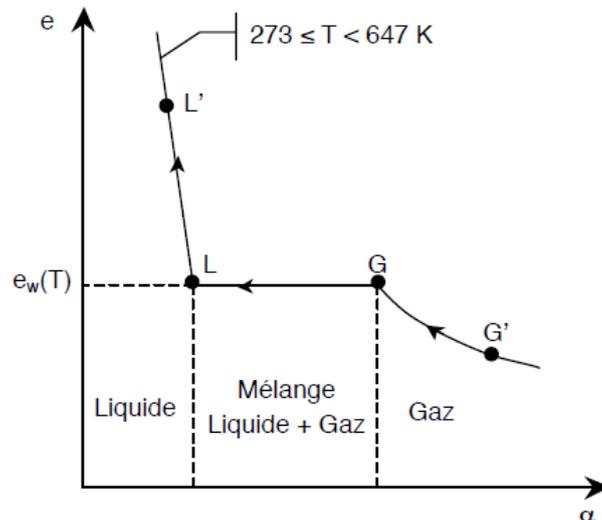


## Chapitre 3 : Thermodynamique des Vapeurs et de l'Air Humide

### I. Thermodynamique des Vapeurs

Changement de phases d'un corps pur:



Si, à une température  $273 \leq T < 647 \text{ K}$ , on considère de la vapeur d'eau en équilibre à une pression  $e$  faible occupant un volume spécifique  $\alpha$  relativement grand et qu'on la comprime de façon isotherme, on observe d'abord ( $G'$  à  $G$ ) un comportement "normal" pour un gaz homogène.

Si l'on tente alors de poursuivre la compression de la vapeur, on observe que la pression du système demeure constante à la valeur  $e_w(T)$  que l'on dit d'équilibre entre la vapeur et le liquide" en même temps qu'apparaît du liquide, résultat de la condensation de la vapeur.

De  $G$  à  $L$ , on assiste à la transformation graduelle de la phase gazeuse à la phase liquide dans des conditions stables de température et de pression.

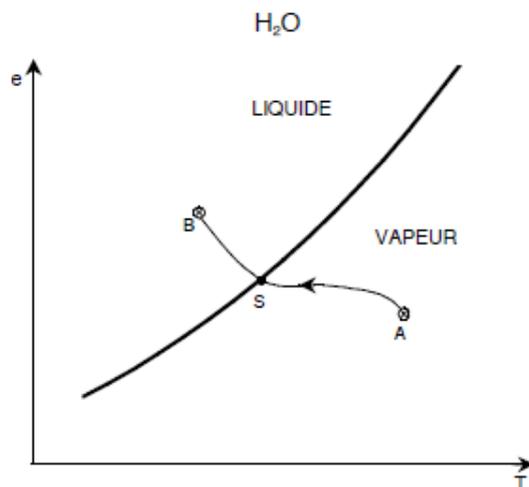
Au point  $L$ , la transition de phase est complétée et la substance est entièrement liquide. Cela se manifeste par le fait qu'une diminution subséquente du volume spécifique ( $L$  à  $L'$ ) n'est possible qu'au prix d'une augmentation considérable de la pression.

## Calcul de variables d'états

### Notion de sursaturation

Considérons, à titre d'exemple, de la vapeur d'eau, prise initialement dans l'état A, à laquelle on fait subir le processus représenté par AB. De A à S la substance est dans la phase gazeuse "Normalement", en S, on assiste à la transformation de phase vapeur  $\rightarrow$  liquide et de S à B la substance se manifeste sous forme liquide.

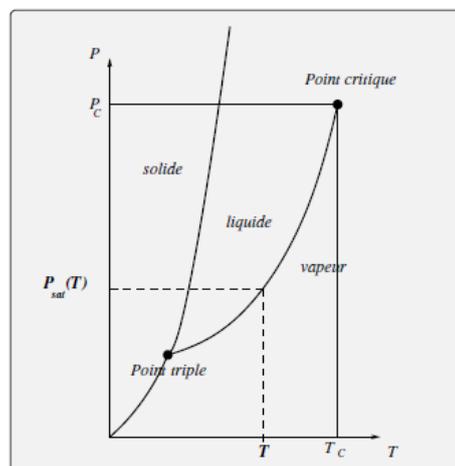
Sous certaines conditions, il peut cependant arriver que la substance se manifeste sous forme de vapeur de A jusqu'à B. Les états de la *vapeur* représentés par le segment SB sont alors dits sursaturés ( $e > e_w$ ).



### 1. Pression de vapeur saturante

A une température  $T$  donnée, l'équilibre d'un liquide et de sa vapeur n'est possible que sous une pression  $P$  qui est la *pression de vapeur saturante*. La courbe représentant la *pression de vapeur saturante* en fonction de la température, distingue deux états du fluide :

- si  $P < P_{sat}$  le fluide est dans l'état gazeux,
- si  $P > P_{sat}$  le fluide est dans l'état liquide,
- si  $P = P_{sat}$  le fluide est en équilibre liquide-vapeur.



## 2. Caractéristiques du point critique

La courbe de pression de vapeur s'arrête brusquement au point critique C : la liquéfaction du gaz ne peut s'observer qu'au dessous de la température critique  $T_C$ .

Pour l'eau :

Point triple :	$T = 273,16^\circ K$ $P = 611 Pa$
Point critique :	$T = 647^\circ K$ $P = 221 \cdot 10^5 Pa$

## 3. Approximation algébrique de la pression de vapeur saturante en fonction de la température

De nombreuses formules ont été proposées pour représenter algébriquement la courbe de la pression de vapeur saturante. La formule de Duperray donne une bonne approximation pour l'eau entre  $100^\circ C$  et  $200^\circ C$ .

$$P = \left( \frac{t}{100} \right)^4$$

Unités :  $[P] : atm.$      $[t] : ^\circ C$

## 4. Chaleur latente de vaporisation : $L_V$

Démonstration (simplifiée) de la formule de Clapeyron :

Considérons un cycle de Carnot ditherme fonctionnant entre deux sources aux températures voisines  $T_0$  et  $T_0 + \Delta T$  selon le cycle représenté ci-dessous :

Le rendement du cycle vaut d'après le théorème de Carnot :

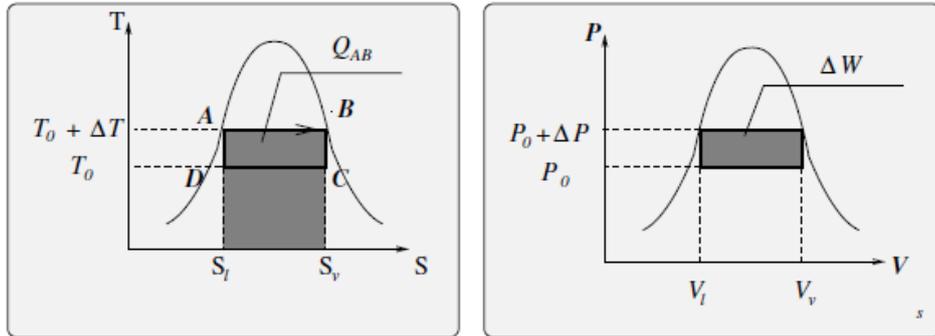
$$\eta = 1 - \frac{T_0}{T_0 + \Delta T} = \frac{\Delta T}{T_0}$$

or :

On appelle chaleur latente de vaporisation la quantité de chaleur qu'il faut fournir à l'unité de masse du liquide à la température  $T$ , sous la pression d'équilibre  $P$ , pour la transformer en vapeur à la même température et sous la même pression. La chaleur latente de vaporisation diminue lorsque la température s'élève pour s'annuler au point critique. La formule de Clapeyron permet de relier la chaleur latente de vaporisation à la pente de la courbe :

$$L_V = T (u_{vap} - u_{liq}) \frac{dP}{dT} \quad [J \cdot kg^{-1}]$$

$u_{vap}$  : volume massique de la vapeur à la température  $T$ .  
 $u_{liq}$  : volume massique du liquide à la température  $T$ .



$$\eta = \frac{\Delta W}{Q_{\text{absorb.}}} = \frac{\Delta W}{Q_{AB}} = \frac{\int -P dV}{\int T dS} = \frac{\Delta P (V_V - V_L)}{T_0 (S_V - S_L)}$$

On a donc :

$$\frac{\Delta T}{T_0} = \frac{\Delta P (V_V - V_L)}{T_0 (S_V - S_L)}$$

Soit :

$$\frac{\Delta P}{\Delta T} = \frac{S_V - S_L}{V_V - V_L} = \frac{L_{L \rightarrow V}}{T (V_V - V_L)}$$

Pour l'unité de masse, et si  $\Delta T \rightarrow 0$  alors :

$$\begin{cases} \frac{\Delta P}{\Delta T} \rightarrow \frac{dP}{dT} \\ V_L \rightarrow u_L \\ V_V \rightarrow u_V \end{cases}$$

La formule de Clapeyron s'écrit :

$$L_V = T (u_{\text{vap}} - u_{\text{liq}}) \frac{dP}{dT}$$

## Titre en vapeur

Lors d'un changement d'état, les états liquides et gazeux coexistent. Le titre est la proportion de vapeur dans le mélange eau-vapeur.

## Notation : X

## Unité : % (nombre sans dimension)

Au début de la vaporisation le titre est de 0. Quand toute l'eau est passée en vapeur le titre est de 1. La chaleur latente augmente au fur et à mesure que le titre augmente. Cela veut dire que pour connaître l'enthalpie massique d'un mélange eau-vapeur, il faut savoir sa pression, sa température mais aussi son titre. Il existe dans les diagrammes des lignes de même titre appelées isotitres

## Diagrammes thermodynamiques

Différents paramètres interviennent pour caractériser un fluide :

Pression unité Pascal (en bars dans les diagrammes,  $1b = 100\ 000\ Pa$ ) Volume unité  $m^3$ . ( les diagrammes utilisent le volume massique  $m^3/kg$ )

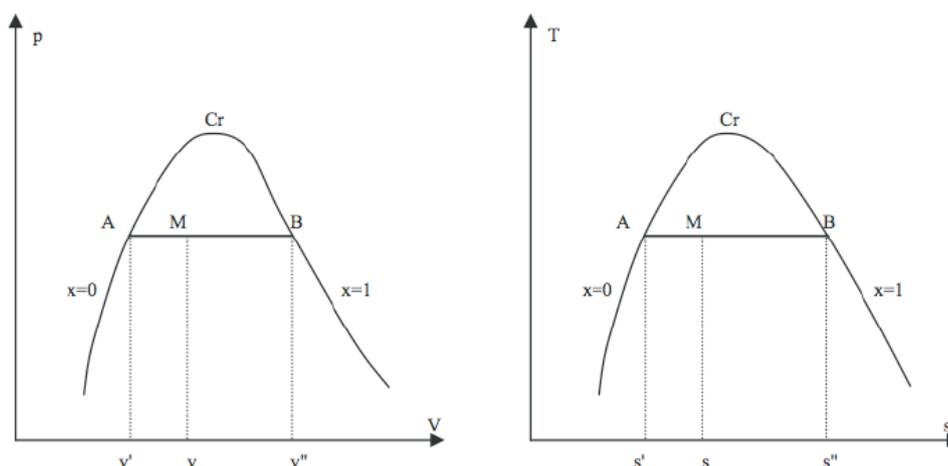
Température unité K ( en Celcius dans les diagrammes)

Enthalpie unité J (les diagrammes donnent l'enthalpie massique en  $kJ/kg$ )

Entropie unité  $J/K$  (les diagrammes donnent l'entropie massique en  $kJ/kg.K$ )

Deux de ces cinq variables sont indépendantes. C'est très pratique car il suffit d'en calculer ou mesurer 3 pour connaître les 2 autres à l'aide de tables ou plus facilement encore sur des diagrammes. En phase de changement d'état, il faut également connaître le titre

Il y a plusieurs diagrammes utilisés.

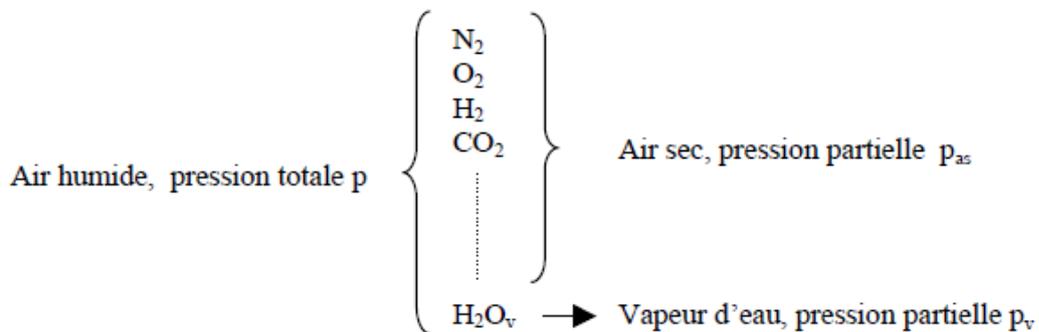


Pratiquement :  $x = AM/AB$

## II. L'air humide

### Caractéristiques de L'air humide

Si les principaux constituants de l'air sont l'oxygène et l'azote, l'air n'en contient pas moins un certain nombre d'autres gaz, tel que la vapeur d'eau :

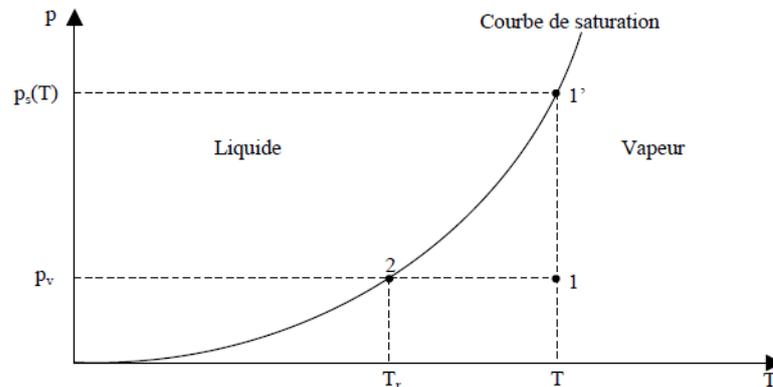


La pression partielle  $P_v$  de vapeur d'eau dans l'atmosphère n'est jamais nulle quelque soit le lieu et la saison, même si sa valeur peut varier fortement. Par exemple on note les valeurs mensuelles moyennes suivantes à Ouagadougou (climat sahélien) :  $P_v = 4 \text{ mmHg}$  en février et  $P_v = 20 \text{ mmHg}$  en avril.

$$P = P_{as} + P_v$$

### Températures et humidités

Représentons dans un diagramme (P, T) le point 1 représentatif de la vapeur d'eau de pression partielle  $p_v$  contenue dans de l'air de température T et de pression totale p :



$P_s(T)$  est la pression de saturation (d'équilibre liquide-vapeur) de la vapeur d'eau à la température T. On peut également utiliser la **formule de Dupré** valable entre  $-50^\circ\text{C}$  et  $+200^\circ\text{C}$  pour calculer  $P_s(T)$  :

$$p_s(T) = \exp \left[ 46,784 - \frac{6435}{T + 273,15} - 3,868 \ln (T + 273,15) \right]$$

Où : T Température en  $^\circ\text{C}$

$P_s(T)$  Pression de saturation en mmHg.

La vapeur d'eau se présente dans l'air sous forme de vapeur si  $P_v$  et  $P_s(T)$ , on définit alors l'**humidité relative HR** de l'air par la relation :

On définit une autre grandeur caractéristique de l'air humide : c'est l'**humidité absolue x** (Kg eau. Kg as<sup>-1</sup>) définie comme étant la masse de vapeur d'eau contenue dans l'air par kg d'air sec :

$$(0 \leq HR \leq 100\%)$$

$$HR = \frac{P_v}{P_s(T)} \times 100$$

$$x = \frac{m_v}{m_{as}}$$

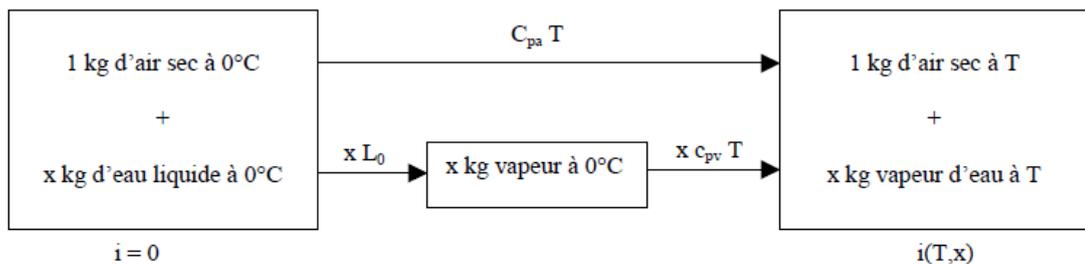
Où  $m_v$  et  $m_{as}$  sont les masses de vapeur d'eau et d'air sec contenues dans un même volume  $V$  d'air humide,  $(1+x)$  kg d'air humide contient donc 1 kg d'air sec et  $x$  kg de vapeur d'eau.

### Enthalpie spécifique

C'est la chaleur totale contenue dans une masse  $(1+x)$  d'air humide, l'origine des enthalpies correspondant à de l'air sec et à de l'eau liquide à 0°C.

L'*enthalpie spécifique i* s'écrit donc :

$$i(T, x) = C_{pa} T + x (L_0 + c_{pv} T)$$



- |      |          |  |  |
|------|----------|--|--|
| Où : | $C_{pa}$ | Chaleur massique de l'air sec                  | $C_{pa} = 1006 \text{ J.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ |
|      | $C_{pv}$ | Chaleur massique de la vapeur d'eau            | $C_{pv} = 1840 \text{ J.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ |
|      | $L_0$    | Chaleur latente de vaporisation de l'eau à 0°C | $L_0 = 2501 \text{ kJ.kg}^{-1}$                  |

## Diagramme de mollier

Ces diagrammes sont utilisés pour l'étude des machines thermiques en particulier les machines frigorifiques.

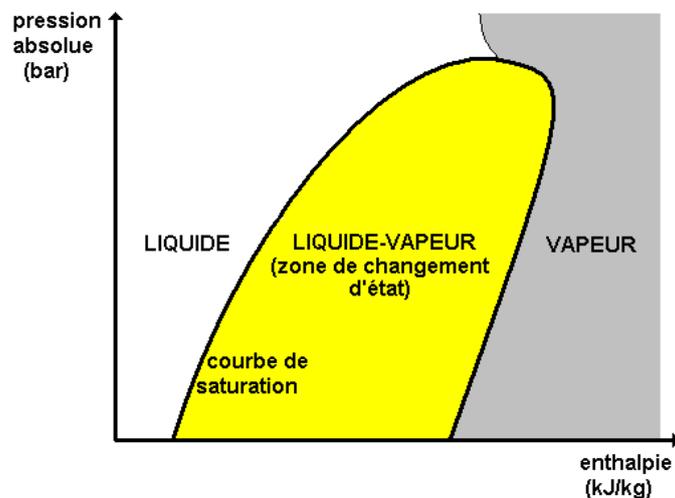
Ce diagramme permet de représenter et de relier graphiquement les paramètres essentiels d'un fluide :

- son état (liquide ou vapeur uniquement)
- sa pression
- sa température
- son enthalpie massique

Chaque fluide frigorigène a son diagramme qui permet de suivre l'évolution de ce fluide dans son circuit au cours de son cycle. Il est l'outil indispensable du technicien en énergétique.

Le diagramme est constitué :

- d'une échelle d'enthalpie massique (axe des abscisses)
- d'une échelle de pression **absolue** (axe des ordonnées)
- d'une courbe en « cloche » dite courbe de saturation qui découpe le diagramme en trois zones : liquide, liquide-vapeur et vapeur.



### Les principales familles de courbe du diagramme :

Le diagramme est constitué de différentes familles de courbe représentant les grandeurs physiques du fluide.

Les principales sont :

- les **isenthalpes** : ce sont les droites d'enthalpie massique constante, elles sont verticales.
- les **isobares** : ce sont les droites de pression constante, elles sont horizontales
- les **isothermes** : ce sont les courbes de température constante.
- les **isentropes** : ce sont les courbes où la transformation du fluide frigorigène s'effectue de façon réversible et sans échange de chaleur (avec l'extérieur) mais pas sans énergies.

- les **isotitres** : ce sont les courbes de pourcentage de vapeur constant dans la zone liquide-vapeur

$$\text{titre en vapeur} = \left[ \frac{\text{masse de vapeur}}{\text{masse de vapeur} + \text{masse de liquide}} \right] \times 100$$

