



Technique du froid & composants frigorifiques

Mohammed YOUBI-IDRISSI
Chargé de Recherche, Cemagref



LICENCE PROFESSIONNELLE
MANAGEMENT DE LA CHAÎNE DU FROID - TRANSPORT ET LOGISTIQUE



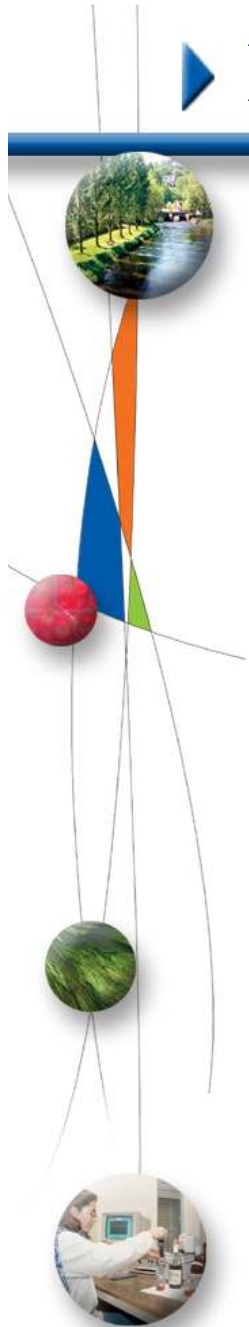
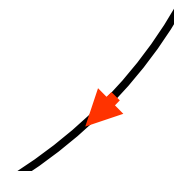
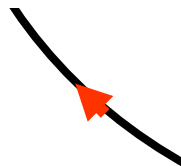
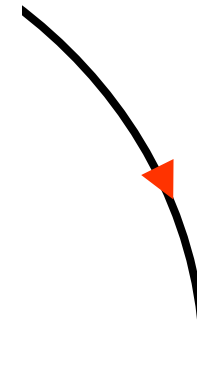
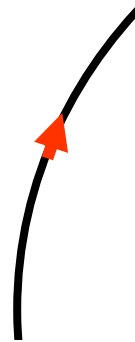
► Historique

- 1860 : Fluides naturels :
CO₂ ; SO₂ ; NH₃
Chlorométhane

- 1980 : HFC
R-134a, ...

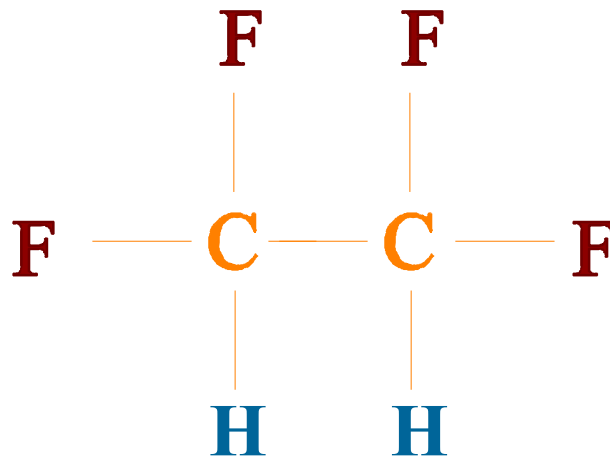
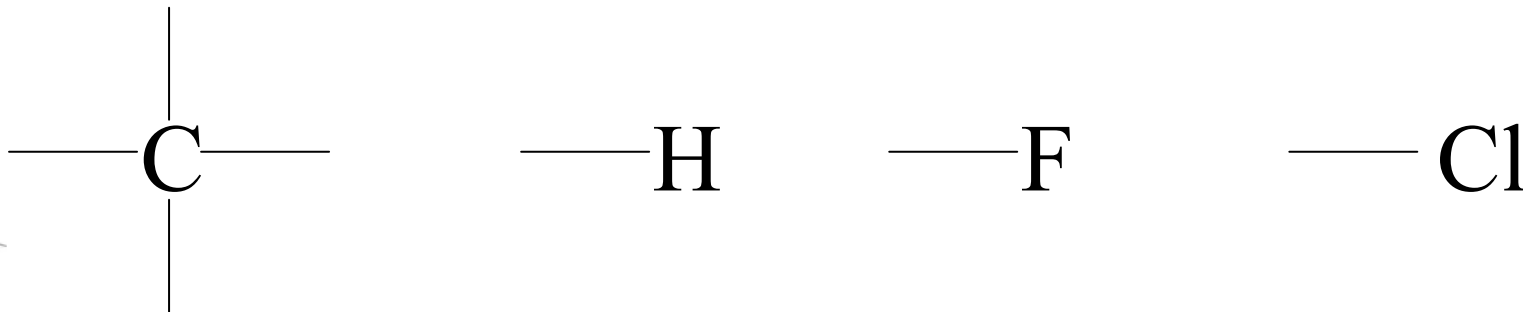
- Puis : HCFC
R-22

- 1930 : CFC
R-12, ...



► Nomenclature

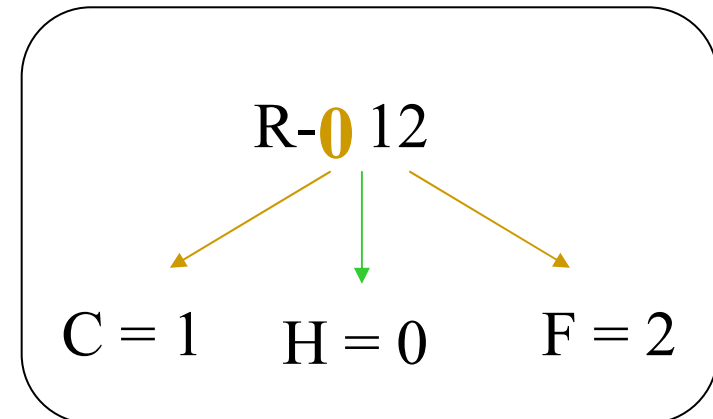
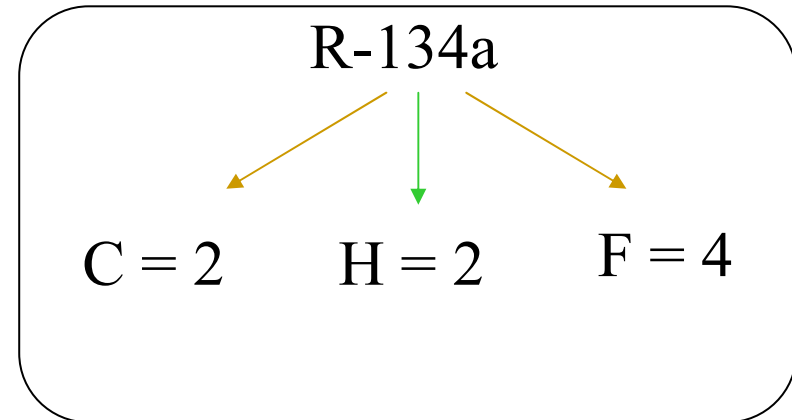
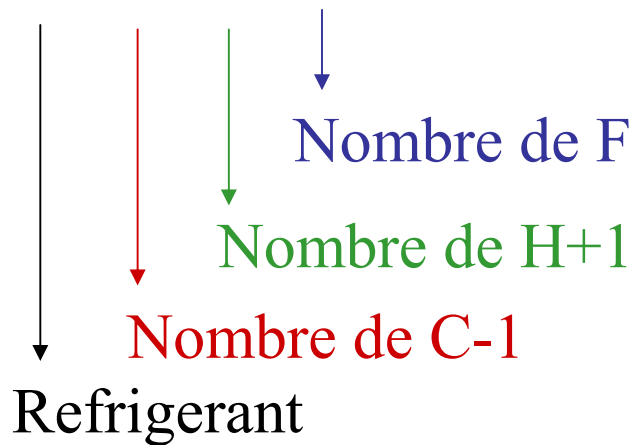
- Atomes : C, H, F, (Cl), Br,...



► Nomenclature : corps pure

- C ; H ; F ; Cl

- R X Y Z



► Comment reconnaître un CFC ?

• R - X Y Z
C H F



CFC : C, F, Cl ; H = 0

Y=1

C — Cl

$Z \leq 3$

C — C — Cl

$Z \leq 5$

C — C — C — Cl

$Z \leq 7$

▶ Examples

R12

$$C - 1 = 0$$

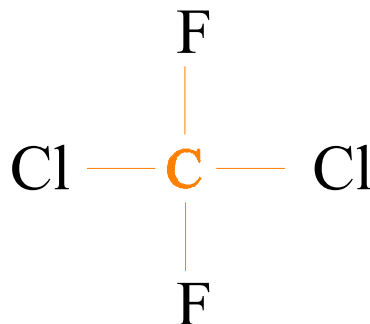
$$H + 1 = 1$$

$$F = 2$$

$$C = 1$$

$$H = 0$$

$$F = 2$$



R115

$$C - 1 = 1$$

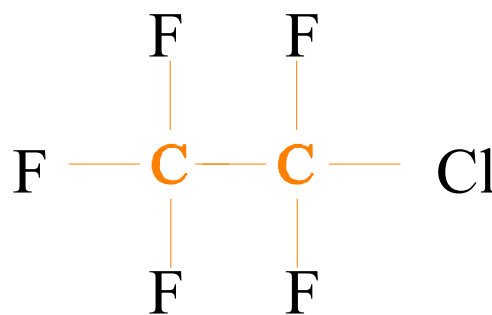
$$H + 1 = 1$$

$$F = 5$$

$$C = 2$$

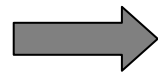
$$H = 0$$

$$F = 5$$



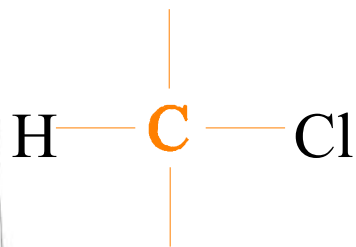
► Comment reconnaître un HCFC ?

• R - **X** **Y** **Z**
C H F

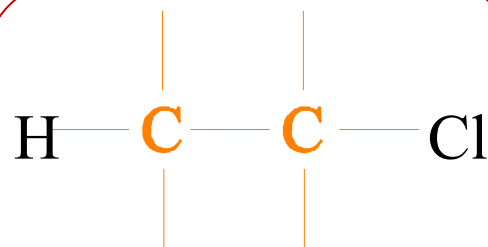


HCFC : C, F, Cl ; **H ≥ 1**

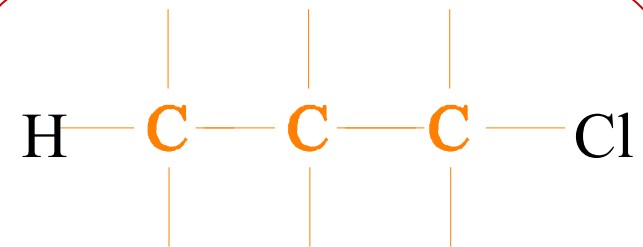
$Y \geq 2$ et $Cl \geq 1$



$$Y+Z \leq 3$$



$$Y+Z \leq 5$$



$$Y+Z \leq 7$$

► Examples

R22

$$C - 1 = 0$$

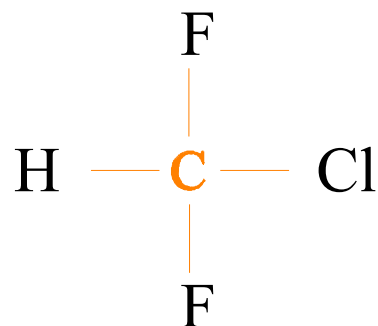
$$H + 1 = 2$$

$$F = 2$$

$$C = 1$$

$$H = 1$$

$$F = 2$$



R123

$$C - 1 = 1$$

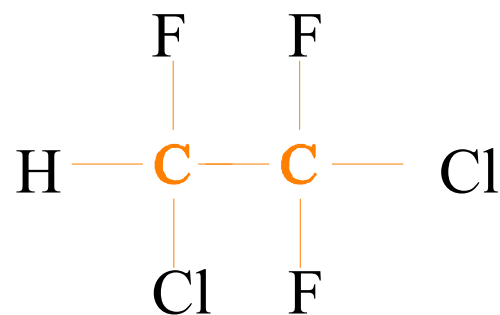
$$H + 1 = 2$$

$$F = 3$$

$$C = 2$$

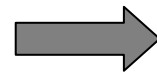
$$H = 1$$

$$F = 3$$



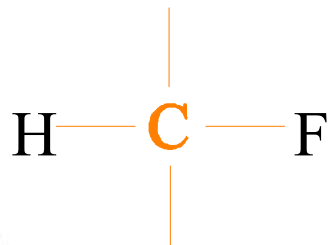
► Comment reconnaître un HFC ?

• R - **X** **Y** **Z**
C H F



HFC : C, F, H ; **Cl = 0**

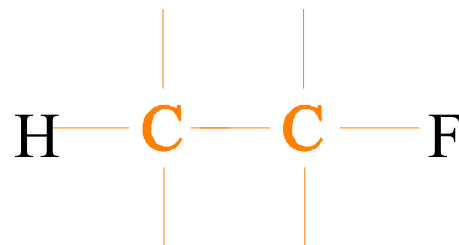
Si C = 1
X = 0



Y+Z = 5

R23, R32

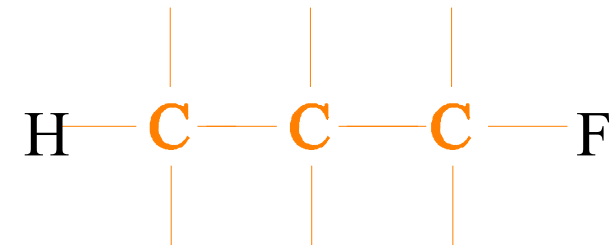
Si C = 2
X = 1



Y+Z = 7

R134a, R125, R143a

Si C = 3
X = 2



Y+Z = 9

R227ea, R236fa, R245ca

► Mélange azéotropes/zéotrope

❖ Un mélange azéotrope se comporte comme un fluide pur

$$T_{bulle} = T_{rosée} \quad \text{à } P = C^{st}$$

$$P_{bulle} = P_{rosée} \quad \text{à } T = C^{st}$$

❖ Un mélange zéotrope se comporte comme un fluide pur

$$T_{bulle} \neq T_{rosée} \quad \text{à } P = C^{st}$$

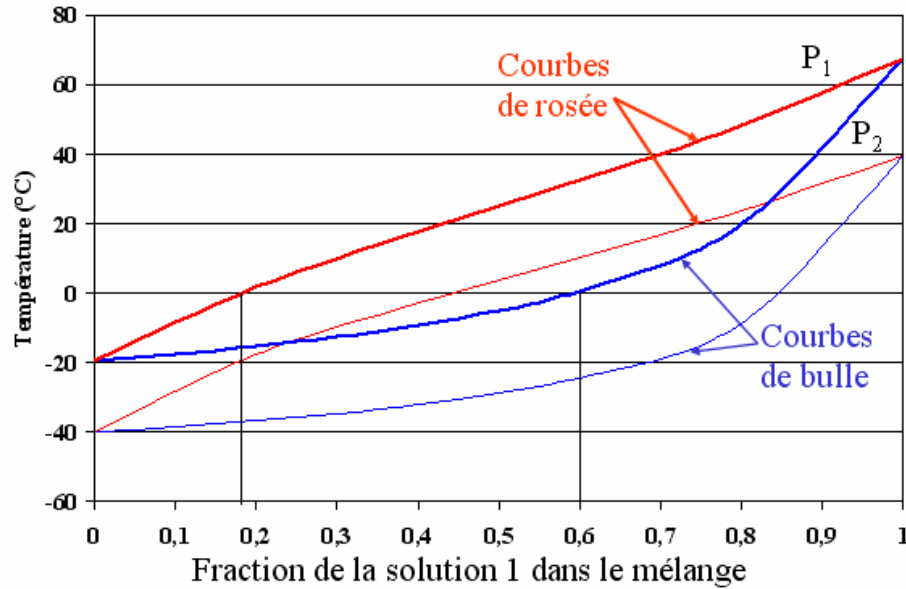
$$P_{bulle} \neq P_{rosée} \quad \text{à } T = C^{st}$$

$(T_{rosée} - T_{bulle})$: glissement de température = $f(\text{composition}, P)$

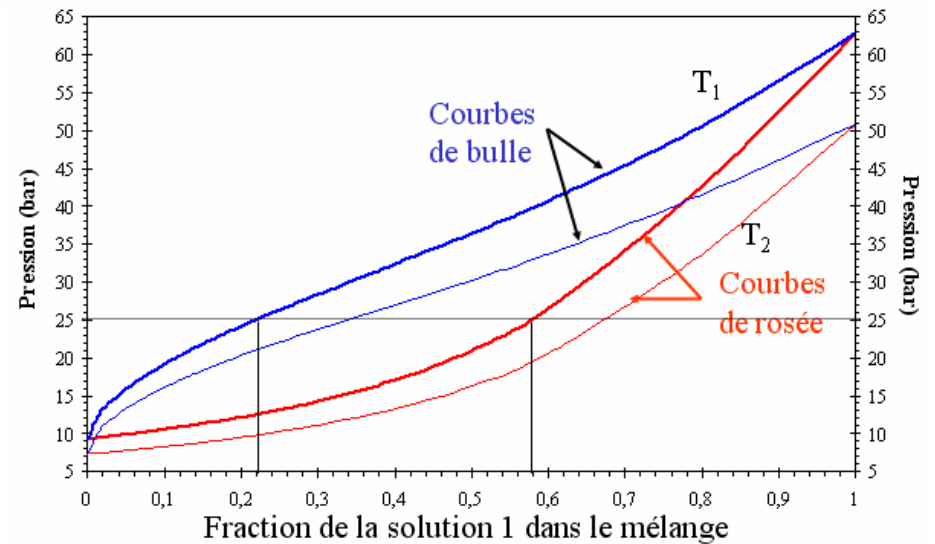
$(P_{bulle} - P_{rosée})$: glissement de pression = $f(\text{composition}, T)$

▶ Diagramme de phase

➤ A pression constante



➤ A Température constante



► Nomenclature : mélange

❖ Mélange azéotrope : Série 500

Exemple :

- R502 (HCFC, 48,8%R22 + 51,2%R115) ;
- R507 (HFC, 50% R125+ 50% R143a)
- ...

❖ Mélange zéotrope : Série 400

Exemple :

- R404A (HFC, 44%R125 + 52%R143a+ 4%R134a) ;
- R407C (HFC, 25% R125+23% R32 + 48% R134a)
- R410A (HFC, 50% R125+50% R32)
- ...

▶ Autres frigorigènes

❖ Hydrocarbures : Série 600

- Pour un nombre d'atome de carbone égale 1, 2, 3, la règle des frigorigènes purs est utilisée : Méthane CH₄ (R50), Éthane C₂H₆ (R170), Propane C₃H₈ (R290)
- Pour un nombre d'atome de carbone > 4, on utilise la série 600
Butane R600, Isobutane R600a

❖ Composés inorganiques : Série 700

La règle consiste à utiliser la masse molaire du fluide après le chiffre 7

Exemple :

- Ammoniac NH₃ : R717
- CO₂ : R744
- Eau : 718
- 60% NH₃, 40% DME : R723

► Choix des frigorigènes



➔ *Critères thermodynamiques*

- efficacité : $\frac{h_8 - h_6}{h_2 - h_1}$ et chaleur latente, élevés (cycle théorique)

➔ *Critères de sécurité et d'environnement*

- toxicité ;
- inflammabilité ;
- effet sur la couche d'ozone ;
- effet de serre.

➔ *Critères technologiques, opérationnels et économiques*

- masse volumique du liquide élevée = compacité
- pression de fonctionnement : P_k modérée et $P_k > P_{atm}$
- propriétés aérauliques et thermiques : viscosité faible et conductivité thermique élevée ;
- compatibilité (huile ; matériaux ; stabilité chimique et thermique) ;
- coût et disponibilité.



► Les compresseurs frigorifiques

❖ Rôle du compresseur

Le compresseur a pour rôle d'aspirer les vapeurs venants de l'évaporateur à une pression faible et de refouler à haute pression ces vapeurs comprimées dans le condenseur

❖ Types de compresseurs

Sur la base de leur fonctionnement, on distingue deux groupes principaux :

-Les compresseurs volumétriques ;

- * compresseurs à pistons (alternatifs)**
- * compresseurs à palettes (rotatifs)**
- * Compresseurs hélicoïdaux ou à vis (rotatifs)**
- * compresseurs spiroïdaux ou scroll (rotatifs)**

-Les compresseur centrifuges (compresseurs à impulsion).

▶ Grandeurs caractéristiques

- ❖ Grandeurs géométriques
- ❖ Grandeurs mécaniques
- ❖ Grandeurs énergétiques
- ❖ Grandeurs qualitatifs

1. Grandeurs géométriques

a. Cylindrée C

C'est le volume balayé lors d'une course d'aspiration pendant un tour de l'arbre

$$C = \frac{\pi d^2}{4} l n \quad [\text{m}^3]$$

l : course [m]

n : nombre des cylindres

► Grandeurs caractéristiques

b. Débit volume balayé

C'est le volume balayé pendant l'unité du temps, il varie proportionnellement à la vitesse de rotation du compresseur

$$\dot{V}_{bal} = \left(\frac{\pi d^2}{4} l n \right) \frac{N}{60} \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

N : vitesse de rotation [tr/min]

- La cylindrée est seule une grandeur purement géométrique

$$\frac{\dot{V}_{bal,1}}{N_1} = \frac{\dot{V}_{bal,2}}{N_2}$$

- Le débit volume balayé est souvent exprimé en m³/h

▶ Grandeurs caractéristiques

c. Débit volume aspiré

C'est le débit réellement aspiré par le compresseur

$$\dot{V}_{asp} = \dot{V}_{bal} \eta_v$$

d. Débit massique

C'est le nombre de kilogrammes de fluide ayant circulé dans le compresseur pendant une unité de temps

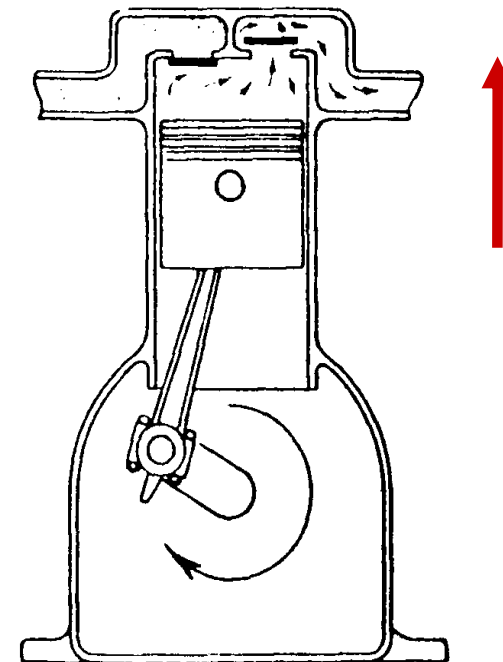
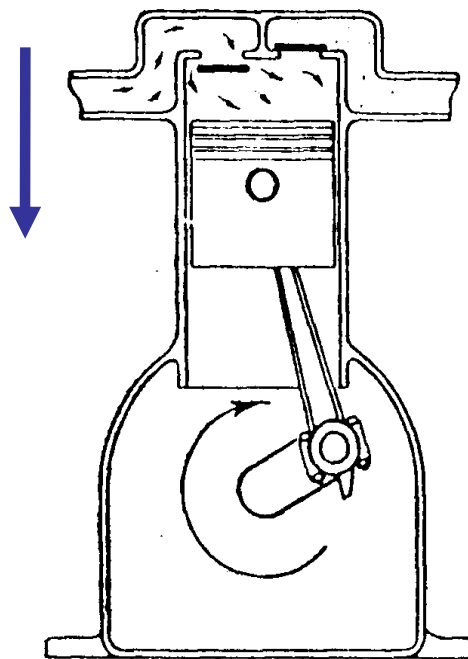
$$\dot{m}_f = \frac{\dot{V}_{asp}}{v''_{asp}} \quad [\text{kg/s}]$$

▶ Grandeurs caractéristiques

2. Grandeurs mécaniques

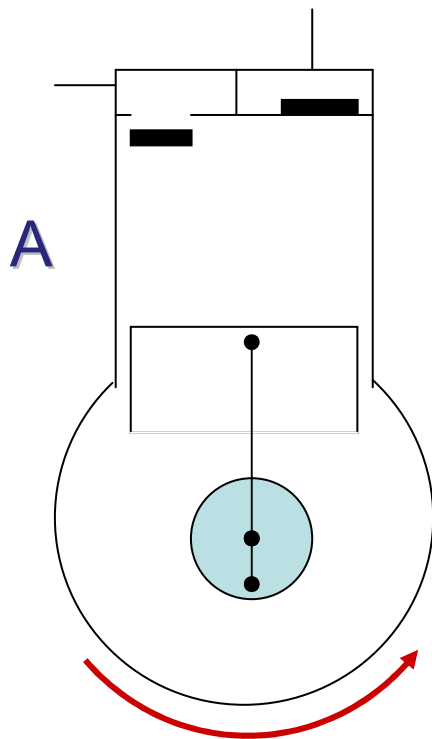
Ces caractéristiques découlent du fonctionnement du compresseur et de l'examen du diagramme de fonctionnement

a. Principe de fonctionnement

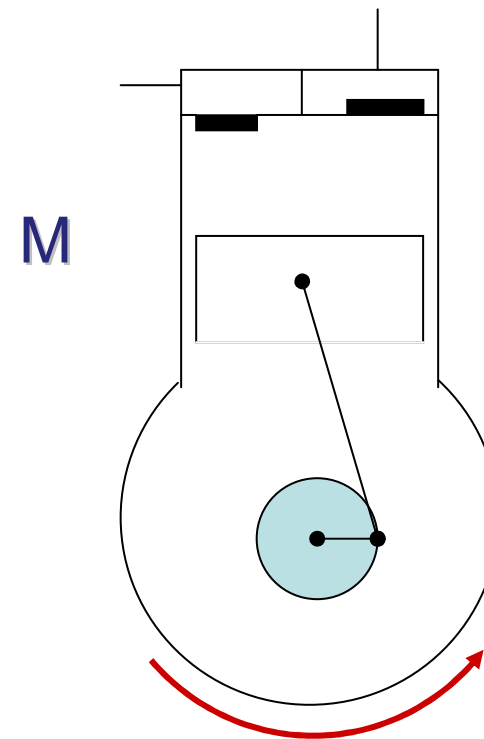


▶ Grandeurs caractéristiques

a. Principe de fonctionnement



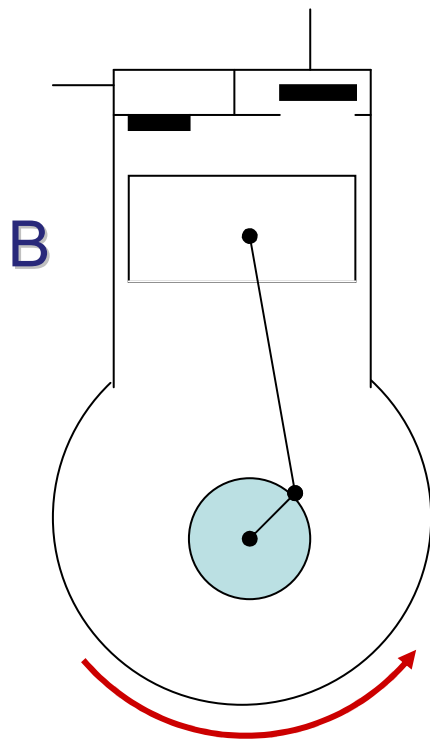
Le piston étant à la fin de sa course d'aspiration (point mort bas), le cylindre est totalement rempli de vapeur à la pression d'aspiration P_0



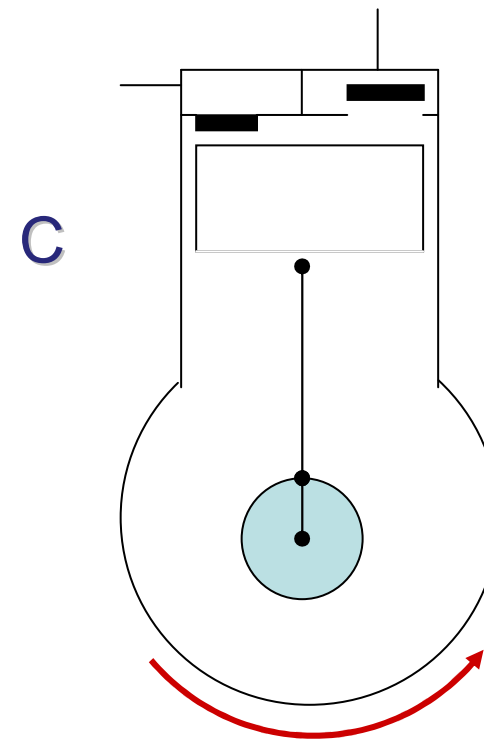
Le piston commence sa course de compression. Les clapets d'aspiration et de refoulement sont fermés. Le Volume diminue et la pression augmente au fur et à mesure

▶ Grandeurs caractéristiques

a. Principe de fonctionnement



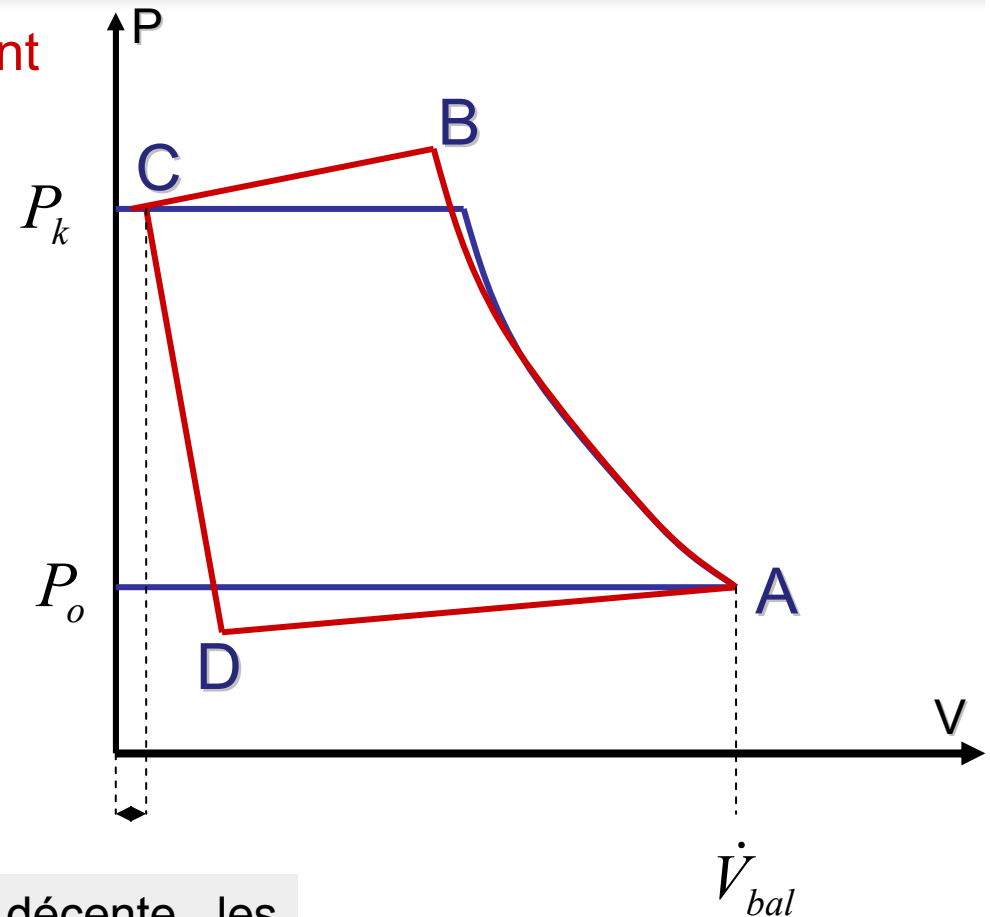
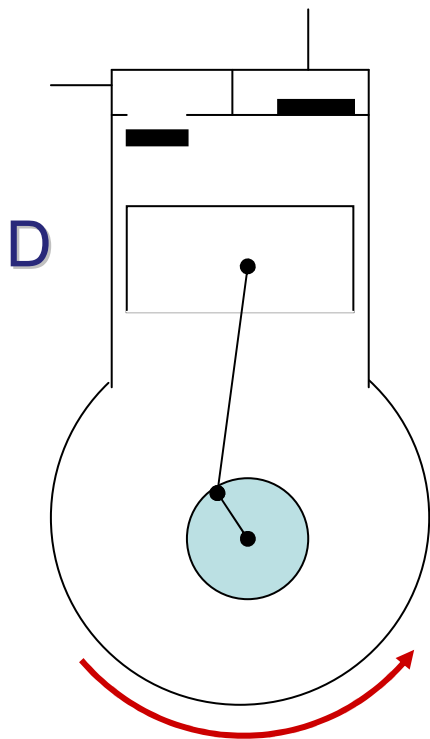
Lorsque la pression dans le cylindre atteint une pression légèrement supérieure à la pression P_k , les clapets de refoulement s'ouvrent



Les vapeurs continuent de s'échapper jusqu'à ce que le piston atteigne le point mort haut. Il reste un volume jamais balayé «espace mort»

▶ Grandeurs caractéristiques

a. Principe de fonctionnement



Le piston amorce sa course de décente, les deux clapets sont fermés. Les clapets d'aspiration s'ouvrent quand la pression est légèrement inférieure à P_o . L'espace mort provoque un retard à l'aspiration

▶ Grandeurs caractéristiques



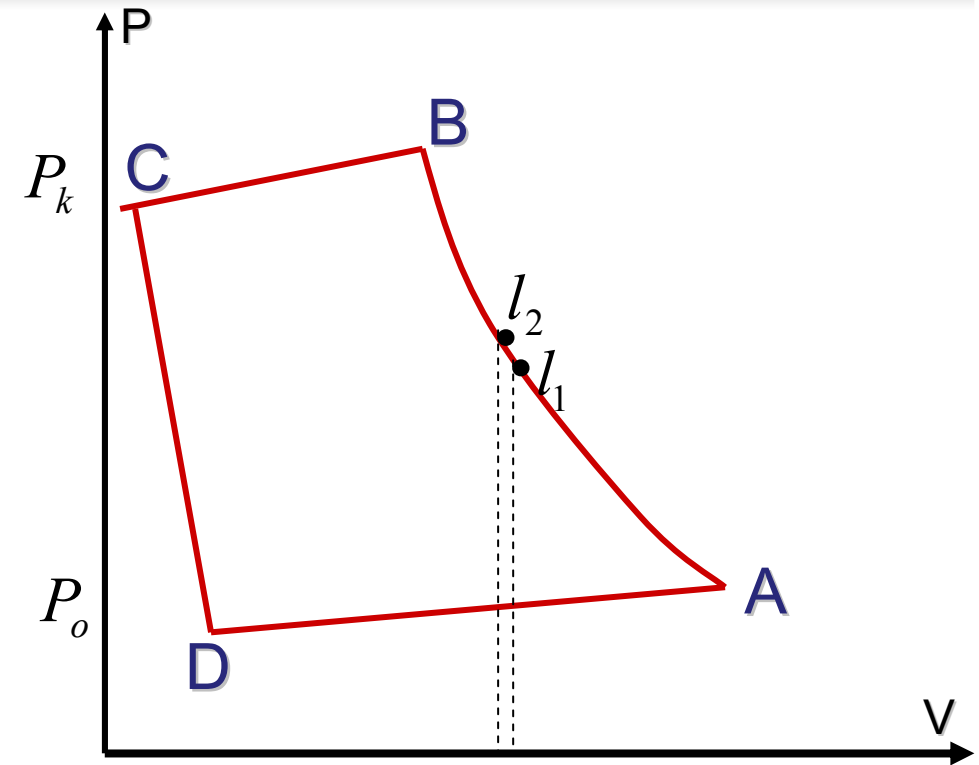
b. Travail indiqué W_i

$$W_i = F l$$

$$F = (P - P_0) A$$

$$dW_i = (P - P_0) A dl$$

$$W_i = \oint (P - P_0) A dl$$



Travail indiqué = aire ABCDA

c. Puissance indiquée

$$\dot{W}_i = W_i \frac{N}{60}$$



▶ Grandeurs caractéristiques

3. Grandeurs énergétiques

a. Puissance frigorifique

$$\dot{Q}_o = \dot{m} \Delta h_{ev}$$

$$\dot{Q}_o = \frac{\eta_v \dot{V}_{bal}}{v''} \Delta h_{ev}$$

Puissance frigorifique délivrée par un compresseur dépend de :

- **Caractéristiques géométriques du compresseur**
- **Caractéristiques physiques du fluide frigorigène**
- **Conditions de température et de pression HP et BP**
- **Rendement volumétrique**

b. Production frigorifique volumétrique

$$Q_v = \frac{\Delta h_{ev}}{v''}$$

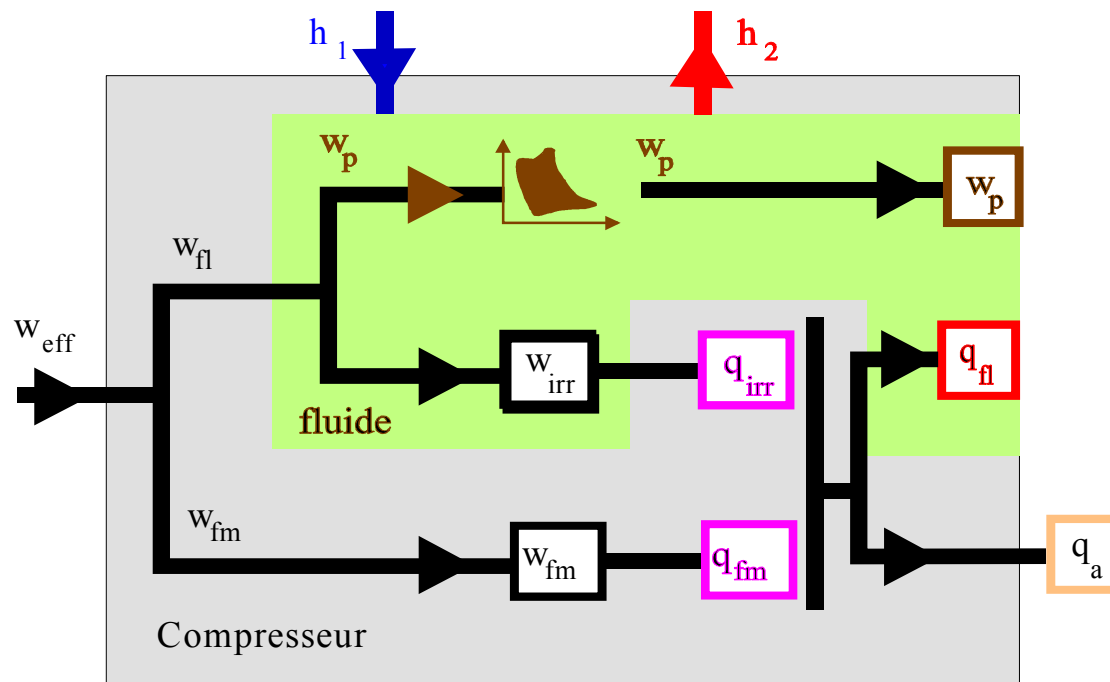
▶ Grandeurs caractéristiques

4. Grandeurs qualitatives

a. Taux de compression

$$\tau = \frac{P_k}{P_o}$$

b. Rendements du compresseur



▶ Grandeurs caractéristiques

❖ Bilan énergétique

$$\dot{W}_{eff} + \dot{m}h_1 - \dot{m}h_2 - \dot{q}_a = 0$$

❖ Rendement indiqué

$$\eta_i = \frac{w_{th}}{w_p}$$

❖ Rendement isentropique

$$\eta_{is} = \frac{\Delta h_{is}}{\Delta h_r}$$

BILAN FLUIDE

▶ Grandeurs caractéristiques

❖ Rendement mécanique

$$\eta_m = \frac{w_p}{w_{\text{eff}}}$$

énergie utile réelle

énergie consommée

"Qualité" compresseur

❖ Rendement effectif

$$\eta_{\text{eff}} = \frac{w_{\text{th}}}{w_{\text{eff}}}$$

Compresseur parfait

compresseur réel

Transformation globale