

CH 4 : Compression des gaz

4-1- Définition

Comprimer un fluide, c'est le porter d'une pression P_a dite pression d'aspiration, à une pression P_r (supérieure à P_a) dite pression de refoulement. La transformation met en jeu un certain travail, dit "de compression"

4-2- Compression polytropique réversible d'un gaz parfait

Lorsqu'un gaz subit une transformation réversible avec changement de chaleur, le processus se déroule généralement de telle manière qu'un tracé de $\log P$ par rapport à $\log V$ est une ligne droite comme la montre la figure 4-1 ce processus est dit polytropique

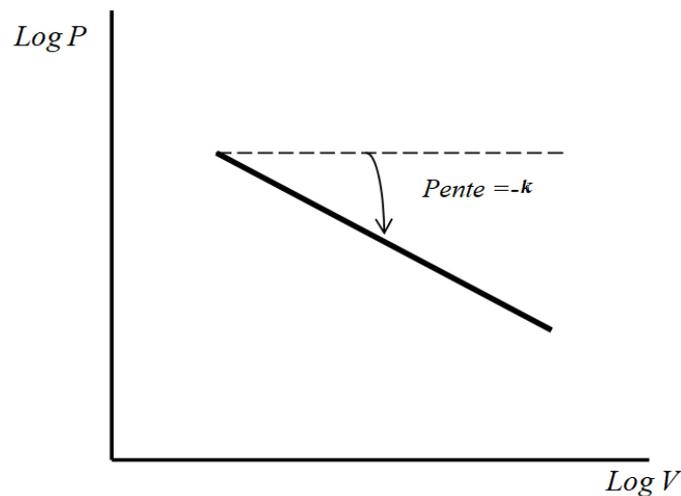


Figure 4-1 Exemple d'un processus polytropique

A partir de la figure, on peut écrire :

$$\frac{d \ln P}{d \ln V} = -k$$

$$d \ln P + k d \ln V = 0$$

Avec $k = \text{constant}$ (k est le coefficient polytropique de la transformation)

On peut intégrer l'équation précédente pour obtenir la relation suivante :

$$PV^k = \text{constant} = P_1 V_1^k = P_2 V_2^k$$

Alors, pour un processus polytropique, on peut écrire les relations suivantes :

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^k$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(k-1)/k} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1}$$

La transformation met en jeu un certain travail W

$$W_{1-2} = \int_1^2 P dV \text{ et } PV^k = \text{constant}$$

$$W_{1-2} = \text{constant} \int_1^2 \frac{dV}{V^k}$$

$$= \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1 - k} = \frac{nR(T_2 - T_1)}{1 - k}$$

Pour toute valeur de k différente de 1 ($k \neq 1$)

Les transformations polytropiques pour différentes valeurs de k illustrées sur le diagramme $P-v$ et le diagramme $T-s$ schématisés sur la figure 4-2.

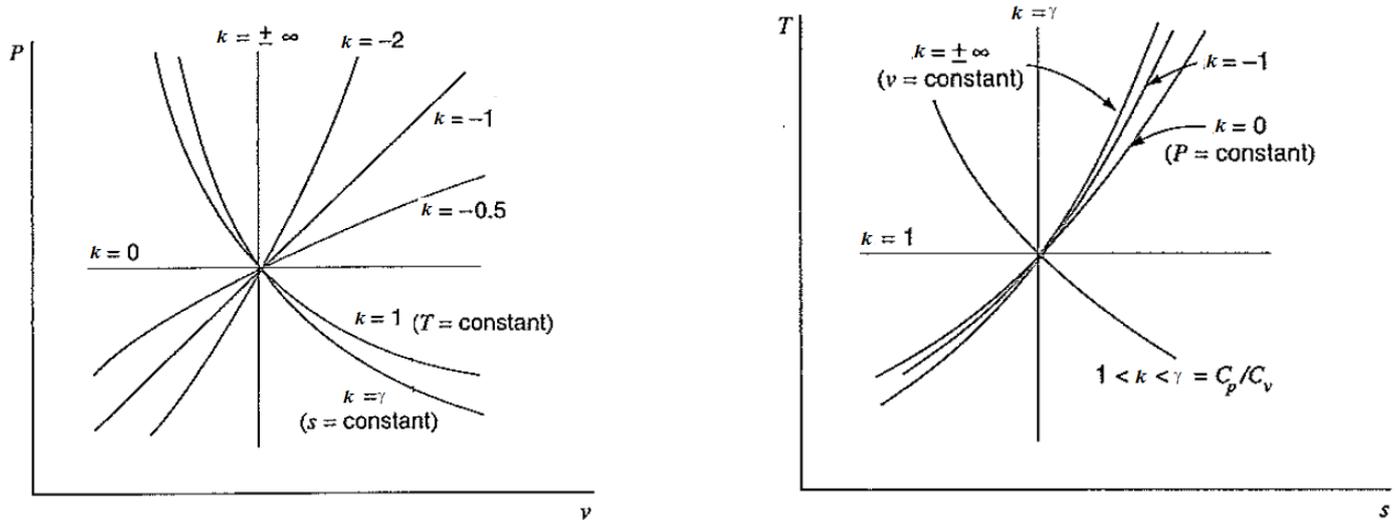


Figure 4-2 Le processus polytropique sur un diagramme $P-v$ et sur un diagramme $T-s$

Pour $k=0$ transformation est isobare ($P=\text{constant}$)

Pour $k = \infty$ transformation est isochore ($V=\text{constant}$)

Pour $k=1$ transformation est isotherme ($T=\text{constant}$)

Pour $k = \gamma$ transformation est isentropique ($s=\text{constant}$)

4-3- Classification des machines de compression

Les compresseurs sont des machines compactes, traversées par un fluide gazeux qui y séjourne très peu de temps. Les surfaces d'échange sont réduites et les coefficients d'échange thermique faibles. Il en résulte que généralement les échanges de chaleur entre le fluide de travail et l'extérieur sont négligeables devant le travail de compression : la compression de référence est donc une compression adiabatique. Si elle est réversible, il s'agit d'une isentropique.

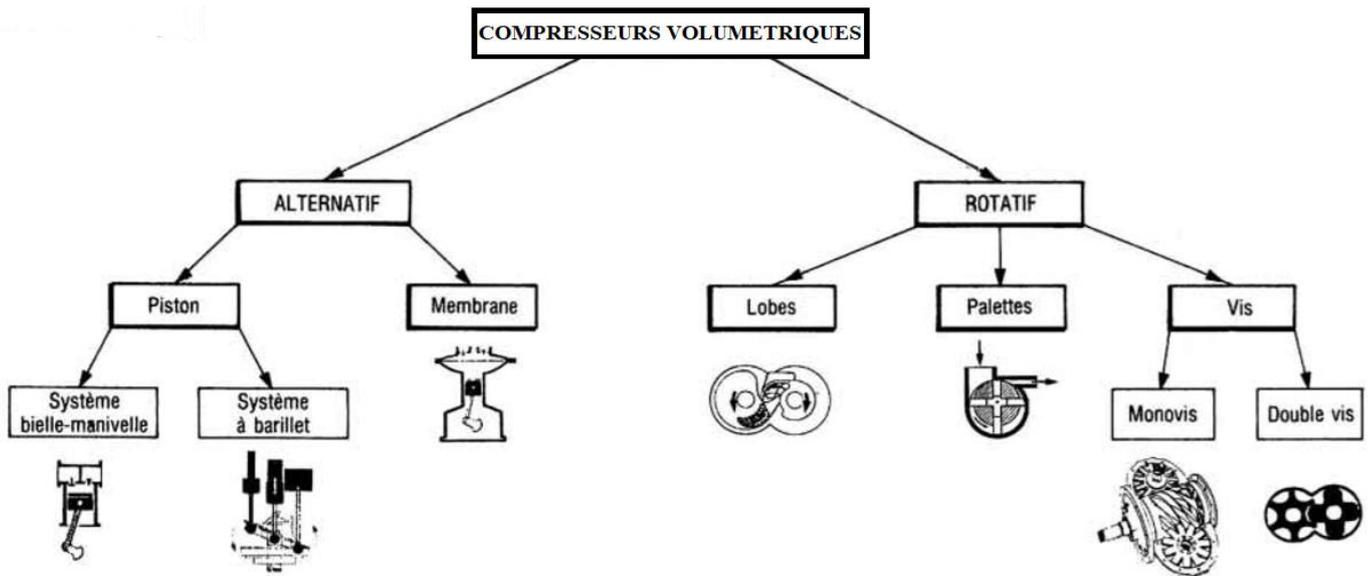
On distingue deux grandes familles de compresseurs

- Compresseurs volumétriques
- Turbo-Compresseurs

4-4- Compresseurs volumétriques :

Un compresseur volumétrique se caractérise par l'encapsulation, ou emprisonnement, du fluide qui le traverse dans un volume fermé que l'on réduit progressivement. Un retour de ce fluide dans le sens des pressions décroissantes y est empêché par la présence d'une ou plusieurs parois mobiles. Dans ce type de machine, l'énergie cinétique communiquée au fluide ne joue généralement aucun rôle utile.

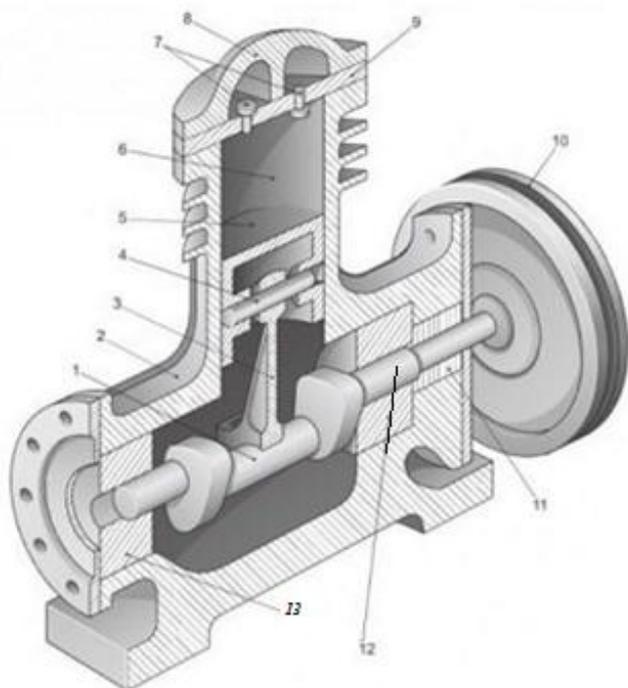
Le schéma suivant montre les différents types de compresseurs volumétriques



4-4-1 Compresseur alternatif à pistons

4-4-1-1 Définition

C'est le type de compresseur le plus répandu ; la compression des gaz est obtenue par le déplacement d'un ou de plusieurs pistons dans une capacité donnée (cylindre). Ce mouvement étant créé par un système bielle-manivelle (Figure 4-4) ou par un système à barillet (Figure 4-5); il faut également signaler les compresseurs à pistons axial (compresseurs à plateau oscillant) rencontrés surtout dans le domaine de la climatisation automobile.



- 1- Vilebrequin, 2- Enveloppe, 3- bielle,
- 4- axe de piston, 5- piston, 6- cylindre,
- 7- soupape (clapet), 8- Culasse, 9- plaque soupape, 10- volant, 11- joints d'étanchéité,
- 12- vilebrequin, 13- bague (guidage en rotation)

Figure 4-3 Les différents composants d'un compresseur à piston

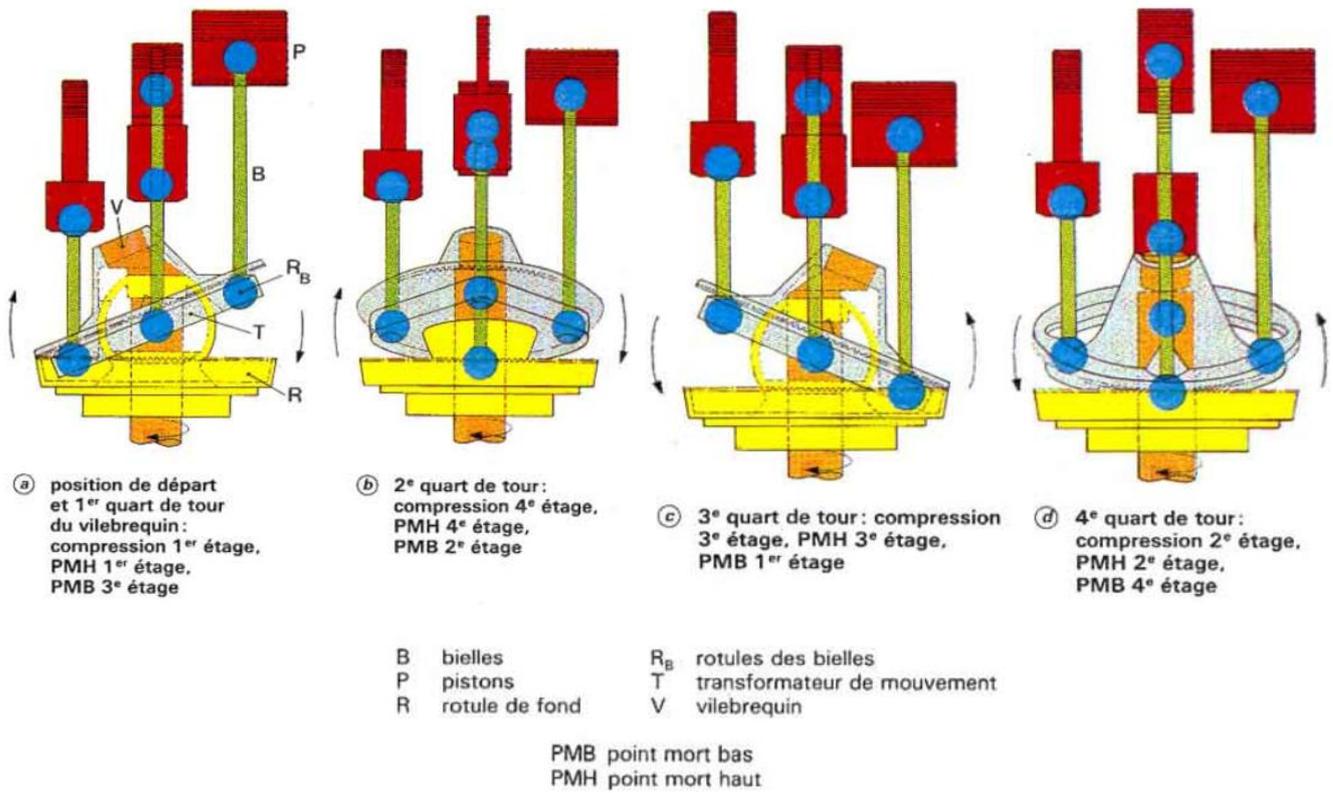


Figure 4-4 Compresseur à piston à barillet : Principe de fonctionnement
(Source techniques de l'ingénieur)

Les compresseurs à piston comprennent un piston ou plus, la figure 4-5 montre un compresseur à deux pistons

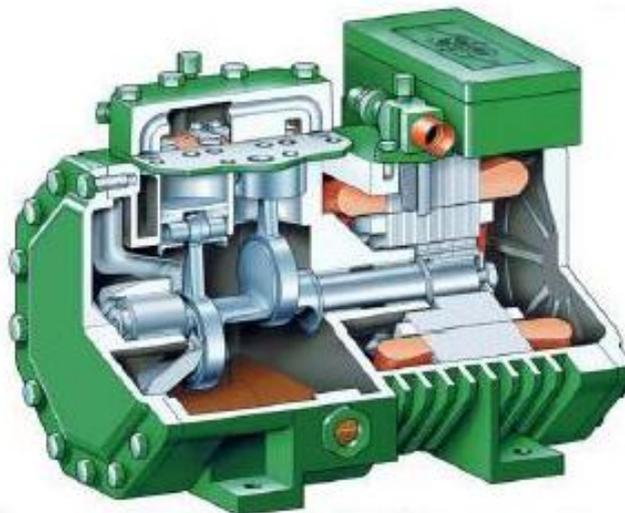


Figure 4-5 Compresseur à deux pistons

4-4-1-2 Fonctionnement d'un compresseur à piston

Le compresseur à piston fonctionne par aspiration/refoulement (voir figure 4-6)

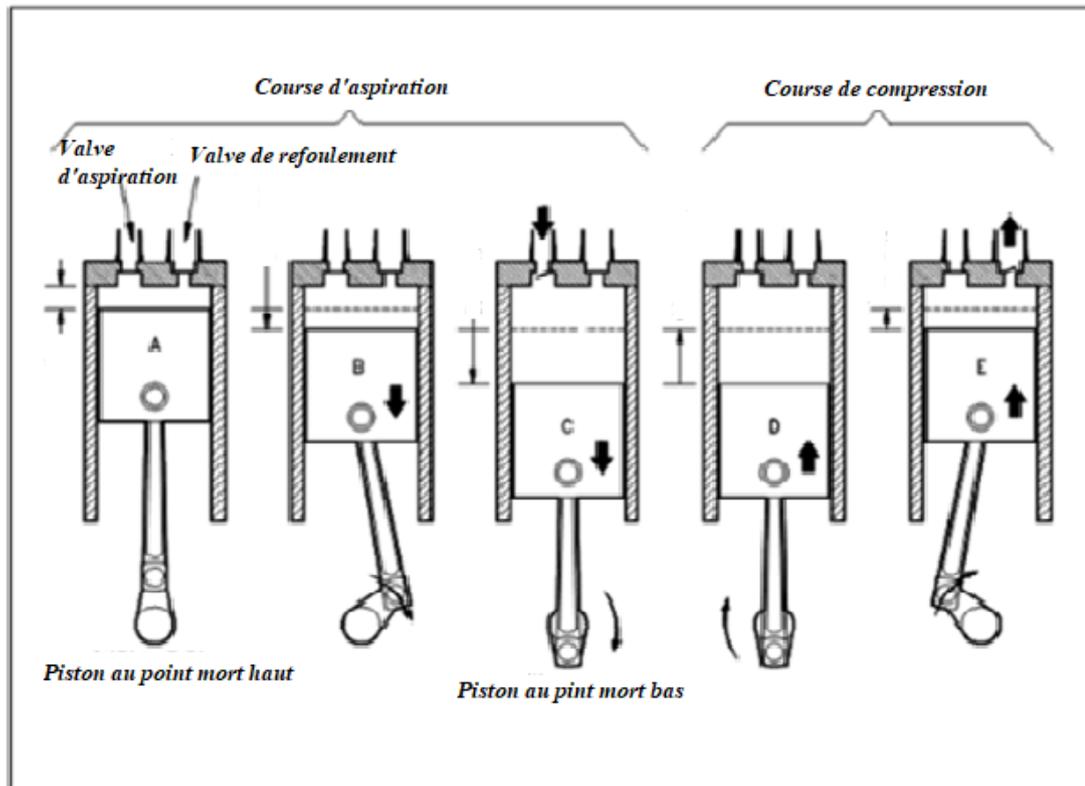


Figure 4-6 Principe de fonctionnement d'un compresseur à piston

4-4-1-3 Classement des compresseurs à piston

Les compresseurs à piston peuvent être classés selon leurs structures en plusieurs modèles :

- **Compresseur à piston simple effet** : la compression ne s'effectue que d'un seul côté du piston. Les clapets d'aspiration et de refoulement sont disposés dans la tête du cylindre. C'est la version la plus simple du compresseur à piston parce qu'il travaille sur une seule face, l'autre face donne sur le carter d'embellage. La bielle peut être articulée directement sur un axe de piston, comme dans les moteurs thermiques à pistons et le graissage peut s'effectuer par barbotage. Ce type est réservé aux machines de faibles puissances inférieures de 75KW.
- **Compresseur à piston double effet** : ce type de compresseur fonctionne sur ses faces en délimitant deux cellules de compression ce type est adopté aux machines de fortes puissances supérieure de 75KW.
- **Compresseur à piston étagée** : dans sa conception mécanique, ils comportent des éléments superposés, de diamètres différents, se déplaçant dans des cylindres concentriques. Cette disposition est généralement adoptée sur des machines de fortes puissances (supérieures à 75 kW).
- **Compresseur à piston différentielle** : sont des pistons à double effet de diamètres différents permettant d'obtenir une compression étagée, avec une cellule haute pression annulaire. Leur principal inconvénient est une étanchéité difficile à obtenir à haute pression.

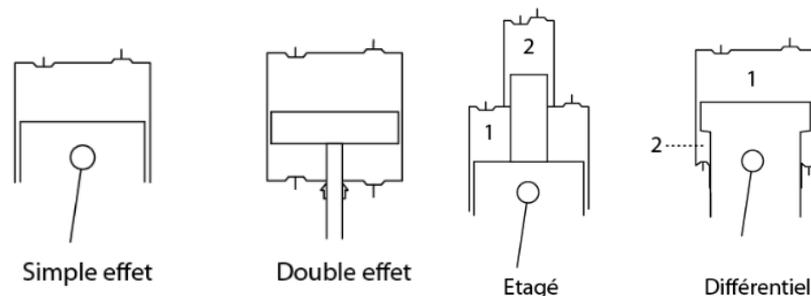


Figure 4-7 Différents types de piston

4-4-2 Compresseur rotatifs

4-4-2-1- Compresseurs à palettes

Le type à palettes à glissière rotative, comme illustré sur la figure 8, a des aubes longitudinales, coulissant radialement dans un rotor à fentes monté excentriquement dans un cylindre. La force centrifuge porte les aubes coulissantes contre le boîtier cylindrique, les aubes formant un certain nombre de cellules longitudinales individuelles dans l'anneau excentrique entre le boîtier et le rotor. L'orifice d'aspiration est situé là où les cellules longitudinales sont les plus grandes. La taille de chaque cellule est réduite par l'excentricité du rotor lorsque les aubes se rapprochent de l'orifice de refoulement, comprimant ainsi l'air.

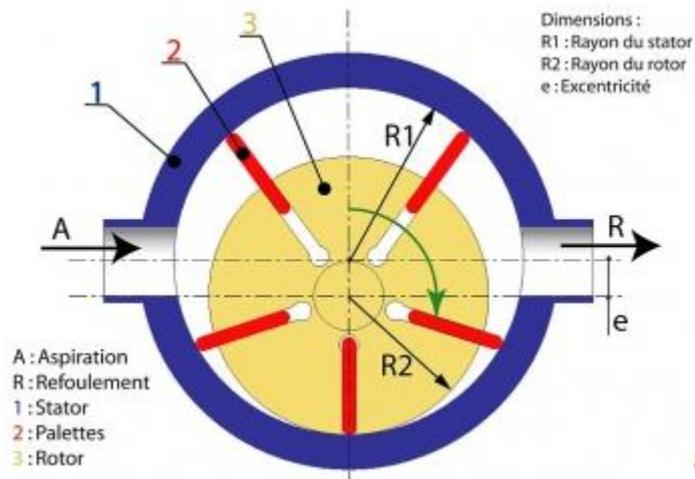


Figure4-8 Compresseur à palettes

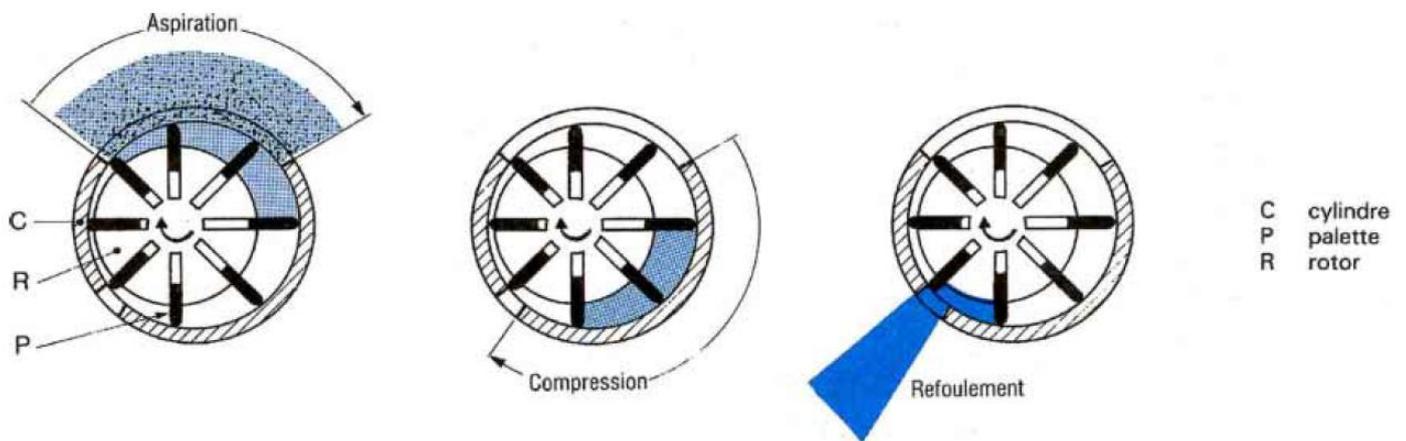


Figure4-9 Principe de fonctionnement d'un compresseur à palettes

4-4-2-2- Compresseurs à spirales

Les compresseurs à spirales aussi appelés compresseurs scroll dans lesquels la compression des gaz est obtenue par la rotation d'une spirale mobile dans une spirale fixe (figure 4.10)

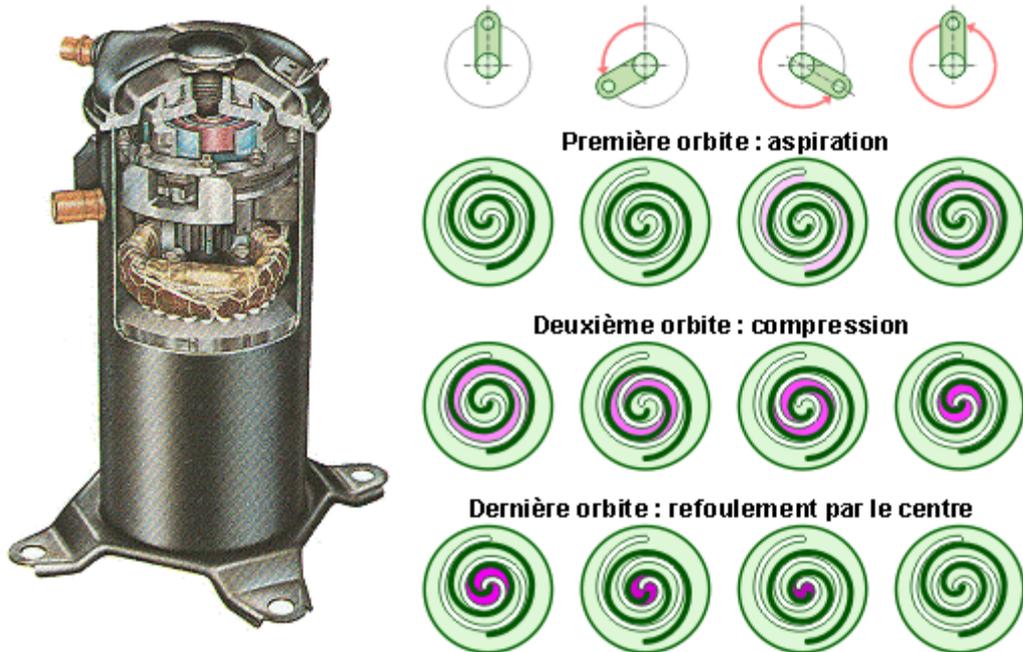


Figure4-10 Compresseurs à spirales et principe de fonctionnement

4-4-2-3- Compresseurs à vis

Les compresseurs à vis parmi lesquels il faut distinguer les compresseurs mono vis (mono rotor) et les compresseurs double vis (bi rotors).

a- Compresseur mono-vis

Ce compresseur comprend, à l'intérieur d'un corps en fonte en deux parties (figure 4-11) :

- une vis globique (1) à 6 filets entraînée directement par un moteur.
- deux roues dentées (2) et (3), de 11 dents chacun qui sont entraînés par la vis globique.

La vis entraîne les deux pignons placés symétriquement de part et d'autre de la vis, ce qui fait que chaque creux de filet de la vis est donc utilisé deux fois par tour. Le gaz aspiré remplit les filets de la vis où il se trouve mélangé à de l'huile. Ce mélange gaz + huile est alors emprisonné dans le volume ménagé dans le creux des filets de la vis et la périphérie du carter. La compression se fait progressivement par réduction de volume au fur et à mesure de la rotation des pignons. Cette augmentation de pression a lieu jusqu'au moment où un creux de la vis démasque une lumière placée dans chaque demi-carter et par laquelle le gaz chargé d'huile s'échappe, après avoir été comprimé.

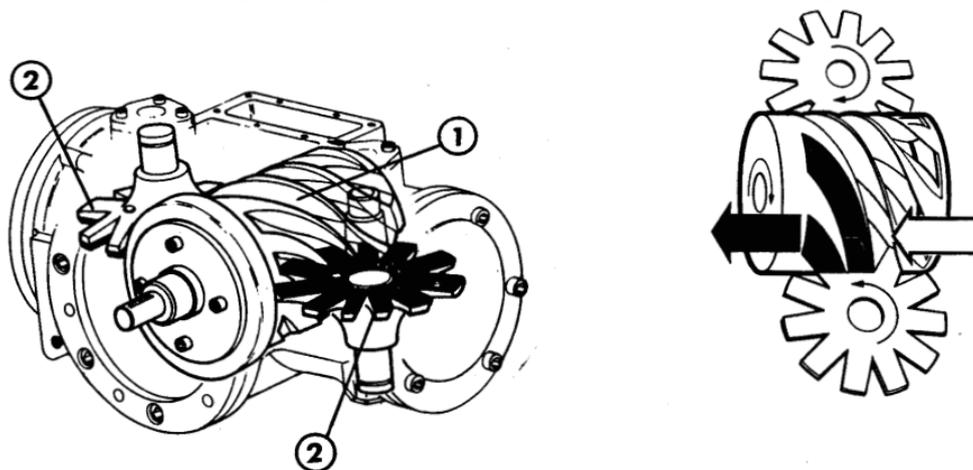


Figure 4-11 Compresseur mono-vis et son principe de fonctionnement

b- Compresseur double vis

Ce type de compresseur est constitué de deux rotors à l'intérieur d'un carter de forme appropriée (Figure 4-12), l'un formant des lobes (rotor mâle) et l'autre formant des alvéoles (rotor femelle).

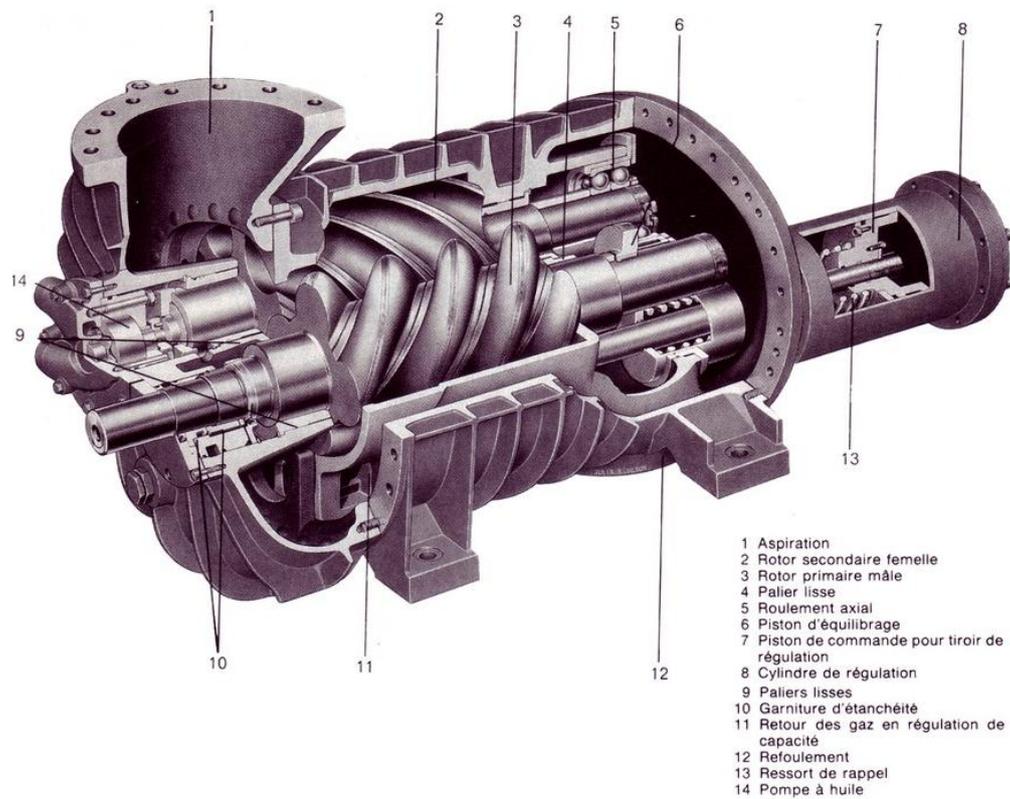


Figure 4-12 Conception d'un compresseur double vis

Le schéma de la figure 4-13 montre en détail le principe de compression d'un gaz par un compresseur double vis

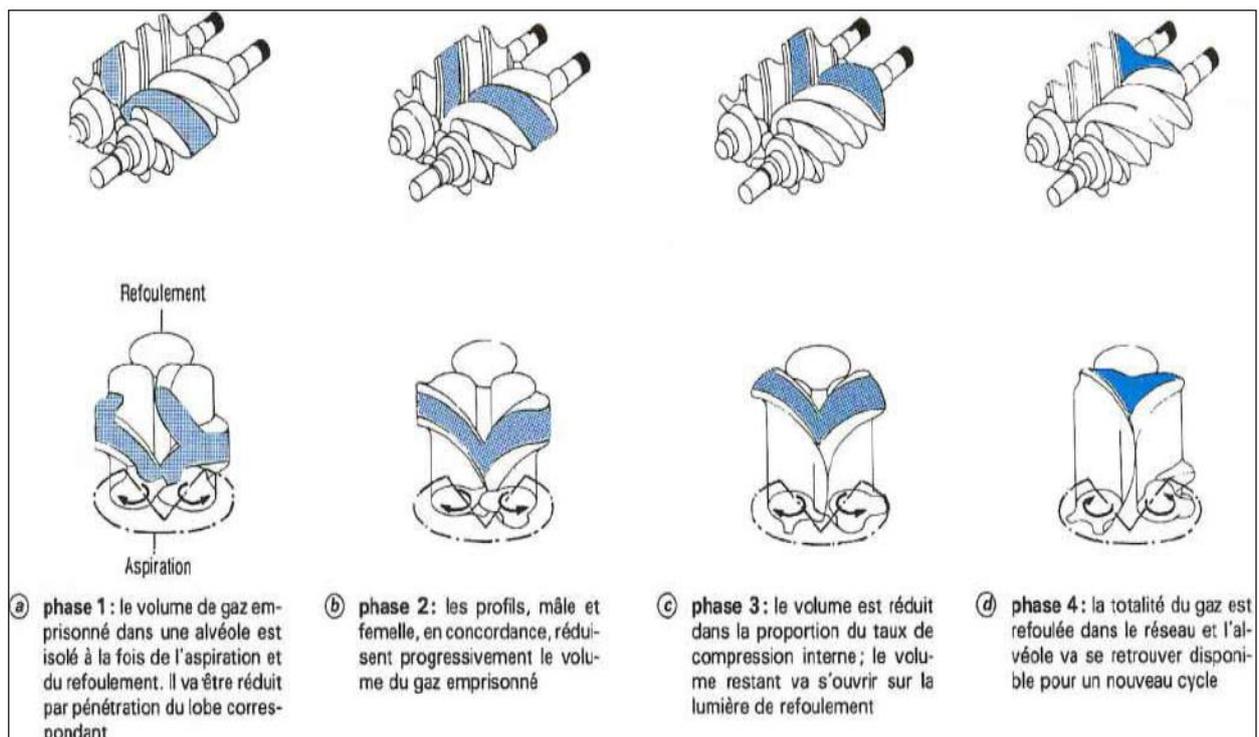


Figure 4-13 Principe de fonctionnement d'un compresseur double vis

4-4-2-4- Compresseurs à lobes

Ils sont généralement composés de deux rotors à dents à profils conjugués logés dans un carter. Les deux rotors sont entraînés en rotation inversée par un engrenage placé à l'extérieur de la chambre du compresseur qui assure en même temps la synchronisation et permet de effectuer des cycles d'aspiration, compression puis refoulement et cela en masquant ou dégageant des orifices d'aspiration (A) et de refoulement (R) pratiqués sur les côtés du carter (figure 4-11).

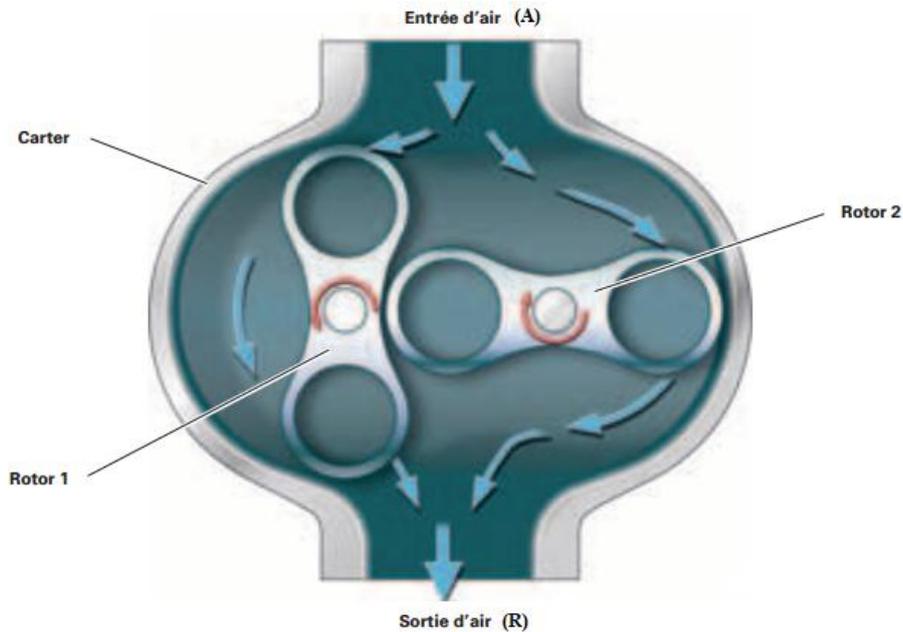


Figure 4-11 Principe de base de fonctionnement d'un compresseur à lobes

4-4-3 Bilan énergétique

Dans un compresseur volumétrique le fluide décrit le cycle théorique des transformations schématisé sur la figure 4-12

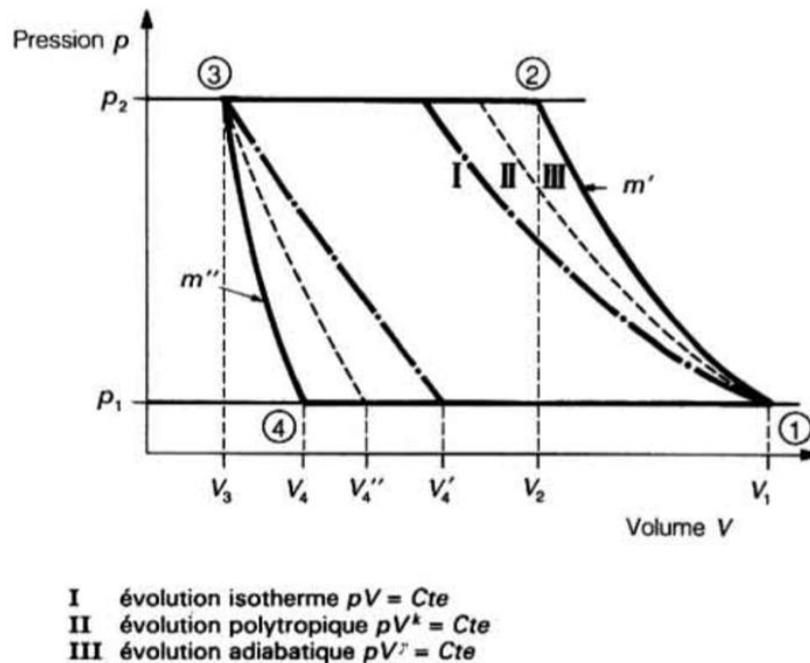
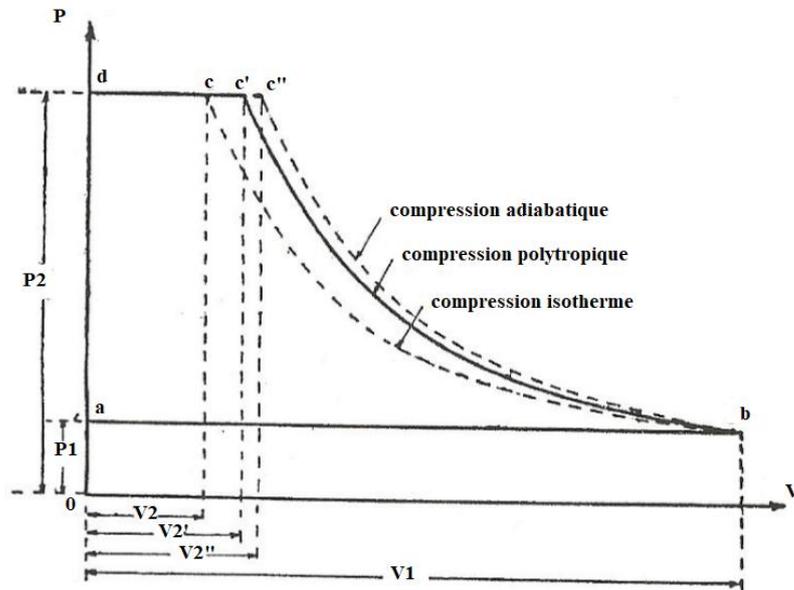


Figure 4-12 Diagramme théorique dans un cylindre d'un compresseur alternatif

a- Compresseur sans espace mort



Le travail fourni par un piston de compresseur qui comprime un gaz après l'avoir admis dans un cylindre :

- Lors de l'admission du gaz dans le cylindre a-b, le piston effectue un travail sous une pression extérieure constante P_1 .

$$W_{adm} = - \int_0^1 -PdV = -P_1V_1$$

- Lors de la compression b-c, le gaz, via le piston, reçoit le travail de compression W_{12} .

$$W_{12} = - \int_1^2 -PdV$$

- Lors de l'échappement du gaz hors du cylindre c-d, le piston effectue un travail sous pression constante.

$$W_{échap} = \int_2^0 -PdV = P_2V_2$$

Le travail total effectue est donc :

$$W_i = \int_1^2 PdV + P_2V_2 - P_1V_1$$

En remarquant que :

$$P_2V_2 - P_1V_1 = \int_1^2 d(PV)$$

Et que $\int_1^2 d(PV) = \int_1^2 PdV + \int_1^2 VdP$

Le travail total par cycle est donc :

$$W_{i\ cyc} = \int_1^2 PdV + P_2V_2 - P_1V_1 - \int_3^4 PdV + P_1V_4 - P_2V_3$$

$$W_{i\ cyc} = \int_1^2 V_{12}dP - \int_3^4 V_{34}dP = (m' - m'') \int_{P_1}^{P_2} v dP$$

Avec :

$$V_{12} = m'v \text{ et } V_{34} = m''v$$

v est le volume spécifique (massique)

$m' - m''$: masse du gaz traversée par cycle.

Le travail massique total par cycle est :

$$W_{i\text{ cyc}} = \int_{P_1}^{P_2} v dP$$

- **Cas particuliers**

- **Evolution isotherme**

Une telle évolution serait réalisée dans une cellule de compression refroidie pendant la compression ou réchauffée pendant la détente, de telle façon que le gaz comprimé reste à une température constante.

$$W_{i\text{ cyc}} = \int_{P_1}^{P_2} v dP = P_1 v_1 \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)$$

-

- **Evolution adiabatique**

On dit qu'une évolution est adiabatique si la compression ou la détente d'un gaz s'effectuent sans échange de chaleur avec le milieu extérieur. S'il s'agit d'une compression, le gaz s'échauffe en absorbant tout le travail fourni par les forces extérieures et, s'il s'agit d'une détente, il se refroidit en cédant la chaleur équivalente au travail dépensé contre les forces extérieures. Dans les deux cas, en négligeant les frottements et en supposant le gaz parfait, le travail total massique par cycle est :

$$W_{i\text{ cyc}} = P_1 v_1 \frac{\gamma}{\gamma - 1} \left(\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right)$$

- **Évolution polytropique**

Une évolution polytropique est une évolution intermédiaire entre une évolution isotherme et une évolution adiabatique, dans la pratique les compressions et les détentes sont des évolutions polytropiques. Le travail total massique par cycle est :

$$W_{i\text{ cyc}} = P_1 v_1 \frac{k}{k - 1} \left(\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right)$$

Avec $1 < k < \gamma$

Rendement théorique d'un compresseur volumétrique

Après que la compression atteint sa pression de refoulement, le gaz est refoulé à travers un orifice vers l'utilisation, ce type de machine est dit à taux de compression fixe.

La pression P_2 est donnée par le constructeur, la pression P_r est la pression de refoulement en aval du compresseur. Le travail indiqué est donné par :

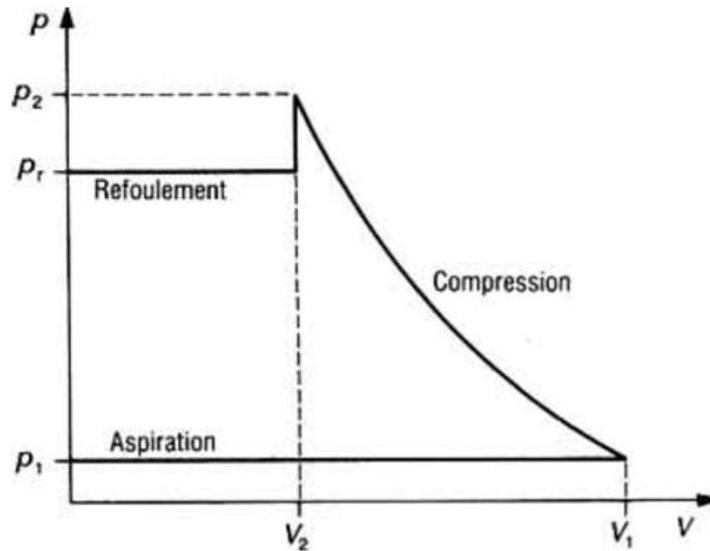


Figure 4-13. Cycle théorique d'une machine à taux de compression fixe

$$\begin{aligned}
 W_i &= \int_{V_1}^{V_2} P dV + P_r V_2 - P_1 V_1 \\
 &= \frac{P_1 V_1}{k-1} [Rv^{(k-1)} - 1] + P_r V_2 - P_1 V_1 \\
 &= \frac{P_1 V_1}{k-1} \left[Rv^{(k-1)} + \frac{Rc}{Rv} (k-1) - k \right]
 \end{aligned}$$

Avec :

$$Rc = \frac{P_r}{P_1} \quad \text{et} \quad Rv^k = \frac{P_2}{P_1}$$

Et pour $P_2 = P_r$

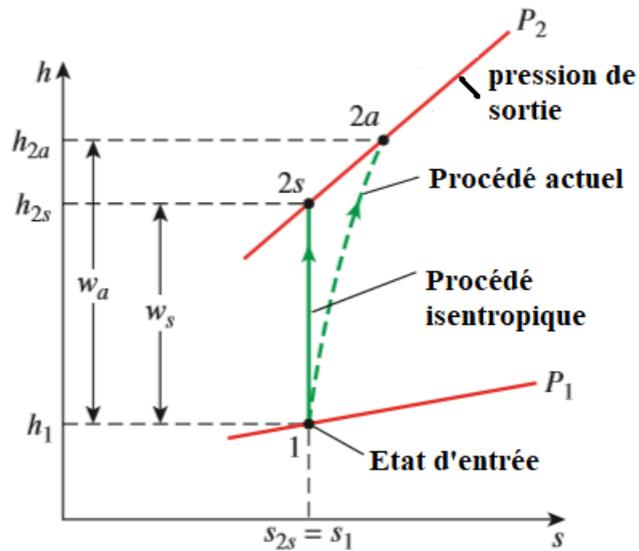
$$W_i^* = \frac{P_1 V_1}{k-1} k \left[Rc^{\frac{(k-1)}{k}} - 1 \right]$$

Le rendement théorique pour une compression s'écrit :

$$\eta_{th} = \frac{W_i^*}{W_i} = \frac{k \left[Rc^{\frac{(k-1)}{k}} - 1 \right]}{Rv^{(k-1)} + \frac{Rc}{Rv} (k-1) - k}$$

Rendement isentropique d'un compresseur

Le rendement isentropique d'un compresseur est défini comme le rapport de la puissance du compresseur isentropique à celle du compresseur réel (de façon à ce que ce rendement soit toujours inférieur à l'unité)



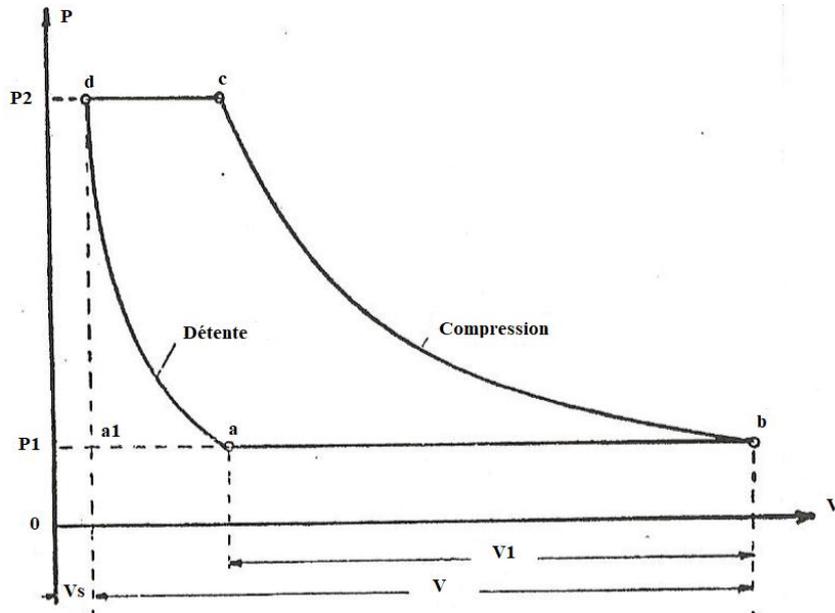
$$\eta_{ad} = \frac{W_s}{W_a} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$$

Rendement volumétrique d'un compresseur

Le rendement volumétrique d'un compresseur permet de comparer le débit volumique du gaz aspiré au débit volumique balayé

$$\eta_V = \frac{qv_{aspiré}}{qv_{balayé}}$$

b- Compresseur avec espace mort



Le rendement volumétrique η_V s'écrit :

$$\eta_V = \frac{V_1}{V} = \frac{V + V_s - V_a}{V}$$

Donc

$$\eta_V = \varepsilon + 1 - \frac{V_a}{V}$$

Avec

$$\varepsilon = \frac{V_s}{V} \quad , \quad V_a = V_d \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{k}} \quad \text{et} \quad V_s = V_d$$

Alors
$$\eta_V = 1 - \varepsilon \left(\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{k}} - 1 \right)$$

4-5- Turbocompresseurs

À la différence des machines volumétriques où le fluide est enfermé dans un volume fermé, on réalise dans un turbocompresseur un écoulement continu de fluide auquel on communique de l'énergie grâce à des aubages mobiles entraînés par un rotor.

Il existe deux principaux modes de circulation du fluide par rapport au rotor d'une turbomachine : la circulation axiale, presque toujours réalisée dans les turbocompresseurs d'avion, et la circulation radiale, très utilisée pour les turbocompresseurs centrifuges terrestres, notamment pour la réfrigération ou pour la suralimentation des moteurs automobiles (figure4-14.)

D'une manière générale, un turbocompresseur est constitué de quatre éléments en série (figure4-15.)

- un convergent C d'entrée, ou distributeur, pièce fixe qui a pour fonction d'orienter correctement les filets fluides à leur entrée dans la roue mobile, et de les accélérer légèrement ;
- la roue mobile RM, ou rotor, animée d'un mouvement de rotation autour d'un arbre. Cette roue comporte des aubages délimitant des canaux, entre lesquels se répartit le débit de fluide. Elle communique au fluide l'énergie mécanique des aubages, sous forme d'énergie cinétique, thermique et de pression ;
- le diffuseur D est un organe fixe qui a pour fonction de transformer en pression une partie de l'énergie cinétique acquise par le fluide lors de la traversée de la roue. Selon les cas, ce diffuseur peut comporter ou non des aubages. On dit qu'il est cloisonné ou lisse ;
- une volute V, fixe elle aussi, qui redresse les filets fluides sur la périphérie de la roue, et les dirige vers l'aval de la turbomachine.



Figure 4-14 différents types de turbocompresseur

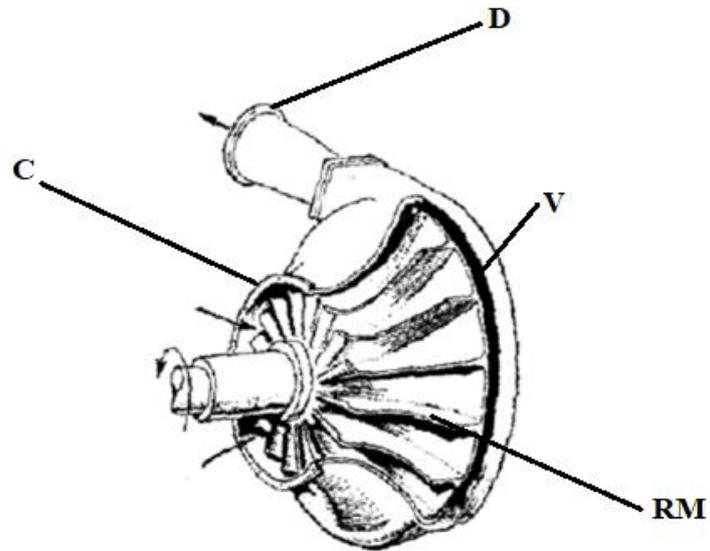


Figure 4-15 Composition d'un turbocompresseur

Références bibliographiques

YUNUS A. ÇENGEL et MICHAEL A. BOLES, THERMODYNAMICS An engineering approach, 8^{ième} ed., MacGraw-Hill Education, New York, 2015.

THIERRY DESTOOP ; Compresseurs volumétriques ; Technique de l'ingénieur B 4 220,1989.