

# La Cryogénie

# ***CHAPITRE 1***

## ***Rappel Sur Les Principaux Processus D'obtention Des Basses Températures (02 semaines)***

<b>Sommaire</b>	<b>N° : pages</b>
<b>1. Introduction générale</b>	4
<b>1.1. Définition de la cryogénie :</b>	4
<b>1.2. Comportement des fluides</b>	4
<b>1.3. Diagramme de phase</b>	4
<b>2. Détente Joule-Thomson, détente isentropique...</b>	5
<b>2.1. Définition</b>	5
<b>2.2. Processus de liquéfaction :</b>	5
<b>2.2.1. Détente Joule-Thomson (<i>Isenthalpique</i>) :</b>	5
<b>2.2.2. Détente Brayton (isentropique)</b>	6
<b>3. Coefficient Isenthalpique d'étranglement</b>	6
<b>4. Coefficient Isentropique d'étranglement</b>	7
<b>5. Notion de température d'inversion d'un gaz</b>	7
<b>6. Courbe d'inversion d'un gaz (diagramme (T, P))</b>	8

## 1. introduction générale :

### 1.1. Définition de la cryogénie :

La cryogénie est une science et technologie qui s'intéresse à l'étude des basses températures situant au-dessous de 120 (K) environ -150 (°C), cette température représente la limite à laquelle les principaux gaz atmosphériques se liquéfient : Oxygène, hydrogène, hélium, azote, néon, méthane, (gaz permanent). Donc on parle des **Fluides Cryogéniques**.

Cryo	signifie →	froid
Génie	signifie →	production

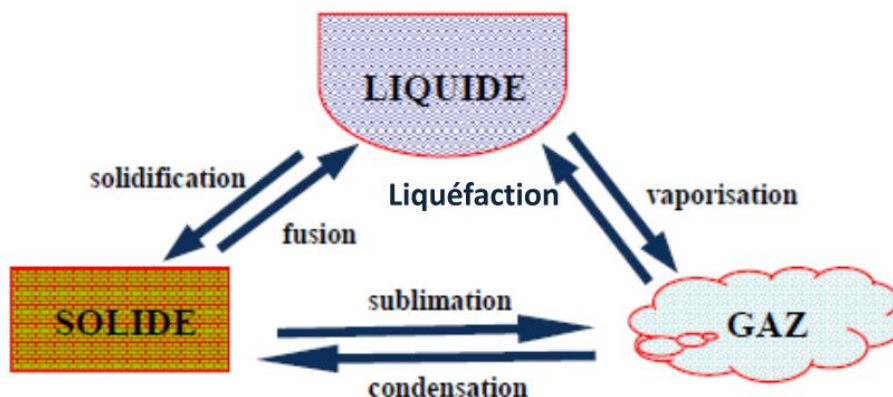
**Rappel**  $T(K) = T(^{\circ}C) + 273,15$



Bouteille d'azote liquide

### 1.2. Comportement des fluides Cryogéniques :

Il existe trois états de la matière



### 1.3. Diagramme de phase

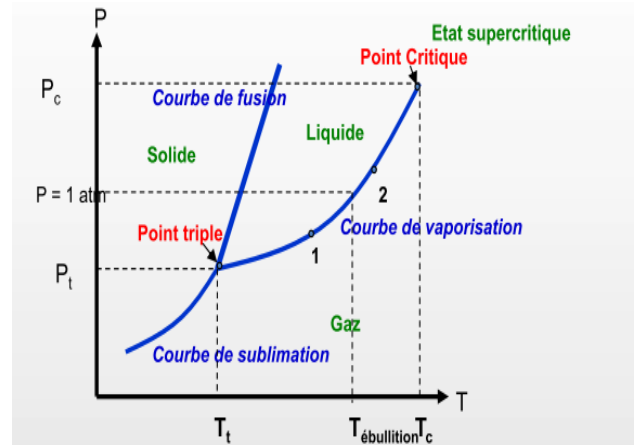
Diagramme de phase nommé autre fois diagramme d'équilibre des phases il représente les différentes phases d'un corps pur en fonction des variables : température/pression.

- **Trois courbes d'équilibre correspondant à un changement d'état :**

- Solide - gaz : courbe de sublimation
- Solide - liquide : courbe de fusion
- Liquide – gaz : courbe de vaporisation

- **Point triple** ( $P_t, T_t$ ) : coexistence des trois phases en équilibre (sol/liq/gaz)

- **Point critique** ( $P_c, T_c$ ) au-delà duquel il n'y a plus de différence entre le liquide et le gaz :  
*Etat supercritique monophasique*



La transition d'une phase à l'autre nécessite un apport de chaleur que ce soit un apport de chaleur sensible ou latente

- Chaleur sensible : Quantité de chaleur échangée sans transition de phase mais avec changement de température

$$Q_s = MC_p \Delta T$$

- Chaleur latente : Quantité de chaleur échangée avec transition de phase à température constante

$$Q_L = ML_V$$

M (kg),  $C_p$  (J/kg °C),  $L_V$  (J/kg), T(°C),  $Q_s$  (joule),  $Q_L$  (joule),

## 2. Liquéfaction

### 2.1. Définition

La liquéfaction est la transition de l'état gazeux vers l'état liquide elle peut s'effectuer par deux méthodes :

- a- La compression : l'augmentation de la pression engendrée une diminution du volume du gaz (rapprochement des molécules).
- b- Le refroidissement : l'abaissement de la température par l'extraction de la chaleur du gaz.

### 2.2. Processus de liquéfaction :

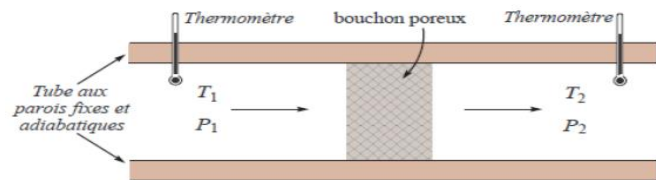
Il y a trois processus de permettant de liquéfier le gaz à pression atmosphérique (P atms) :

- a- Détente Joule-Thomson (Isenthalpique)
- b- Détente Brayton (Isentropique)
- c- Le procédé mixte de Claude (Isenthalpique + Isentropique)

#### 2.2.1. Détente Joule-Thomson (Isenthalpique) :

Détente de J-T est une détente à travers une paroi peureuse (vanne) s'accompagne par une chute brusque de la pression lors du passage du fluide par un orifice. Lent

- Pas d'échange de chaleur avec le milieu extérieur, donc adiabatique  $Q = 0$



- Le travail effectué sur le système

$$W = - \int_1^2 P dV$$

- L'application du premier principe de la thermodynamique :

$$\Delta U = W + Q$$

$$Q = 0 \text{ (Système adiabatique)}$$

$$\Delta U = W$$

$$U_2 - U_1 = P_1 V_1 - P_2 V_2$$

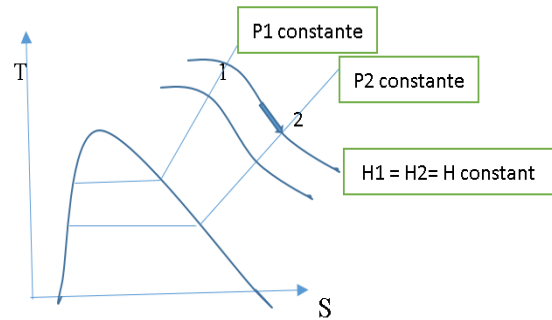
$$U_2 + P_2 V_2 = U_1 + P_1 V_1$$

$$H_2 = H_1$$

→ **Processus adiabatique Isenthalpique**

$$T_1 > T_2$$

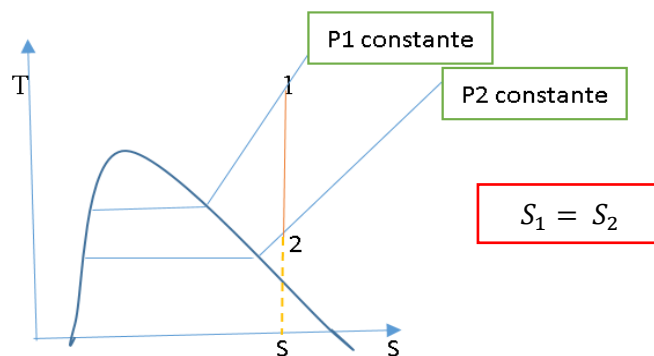
$$P_1 > P_2$$



Présentation du processus de J-T sur Diag (T-S)

### 2.2.2. Détente Brayton (isentropique)

La détente isentropique est une détente d'extraction d'énergie qui fournit un travail à travers d'une machine d'expansion (turbine), cette détente provoque une diminution importante de la température dans les mêmes conditions de fonctionnement.



Présentation du processus de Brayton sur Diag (T-S)

### 3. Coefficient Isenthalpique (Coefficient de joule - Thomson $\mu_{J-T}$ )

Le coefficient de joule -Thomson représente la pente des lignes Enthalpies il exprime la variation de température par la variation de pression à enthalpie constante et noté  $\mu_{J-T}$

$$\mu_{J-T} = \left( \frac{\partial T}{\partial P} \right)_H$$

- **Démonstration**

La détente de joule –Thomson est une détente adiabatique Isenthalpique  $\longrightarrow H = \text{const}$

$$H_1 = H_2 \longrightarrow dH = 0$$

Par l'utilisation du dérivé total de l'enthalpie on obtient

$$dH = \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_p dT + \left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T dP = 0$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_H = - \frac{\left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T}{\left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_p} = \mu_{J-T}$$

$$\mu_{J-T} = \left(\frac{\Delta T}{\Delta P}\right)_H$$

**4.Coefficient Isentropique  $\mu_s$**

Le coefficient Isentropique représente la variation de température par la variation de pression à entropie constante et noté  $\mu_s$

$$\mu_s = \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_s$$

- **Démonstration**

$$\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_s = - \left(\frac{\partial T}{\partial S}\right)_P \left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_T$$

$$\left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_P = \frac{\partial Q}{T} \cdot \frac{1}{dT} = \frac{1}{T} \left(\frac{\partial Q}{\partial T}\right)_P = \frac{C_p}{T}$$

d'ou :

$$\left(\frac{\partial T}{\partial S}\right)_P = T \left(\frac{\partial T}{\partial Q}\right)_P = \frac{T}{C_p}$$

$$\left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_T = \frac{\partial Q}{T} \cdot \frac{1}{\partial P} = \frac{1}{T} \left(\frac{\partial Q}{\partial P}\right)_T$$

le terme :

$$\left(\frac{\partial Q}{\partial P}\right)_T = h = -T \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P$$

d'ou :

$$\left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_T = - \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P$$

alors

$$\mu_s = \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_s = \frac{T}{C_p} \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P$$

**5.Notion de température d'inversion d'un gaz :**

La température d'inversion du gaz c'est un point dans laquelle le coefficient de joule –Thomson change le signe.

$\mu_{J-T} = \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_H > 0$  détente avec refroidissement.

$\mu_{J-T} = \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_H < 0$  détente avec réchauffage.

$\mu_{J-T} = \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_H = 0$  détente sans variation de température (point d'inversion).

- **Explication**

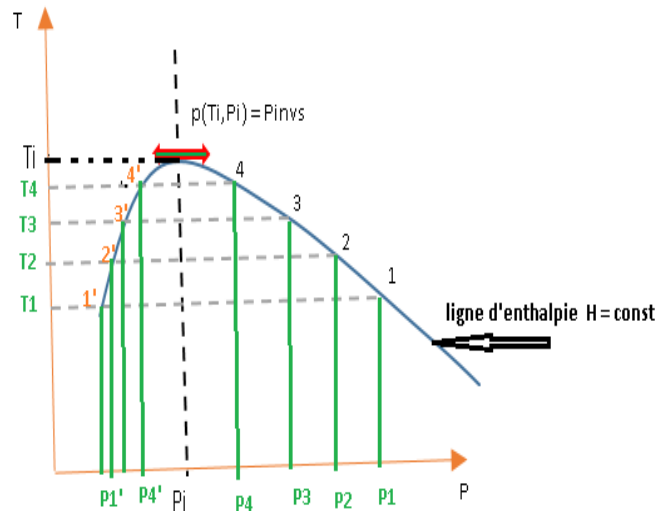
$$\mu_{J-T} = \left(\frac{\Delta T}{\Delta P}\right)_H = \frac{T_2 - T_1}{P_2 - P_1}$$

$P_2 - P_1 < 0$  Toujours

$T_2 - T_1 < 0 \quad T_2 < T_1 \quad \mu_{J-T} > 0$

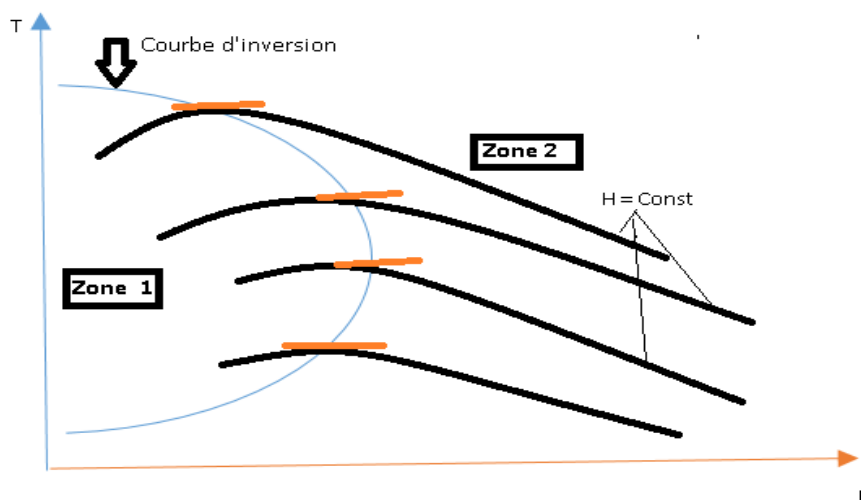
$T_2 - T_1 > 0 \quad T_2 > T_1 \quad \mu_{J-T} < 0$

$T_2 - T_1 = 0 \quad T_2 = T_1 \quad \mu_{J-T} = 0$



**6. Courbe d'inversion d'un gaz (diagramme (T, P))**

La courbe d'inversion c'est courbe qui limite les deux zones de processus de la détente, la ligne de la courbe passe par les points de sommet des lignes de l'enthalpie.



**Zone 1** : détente avec refroidissement.

**Zone 2** : Détente avec réchauffage.