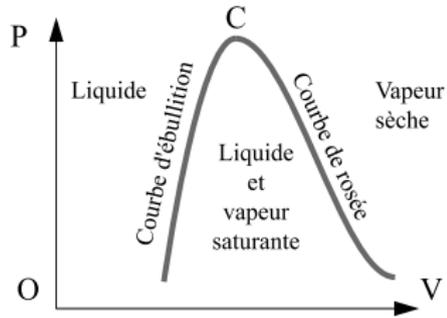


Figure – diagramme de Clapeyron simplifié

## Definition

Pour un système de volume  $V$  et de masse  $m$ , on définit le titre massique en vapeur  $x_V$  (resp. en liquide  $x_L$ ) par le rapport de la masse en vapeur (resp. du liquide) sur la masse du système ( $m$ ).

$$x_V = \frac{m_V}{m} \quad \text{et} \quad x_L = \frac{m_L}{m}$$

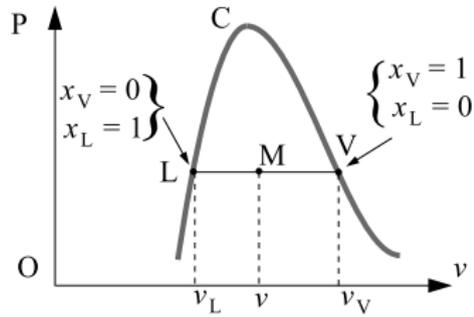
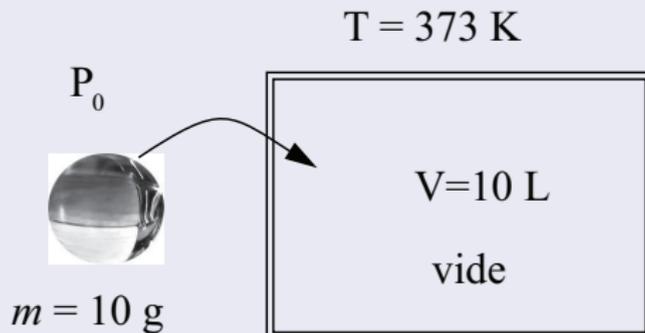


Figure – illustration du théorème des moments

## Exemple

On place une masse  $m = 10 \text{ g}$  d'eau liquide dans un volume  $V = 10 \text{ L}$  initialement vide. L'ensemble est au contact d'un thermostat à la température de  $100^\circ\text{C}$ .



Déterminer la fraction de liquide qui s'est vaporisée en supposant que la vapeur se comporte comme un gaz parfait.

Données :  $M_{\text{eau}} = 18 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ ,  $P_S(100^\circ\text{C}) = 1,0 \text{ bar}$ ,  $R = 8,3 \text{ SI}$



Figure – Machine de métallisation industrielle. Alliance Concept. *D'après [www.alliance-concept.com](http://www.alliance-concept.com).*

## Definition

L'enthalpie de changement d'état (ou chaleur latente de changement d'état) d'un corps pur est par définition la variation d'enthalpie  $\Delta H = H_2 - H_1$  qui accompagne le passage du système de masse  $m$  d'un état physique 1 à un état physique 2 sous une pression donnée :

$$\Delta H_{1 \rightarrow 2} = m \Delta h_{1 \rightarrow 2}$$

où  $\Delta h_{1 \rightarrow 2}$  est la variation massique d'enthalpie lors du changement de phase  $1 \rightarrow 2$ .

Changement d'état	Variation d'enthalpie
vaporisation ( $\Delta h_{vap}$ )	2264 kJ.kg <sup>-1</sup>
fusion ( $\Delta h_{fus}$ )	330 kJ.kg <sup>-1</sup>

Table – Enthalpie massique de changement d'état pour l'eau sous 1 bar

## Definition

L'entropie de changement d'état d'un corps pur est par définition la variation d'enthalpie  $\Delta S = S_2 - S_1$  qui accompagne le passage du système d'un état physique 1 à un état physique 2 sous une pression  $P_{sat}$  à la température  $T_{eq}$ .

Ainsi,

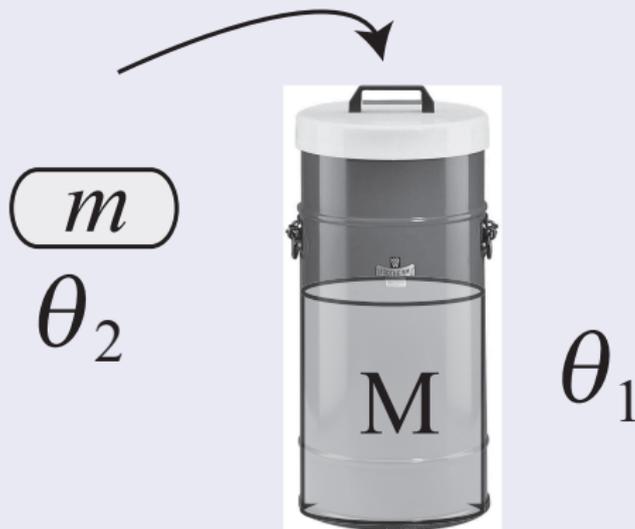
$$\Delta S_{1 \rightarrow 2} = m \frac{\Delta h_{1 \rightarrow 2}}{T_{eq}}$$

où  $\Delta h_{1 \rightarrow 2}$  est la chaleur latente massique de changement de phase  $1 \rightarrow 2$  à la température  $T_{eq}$ .



## Exemple

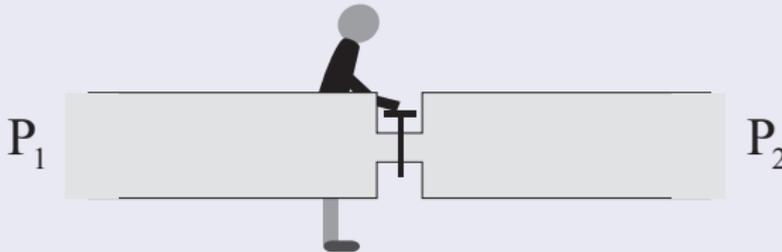
On dépose dans un récipient parfaitement calorifugé, une masse  $M = 1,00 \text{ kg}$  d'eau liquide à la température  $\theta_1 = 20^\circ\text{C}$  ainsi qu'un glaçon de masse  $m = 300 \text{ g}$  à la température  $\theta_2 = 0^\circ\text{C}$ .



- 1 - Déterminer l'état final. On supposera que la transformation se déroule sous une atmosphère.
- 2 - Déterminer l'entropie créée lors de la transformation.

## Exemple (Détente de Joule Thomson)

*Un fluide passe dans une canalisation calorifugée munie d'un pointeau.  
La pression en amont est de  $P_1$ , la pression en aval est de  $P_2$ .  
L'écoulement est stationnaire.*

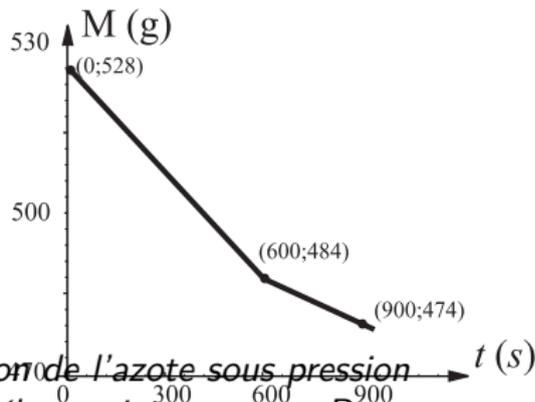
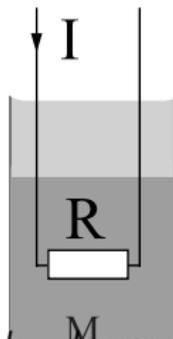


*Montrer que la détente est isenthalpique.*



## Exemple

Sous pression atmosphérique, la température d'équilibre liquide-gaz du diazote est  $T_{\text{eq}} = 77,4 \text{ K}$ . Afin de mesurer



la chaleur latente  $\Delta h_V$  de vaporisation de l'azote sous pression constante, on place sur une balance électronique un vase Dewar ouvert contenant de l'azote liquide : la diminution de la masse mesurée  $M$  au cours du temps traduit l'évaporation de l'azote.

phase (1) : entre  $t = 0$  et  $t = t_1$ , on alimente une résistance  $R$  plongée dans le calorimètre : tension  $U$  et intensité  $I$  constantes ;

phase (2) : le chauffage est coupé à  $t_1 = 10 \text{ min}$ .

La masse  $M$  mesurée en grammes est enregistrée à intervalles réguliers de  $t = 0$  à  $t_2 = 15 \text{ min}$

1. Comment évolue la température du liquide supposé homogène ?



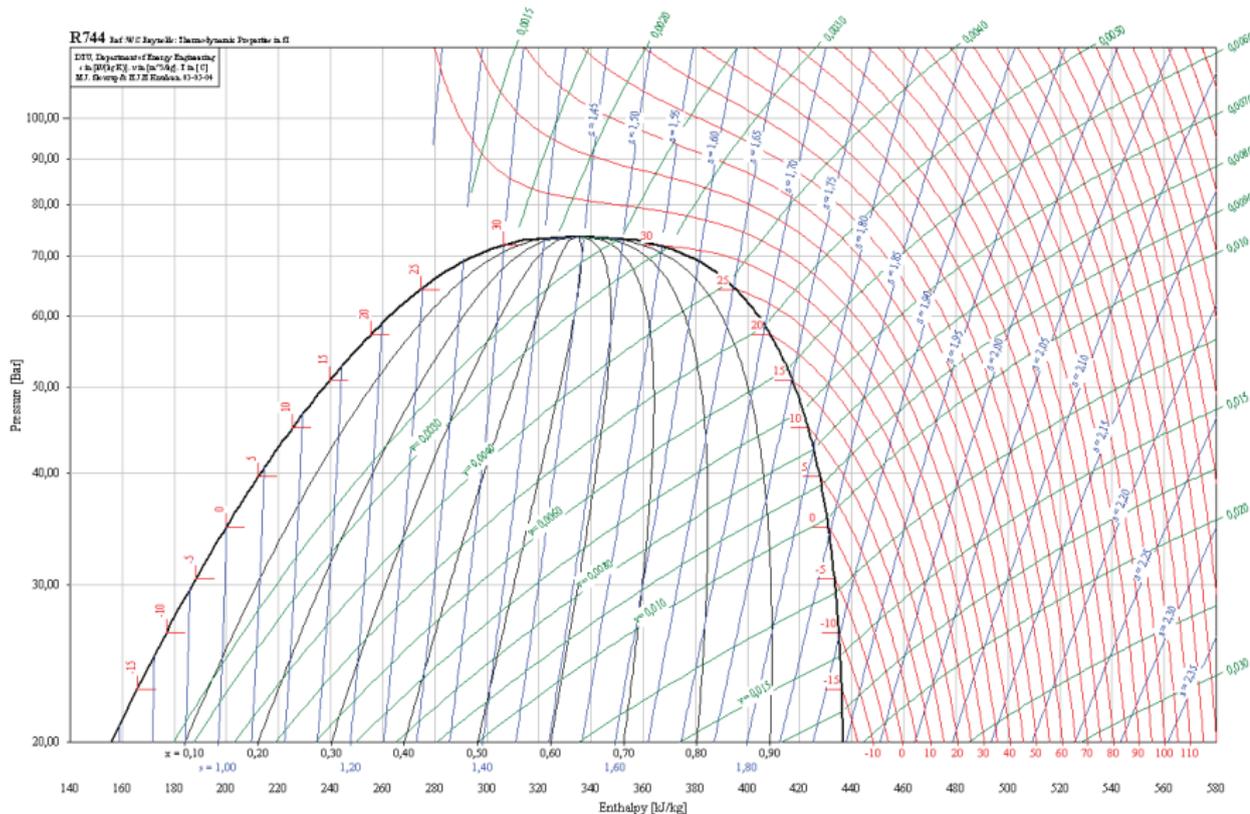


Figure – Diagramme enthalpique du Dioxyde de carbone (R744)

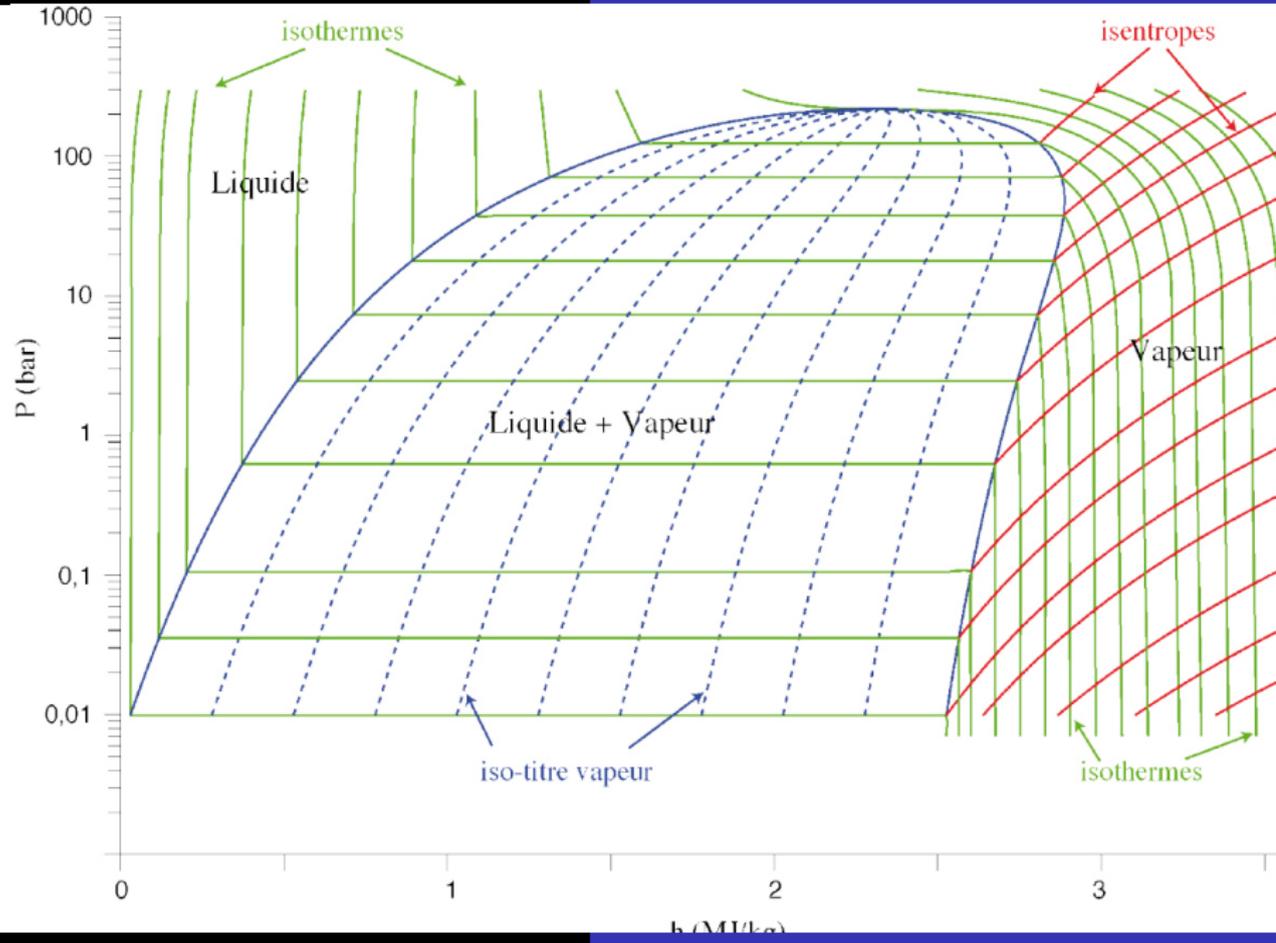
## Exemple

*Le R744, ou dioxyde de carbone, fait une nouvelle apparition dans le monde de la réfrigération industrielle car son impact environnemental est beaucoup moins nuisibles que les fluides frigorigènes usuels. En utilisant le diagramme fourni :*

- 1 - Représenter l'isotherme à  $\theta = 20^\circ\text{C}$  et déterminer la pression de vapeur saturante à  $20^\circ\text{C}$ .*
- 2 - Déterminer l'enthalpie de vaporisation à  $20^\circ\text{C}$ .*
- 3 - Déterminer la capacité thermique massique du liquide  $c_p$ . On supposera que cette grandeur est indépendante de la température pour des conditions de pression éloignées du point critique.*
- 4 - Le  $\text{CO}_2$  peut il être considéré comme un gaz parfait dans les conditions du diagramme.*
- 5 - Déterminer l'état final d'une détente adiabatique d'un liquide saturant passant de 58 bar à 30 bar.*







## Exemple

*D'après Oral CCP 18*

*Par lecture sur le diagramme de l'eau (R718) ci-joint :*

- 1 - Déterminer la chaleur latente de vaporisation à 373 K.*
- 2 - Déterminer la capacité thermique du liquide en supposant que celle-ci est constante entre 20° C et 80° C.*
- 3 - Justifier que les isothermes sont quasi-verticales dans le domaine de la vapeur sèche.*
- 4 - Continuer l'isotherme 60° C à l'intérieur de la courbe de saturation et dans le domaine du liquide.*







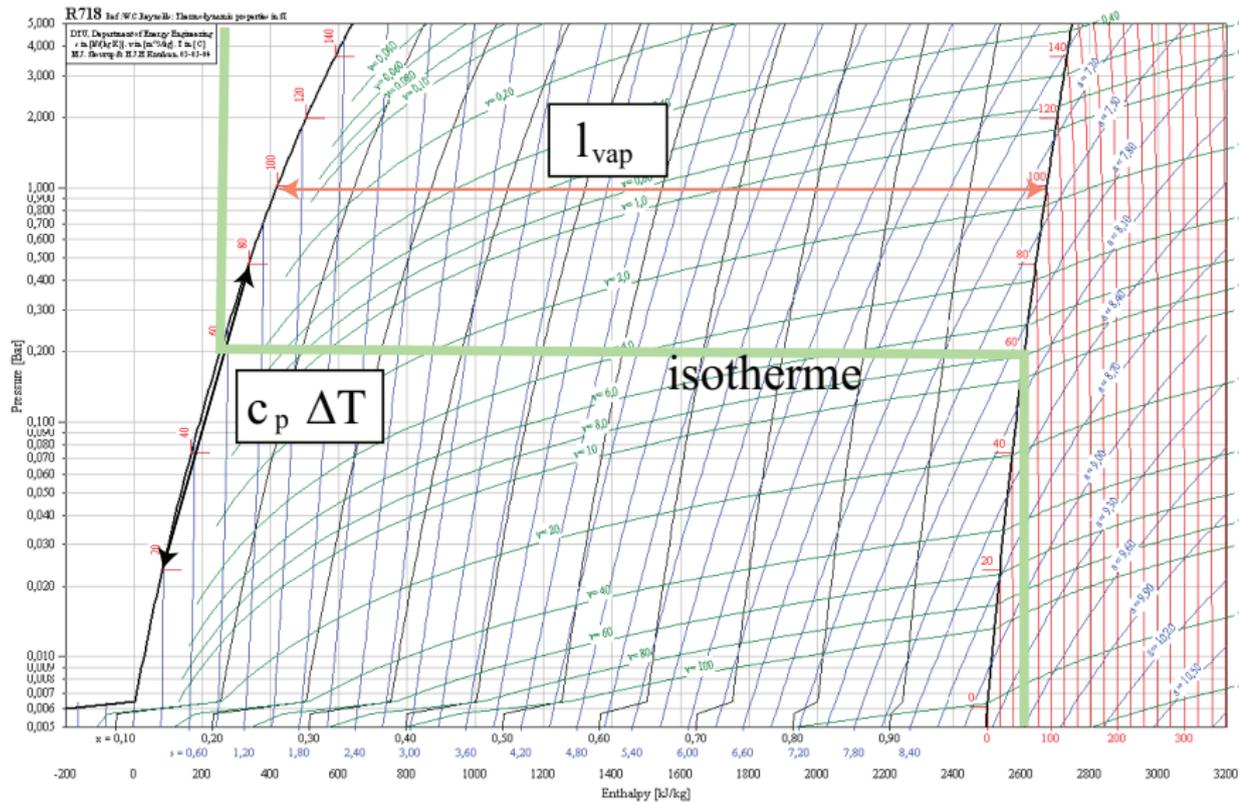
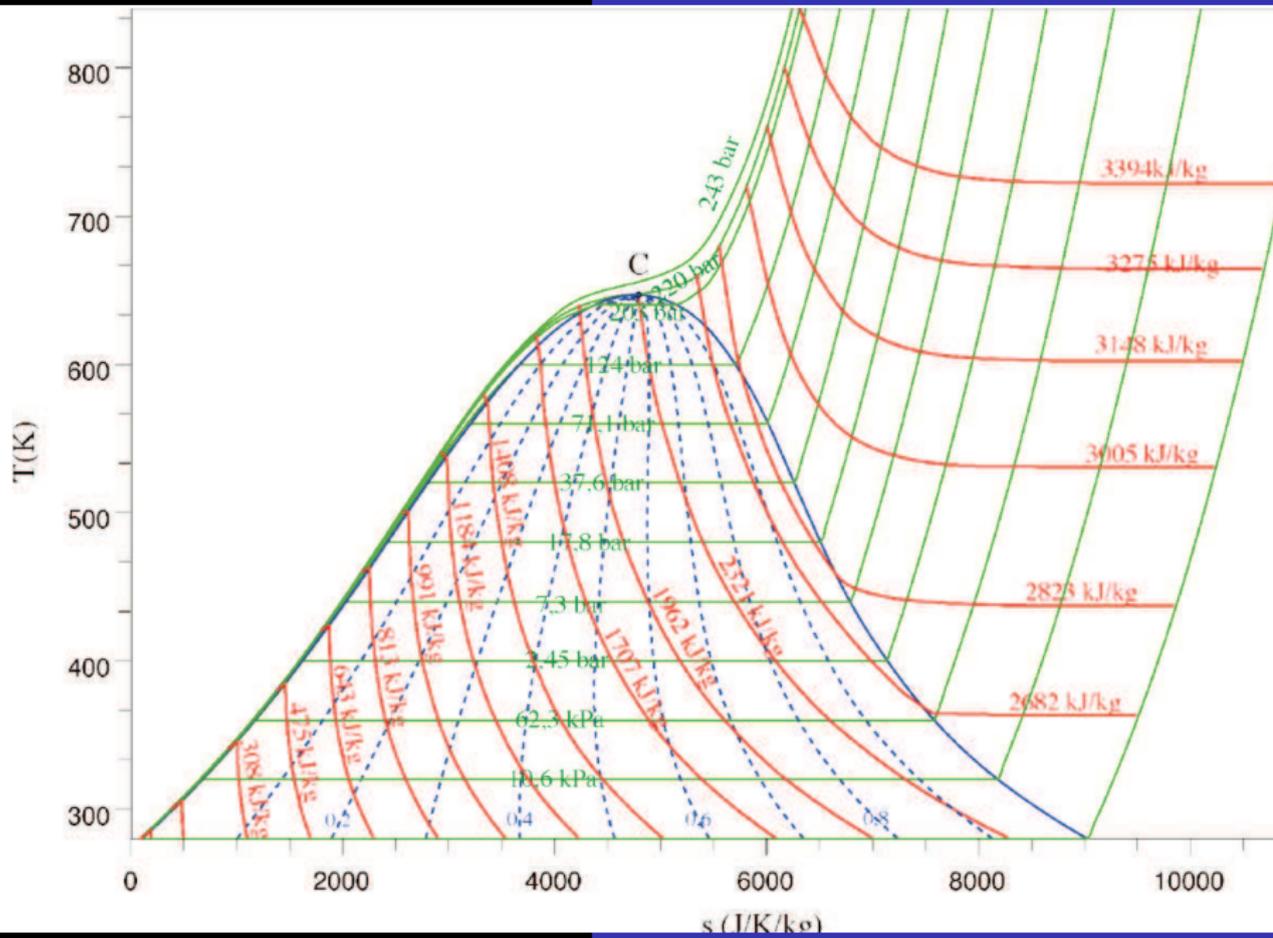


Figure – Diagramme enthalpique de l'eau





## Exemple

*Un compresseur permet de comprimer de façon adiabatique réversible de la vapeur saturante à 373 K de la pression  $P_1 = 1,0$  bar à la pression  $P_2 = 3,3$  bar. On admettra que la vapeur se comporte comme un gaz parfait de coefficient isentropique  $\gamma = 1,32$ .*

- 1 - Déterminer la température du fluide en sortie du compresseur.*
- 2 - Représenter la transformation dans le diagramme entropique.*