

Compresseur bi-étagé

I. OBJECTIF :

1. Comprendre le fonctionnement d'un compresseur à air,
2. Déterminer le rendement du compresseur,
3. Faire un bilan thermique au niveau de l'échangeur de chaleur.

II. Etude des compresseurs

1. Compresseur à piston simple

a. Principe de fonctionnement

Le compresseur à piston n'est qu'un cylindre fermé par un piston mobile communiquant avec l'admission et le refoulement des gaz par des ouvertures commandées par des soupapes (clapets). Le déplacement du piston est assuré par un système bielle manivelle (**Fig.III-1**) relié à un volant lui-même relié à un moteur électrique.

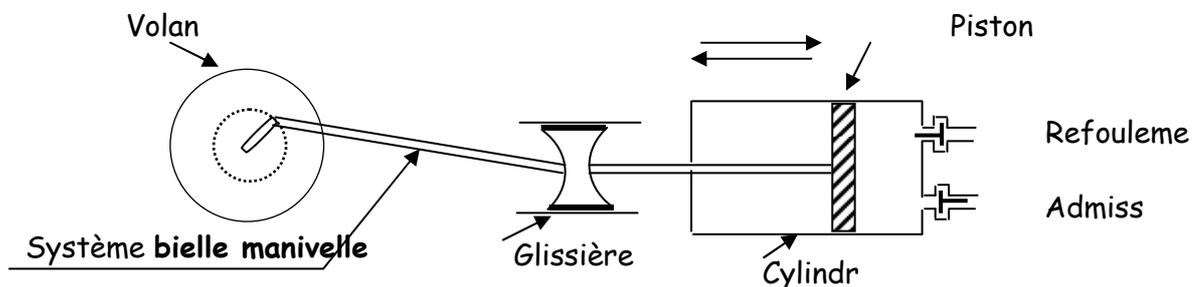


Figure 4.1. Compresseur à piston.

b. Cycle théorique

Le cycle de compression d'un gaz dans un compresseur à piston est effectué en supposant que :

- ✓ Transformation réversible : pas de frottement,
- ✓ Pas de volume mort, c'est-à-dire le piston touche le fond du cylindre.

Au cours de ce cycle trois phases sont envisagées (aspiration, compression et refoulement):

Phase d'aspiration

Le piston se déplace de droite à gauche (de A jusqu'à B). Ainsi le clapet de refoulement est fermé, le clapet d'aspiration est ouvert. Il y a aspiration de gaz à la pression $P=P_1$ et le volume du gaz passe de zéro à V_1 (volume du cylindre)

Phase de compression

Les deux soupapes sont fermées ; le piston se déplace de gauche à droite (de B jusqu'à C) et le gaz est comprimé. La pression passe de P_1 à P_2 et le volume atteint V_2 à la fin de la compression ($V_2 < V_1$).

Phase de refoulement

Lorsque la pression dans le cylindre est égale à P_2 , pression de refoulement, la soupape de refoulement s'ouvre. Le gaz est refoulé hors du cylindre.

Type de compression

La compression du gaz peut être réalisée en trois façons :

- ✓ Compression isotherme $pV = \text{cte}$,
- ✓ Compression adiabatique réversible $pV^\gamma = \text{cte}$,
- ✓ Compression polytropique réversible $pV^k = \text{cte}$,

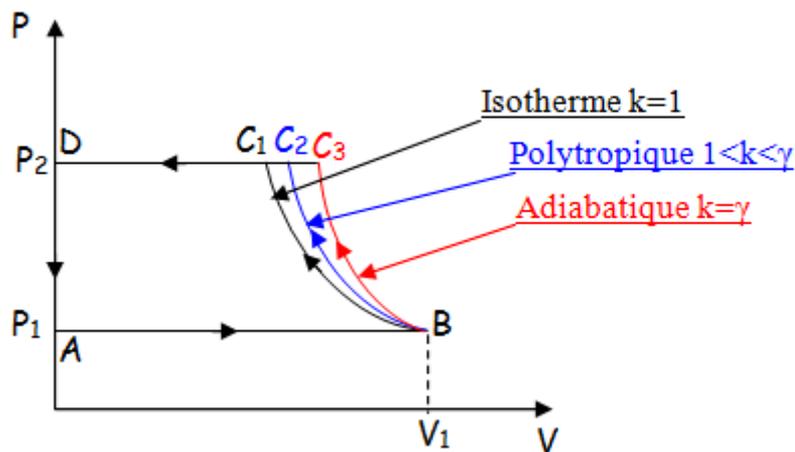


Figure 4.1. Représentation de différentes façons de compression sur le diagramme (P, V).

2. Compresseur à plusieurs étages

a. Principe de fonctionnement

Sachant que lorsque on augmente le rapport de compression, on augmente la température de du gaz de refoulement. A titre indicatif, par exemple, lors de la compression isentropique d'un gaz parfait, pour lequel $\gamma = 1.4$, pour un rapport $\frac{p_2}{p_1}$ et $T_1 = 293$ K on obtient :

$$T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = 293 \cdot (10)^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 563\text{K}$$

Or, dans les compresseurs il y a des huiles de graissage. Il ne faut pas que ces huiles soient portées à des températures trop élevées sinon elles se détériorent et peuvent même dans certains cas s'enflammer.

Pour cela et afin d'éviter une augmentation excessive de la température du gaz au refoulement pour des rapports de compressions élevés, on dispose l'un derrière l'autre plusieurs compresseurs en série et on procède à un refroidissement du gaz entre étages comme présenté sur la figure (Fig.III-4).

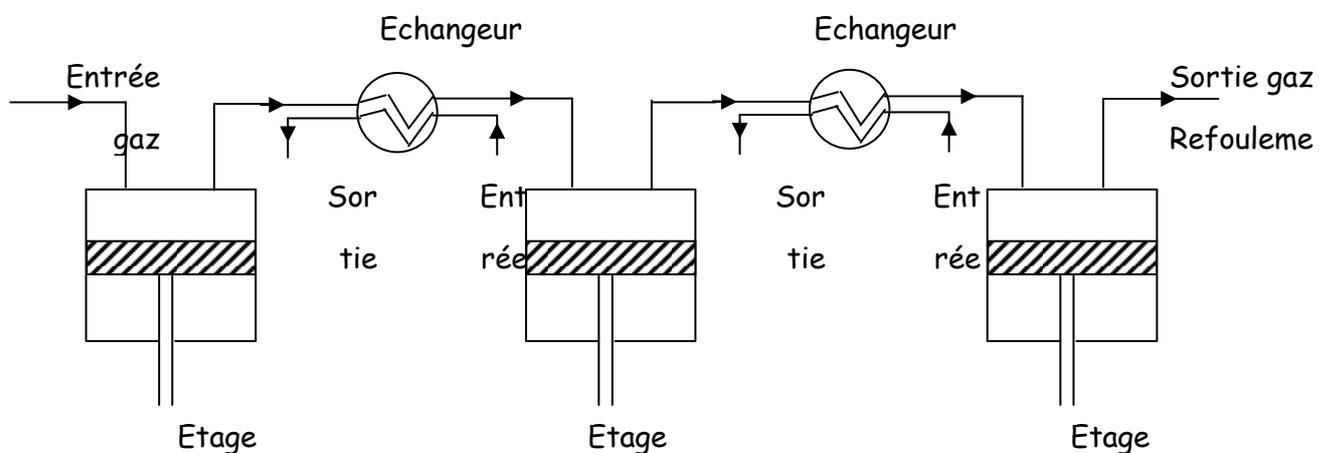


Figure 4.2. Compression multiétagée avec refroidissements intermédiaires.

Cette compression multiétagée permet de :

- ✓ Diminuer la température du gaz au refoulement des étages de compression, d'où une meilleure tenue des lubrifiants de graissage, des joints de piston...,
- ✓ Diminuer le travail de compression.

b. Taux de compression

On appelle taux de compression le rapport entre la pression de refoulement et la pression d'aspiration pour chaque étage, que l'on note τ .

$$\tau = \frac{\text{pression de refoulement}}{\text{pression d'aspiration}}$$

Le taux de compression garde la même valeur pour tous les étages. Il est généralement compris 3 et 5.

c. Diagramme de fonctionnement

Considérons l'étude d'un compresseur à trois étages

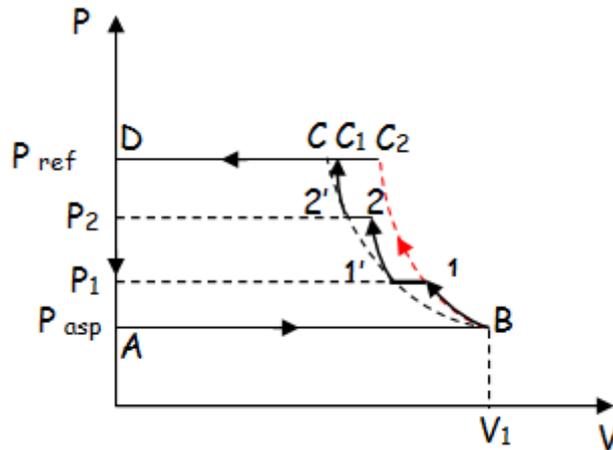


Figure 4.3. Compresseur à trois étages avec refroidissements intermédiaires.

Avec :

BC_2 : compression polytropique

BC : compression isotherme

On veut comprimer un gaz de P_{asp} à P_{ref} dans un compresseur à trois étages avec refroidissement entre étage.

1^{er} étage : compression polytropique (B-1)

Cette compression vérifie l'équation $PV^k = cte$.

Donc :

$$T_1 = T_B \cdot \left(\frac{p_1}{p_B} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

Le taux de compression du 1^{er} étage est : $\tau = \frac{p_1}{p_{asp}}$

Le travail consommé dans le 1^{er} étage est :

$$W_{1^{er} \text{ étage}} = \frac{k}{k-1} p_B V_B \left[\left(\frac{p_1}{p_{asp}} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] = \frac{k}{k-1} p_B V_B \left[(\tau)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] = \frac{k}{k-1} m r T_B \left(\frac{T_1}{T_B} - 1 \right)$$

Refroidissement isobare du gaz 1-1' :

La température du gaz comprimé en 1^{er} étage revient à la température d'aspiration. Ainsi $T_{1'}=T_B$ (le point 1' situé sur l'isotherme BC).

2^{ème} étage : compression polytropique (1'- 2)

$$\text{On a } T_2 = T_{1'} \cdot \left(\frac{p_2}{p_{1'}} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

Le taux de compression du 2^{ème} étage est : $\tau = \frac{p_2}{p_1} = \frac{p_1}{p_{asp}}$

Le travail consommé dans le 2^{ème} étage est :

$$W_{2^{\text{ème}} \text{ étage}} = \frac{k}{k-1} p_1 V_{1'} \left[(\tau)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] = \frac{k}{k-1} m r T_{1'} \left(\frac{T_2}{T_{1'}} - 1 \right) = \frac{k}{k-1} m r T_B \left(\frac{T_2}{T_B} - 1 \right)$$

Refroidissement isobare du gaz 2-2' :

La température du gaz comprimé en 2^{ème} étage revient à la température d'aspiration. Ainsi $T_2=T_B=T_{2'}$ (le point 2' situé sur l'isotherme BC).

3^{ème} étage : compression polytropique (2'- C₁)

$$\text{On a } T_{C_1} = T_{2'} \cdot \left(\frac{p_{ref}}{p_{2'}} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

Le taux de compression du 3^{ème} étage est : $\tau = \frac{p_{ref}}{p_2} = \frac{p_2}{p_1} = \frac{p_1}{p_{asp}}$

Le travail consommé dans le 3^{ème} étage est :

$$W_{3^{\text{ème}} \text{ étage}} = \frac{k}{k-1} p_2 V_{2'} \cdot \left[\left(\frac{p_{ref}}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] = \frac{k}{k-1} m r T_{2'} \left(\frac{T_{C_1}}{T_{2'}} - 1 \right) = \frac{k}{k-1} m r T_B \left(\frac{T_{C_1}}{T_B} - 1 \right)$$

Travail total

$$W_{total} = W_{1^{\text{er}} \text{ étage}} + W_{2^{\text{ème}} \text{ étage}} + W_{3^{\text{ème}} \text{ étage}}$$

Le travail dans l'étage numéro i est donné par :

$$W_i = \frac{k}{k-1} p_i V_i \left[\left(\frac{p_{i+1}}{p_i} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right], \text{ avec } \tau = \frac{p_{i+1}}{p_i} \text{ et } p_i V_i = m r T_i$$

T_i étant la température de à l'entrée de tous les étages.

T_i étant constante : $p_B V_B = p_1' V_1' = p_2' V_2'$.

$$W_{\text{total}} = 3 \frac{k}{k-1} p_B V_B \left((\tau)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right)$$

d. Interprétation

On constate que :

- ✓ D'après la figure **4.3**, on voit donc que le travail nécessaire pour une compression étagée est plus faible que lorsque la compression se manifeste en un seul étage,
- ✓ D'après la figure **4.1**, on a :

$$W_{\text{comp isotherme}} < W_{\text{comp étagée}} < W_{\text{comp polytropique}} < W_{\text{comp adiabatique}}$$

- ✓ Lorsque le nombre d'étages augmente, le travail d'une compression étagée se rapproche de travail d'une compression isotherme,

Le choix de nombre d'étages résulte, en plus de l'étude thermodynamique, d'une étude économique faisant intervenir l'investissement et les coûts de fonctionnement.

III. Description de l'installation

L'installation est composée de :

- ✓ Un compresseur d'air bi-étagé
- ✓ Deux échangeurs de chaleur à tube concentrique
- ✓ Un ballon de stockage d'air comprimé

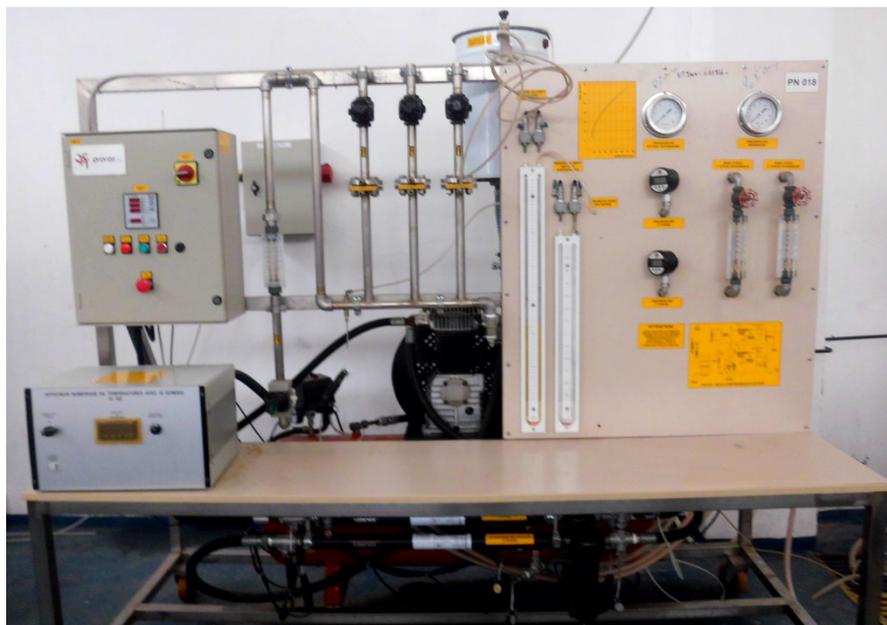


Figure 4.3. Vue d'ensemble de l'appareil expérimental.

L'armoire de commande et composée de :

- ✓ Un interrupteur général à deux positions ON/OFF
- ✓ Un voyant de présence de tension
- ✓ Un bouton de marche et arrêt du compresseur
- ✓ Un bouton poussoir pour arrêt d'urgence
- ✓ Un multimètre digital permettant de mesurer : la tension, le courant, la puissance apparente (W) ; réactive (VAR) ; active (VA)

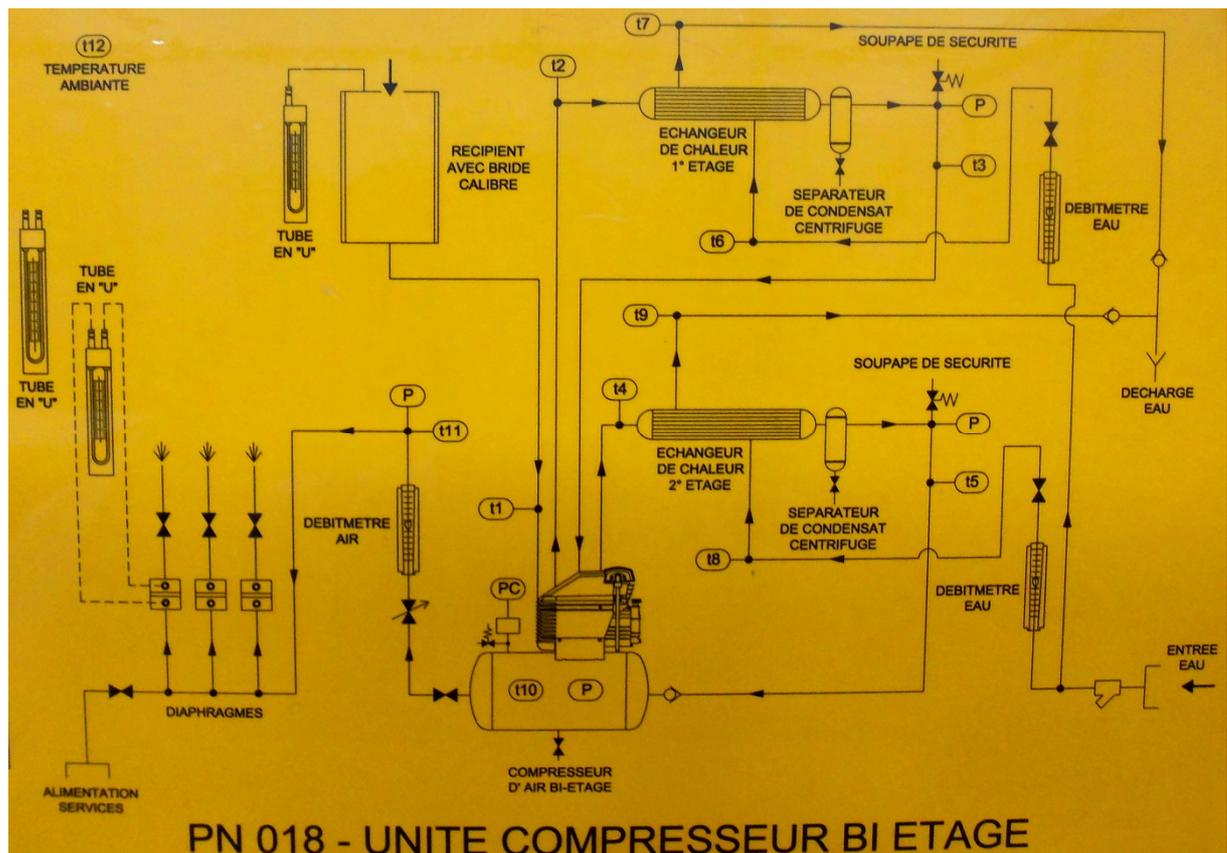


Figure 4.3. Vue Schéma du principe du compresseur bi-étagé.

Instruments de mesure

- ✓ Débitmètre à flotteur pour mesurer le débit d'eau 1^{er} échangeur
- ✓ Débitmètre à flotteur pour mesurer le débit d'eau 2^{ème} échangeur
- ✓ Débitmètre à flotteur pour mesurer le débit d'air sortie ballon
- ✓ Un manomètre affichage digital pour mesurer la pression 1^{er} étage
- ✓ Un manomètre affichage digital pour mesurer la pression 2^{ème} étage
- ✓ Un manomètre à bourdon pour mesurer la pression au ballon

- ✓ Un manomètre à tube en U rempli d'eau pour déterminer le débit d'air à l'entrée du compresseur (en utilisant la courbe d'étalonnage)
- ✓ Afficheur numérique de température avec 12 sondes en Pt 100 composé de :
 - Interrupteur général à deux positions ON/OFF
 - Voyant de présence de tension
 - Sélecteur de température T1 à T12
 - Un afficheur de température

Instruments de sécurité

- ✓ 3 soupapes de sécurité (au 1^{er} étage, au 2^{ème} étage, au ballon de stockage d'air)
- ✓ Un pressostat pour la commande marche et arrêt du compresseur

IV. Travail demandé : (voir compte rendu)

COMPRESSEUR BI-ETAGE

I- BUT :

.....

.....

.....

.....

II- TRAVAIL DEMANDE

1. Quelle est le type du compresseur étudié (hermétique, semi-hermétique ou ouvert) ?

.....

2. Le compresseur étant en marche, noter la pression d'arrêt du compresseur :

.....

3. Compléter le tableau suivant :

T ₁ : entrée air compresseur	
T ₂ : sortie air 1 ^{er} étage comp	
T ₃ : sortie air 1 ^{er} échangeur	
T ₄ : sortie air 2 ^{ème} étage comp	
T ₅ : sortie air 2 ^{ème} échangeur	
T ₆ : entrée eau 1 ^{er} échangeur	
T ₇ : sortie eau 1 ^{er} échangeur	
T ₈ : entrée eau 2 ^{ème} échangeur	
T ₉ : sortie eau 2 ^{ème} échangeur	
T ₁₀ : air au réservoir de stockage	
T ₁₁ : air au collecteur de distribution	
T ₁₂ : air ambiant	
ΔP (mmCE)	
P ₁ pression air sortie 1 ^{er} étage	

P_2 pression air sortie 2 ^{ème} étage	
P pression air au ballon de stockage	
Puissance active (W)	
Puissance réactive (VAR)	
Puissance apparente (VA)	
Courant (A)	
Tension (V)	
$\cos\varphi$	

4. Calculer le taux de compression de chaque étage :

.....

.....

.....

5. Calculer les coefficients polytropiques k_1 et k_2 de chaque étage de compression :

.....

.....

.....

.....

.....

.....

6. Déterminer le débit volumique de l'air aspiré, $V_{\text{aspiration}}$:

.....

.....

7. Déterminer le débit massique de l'air comprimé :

.....

.....

.....

.....

8. Calculer la puissance mécanique consommé au niveau du premier étage de compression P1:

.....
.....
.....
.....

9. Calculer la puissance mécanique consommé au niveau du deuxième étage de compression P2:

.....
.....
.....
.....

10. Déduire la puissance totale du compresseur :

.....
.....
.....

11. Déterminer le rendement du compresseur :

.....
.....

12. Quelle est le type de l'échangeur utilisé pour le refroidissement de l'air comprimé :

.....
.....
.....

13. Déduire la puissance totale du compresseur :

.....
.....
.....

14. Etablir les bilans énergétiques au niveau de deux échangeurs de refroidissement de l'air:

d. Echangeur n°1 :

.....
.....

.....
.....
.....
.....

e. Echangeur n°2 :

.....
.....
.....
.....
.....
.....