

Chapitre 2 : les pompes et les compresseurs

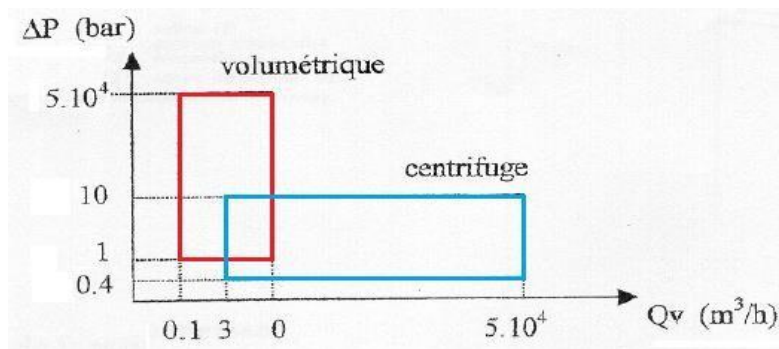
I. Les pompes

1. Classification

Il existe différentes pompes qui peuvent se classer en deux grandes familles :

- Les pompes centrifuges
- Les pompes volumétriques

L'utilisation d'un type de pompes ou d'un autre dépend des conditions d'écoulement du fluide. De manière générale, si on veut augmenter la pression d'un fluide on utilisera plutôt les pompes volumétriques, tandis que si on veut augmenter le débit on utilisera plutôt les pompes centrifuges [7].



2. Les Pompes Centrifuges

Définition

La pompe centrifuge est une machine tournante qui grâce à un rotor à aubes convenablement orientées, augmente l'énergie cinétique et projette à l'aide de la force centrifuge le liquide à la périphérie sur la volute.

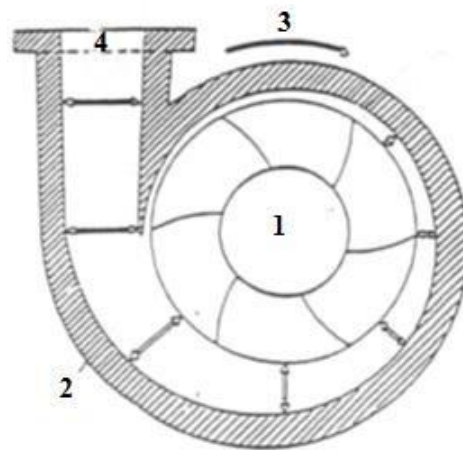
A la sortie et à l'aide d'un divergent, une grande partie de l'énergie cinétique se transforme en pression motrice.

Constitution

Les pompes centrifuges sont de construction très simple en version de base. Elles sont essentiellement constituées d'une pièce en rotation le rotor appelée aussi roue ou hélice qui tourne dans un carter appelée corps de pompe ou volute.

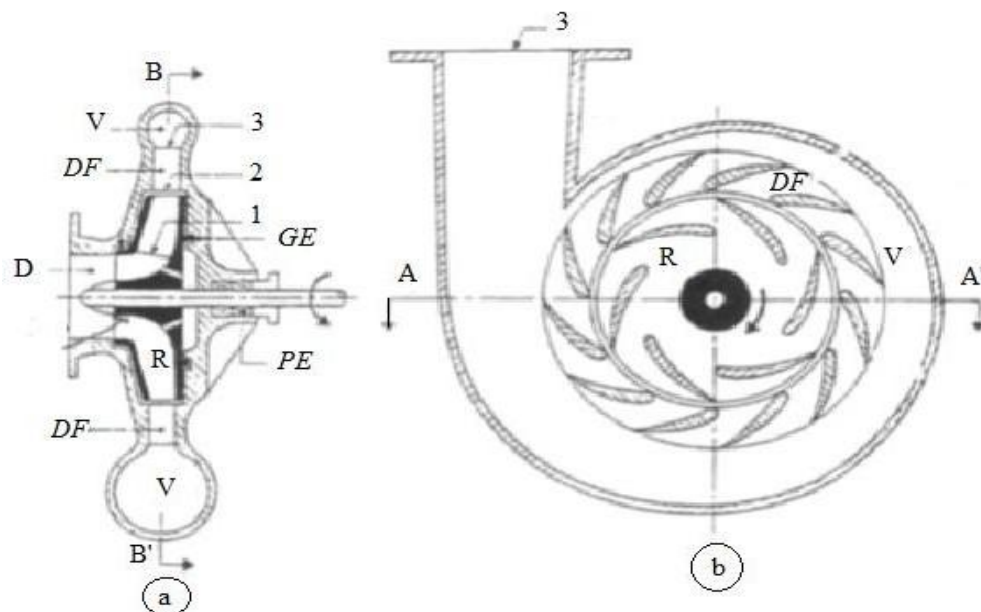
Ces machines comprennent donc :

- Un distributeur (arrivée du liquide)
- L'ouïe d'aspiration
- Le corps de la pompe ou volute
- Le refoulement qui va s'élargir
- L'ouïe de refoulement



Pompe centrifuge
(poussées radiales)

- 1- Impulseur ouïe d'aspiration
- 2- Volute corps de pompe (Stator)
- 3- Sens de rotation de l'impulseur
- 4- Brise de refoulement



D : Distributeur (D-1)
R : Rotor (1-2)
DF : Diffuseur aileté (2-3)
(a) : Coupe axiale (A-A')

V : Volute (3)
GE : Garniture d'étanchéité
PE : Presse-étoupe
(b) : Coupe Transversale BB'

Figure (1) : Pompe centrifuge monocellulaire (coupes) [8].

Le principe de fonctionnement

On peut décomposer le fonctionnement en deux étapes :

- **L'aspiration :**

Le liquide est aspiré au centre du rotor par une ouverture appelée distributeur dont le rôle est de conduire le fluide depuis la conduite d'aspiration jusqu'à la section d'entrée du rotor.

La pompe étant amorcée, c'est à dire pleine de liquide, la vitesse du fluide qui entre dans la roue augmente et par conséquent la pression dans l'ouïe diminue et engendre ainsi une aspiration et maintient l'amorçage.

- **L'accélération**

Le rotor transforme l'énergie mécanique appliquée à l'arbre de la machine en énergie cinétique. A la sortie du rotor, le fluide se trouve projeté dans la volute dont le but est de collecter le fluide et de le ramener dans la section de sortie. La section offerte au liquide étant de plus en plus grande, son énergie cinétique se transforme en énergie de pression.

Les différents montages

Il existe deux types de montage

- En aspiration
- En charge

Caractéristiques

Les hauteurs manométriques totales fournies ne peuvent dépasser quelques dizaines de mètres. Pour dépasser ces valeurs on utilise des pompes centrifuges multicellulaires où plusieurs roues sont montées en série sur le même arbre. Le refoulement d'une des pompes communique avec l'aspiration de la pompe suivante.

Il est également possible de coupler en série plusieurs de ces pompes.

Le rendement est de l'ordre de 60 à 70 %: il est inférieur à celui des pompes volumétriques. Les pompes centrifuges vérifient des lois (**lois de similitude**) qui à partir d'une courbe caractéristique établie pour une vitesse de rotation N de la roue de la pompe permettent d'obtenir la caractéristique pour une vitesse de rotation N' quelconque.

Si on connaît pour une vitesse N , le débit Q_{vN} , la hauteur manométrique totale H_{tN} et la puissance absorbée P_N , on sait qu'il existe deux courbes caractéristiques (H_t en fonction de Q_v et P en fonction de Q_v). Pour la vitesse N' Les lois de similitude permettent de déterminer $Q_{vN'}$, $H_{tN'}$ et $P_{N'}$ [8].

$$Q_{v_{N'}} = Q_{v_N} \cdot \frac{N'}{N}$$

$$H_{t_{N'}} = H_{t_N} \cdot \left(\frac{N'}{N} \right)^2$$

$$P_{N'} = P_N \cdot \left(\frac{N'}{N} \right)^3$$

On peut ainsi reconstruire point par point les caractéristiques pour la vitesse de rotation N' , en prenant des points différents des caractéristiques établies pour la vitesse N .

2.4 Avantages et inconvénients

Avantages

- Ces machines sont de construction simple et demande peu d'entretien,
- Prix modérés et coût de maintenance faible,
- Matériaux de construction très variés (fluide corrosif possible),
- Pompes compactes et peu encombrantes,
- Bons rendements,
- Le débit est continu,
- En cas de dysfonctionnement du circuit de refoulement (colmatage), la pompe ne subit aucun dommage.

Inconvénients

- Elle n'est pas auto-amorçante,
- Elle ne fonctionne avec des fluides trop visqueux,
- Elle nécessite des dispositifs d'équilibrage.

Lorsque la roue tourne, l'équilibre mécanique doit être parfait. Or, au cours du fonctionnement, la roue subit de la part du fluide une dépression qui tend à faire déplacer l'axe du rotor vers l'aspiration (forte poussée). Dans certains cas, une butée ne suffit pas et on peut détériorer l'axe du rotor (les paliers).

Pour éviter ce problème on équipe la pompe d'un disque d'équilibrage, ou on monte sur le même arbre des roues dos à dos ou encore on perce des petits trous au voisinage du moyeu de manière à équilibrer les pressions de part et d'autre sur la paroi.

2.5. Les différents types de pompes centrifuges

Il existe différentes formes de roues et d'aubes qui induisent une classification de ces machines

- Des rotors fermés ou rotors ouverts.
- On peut monter plusieurs roues sur le même arbre ce qui permet d'augmenter la pression de refoulement.

On les appelle pompes multicellulaires ou multi-étagées [9].

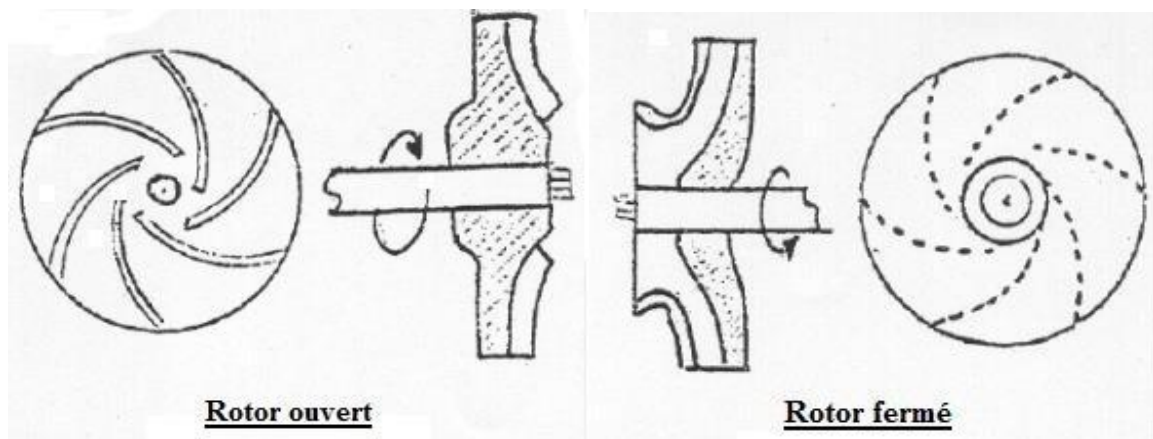


Figure (2) : Pompes multi-étagées [9]

3. Les Pompes Volumétriques

Définition et principe

Le déplacement du fluide est dû aux transports d'un volume V_0 à chaque rotation.

Les pompes volumétriques ou à capacité variable sont des pompes dans lesquels l'écoulement du fluide résulte de la variation d'une capacité occupée par le fluide.

On distingue deux grands types de pompes volumétriques :

- Les pompes alternatives
- Les pompes rotatives

4. Les pompes alternatives ou à pistons axiaux

Les pompes à piston constituent l'un des plus anciens types de pompes et demeurent parmi les plus répandues. Comme son nom l'indique la pompe à piston utilise les variations de volumes occasionnées par le déplacement d'un piston dans un cylindre.

Ces machines ont donc un fonctionnement alternatifs et nécessite un jeu de soupapes ou de clapets pour obtenir tantôt l'aspiration dans le cylindre tantôt son refoulement.

Il existe différentes types de pompes à piston :

- **Pompes à simple effet** : le refoulement et l'aspiration n'a lieu que pour un sens de déplacement du piston

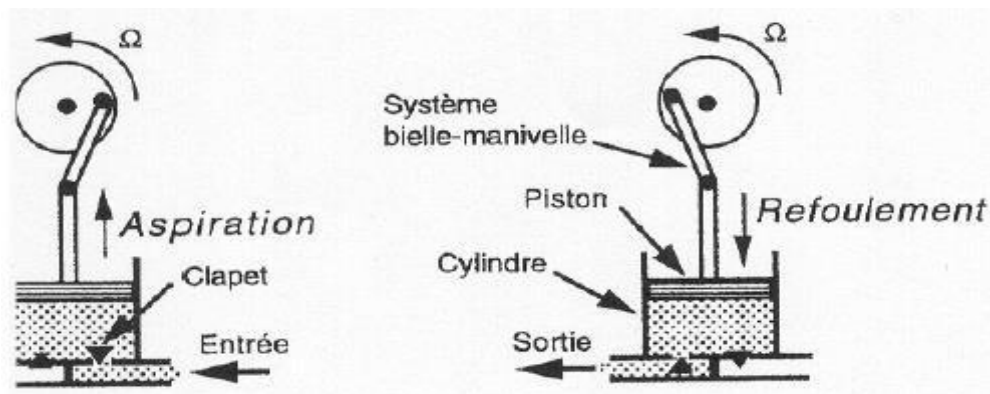


Figure (3) : Pompes à simple effet

- **Pompes à double effet** : Le piston travaille dans les deux sens

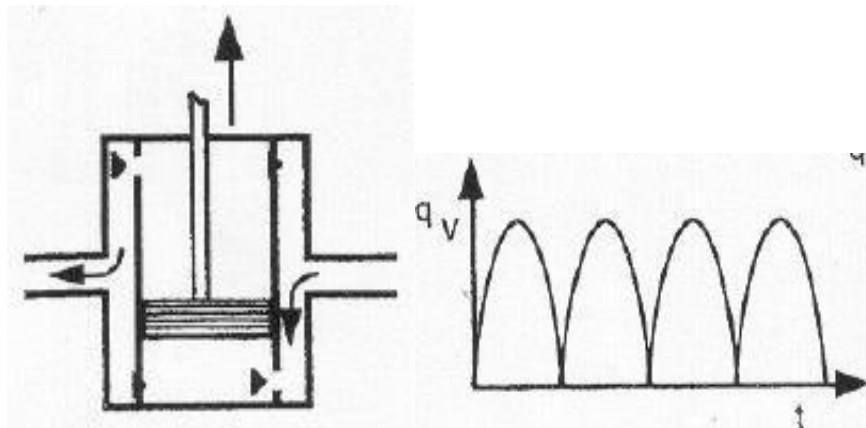


Figure (4) : Pompes à double effet [9]

- **Pompes à plusieurs pistons déphasés**

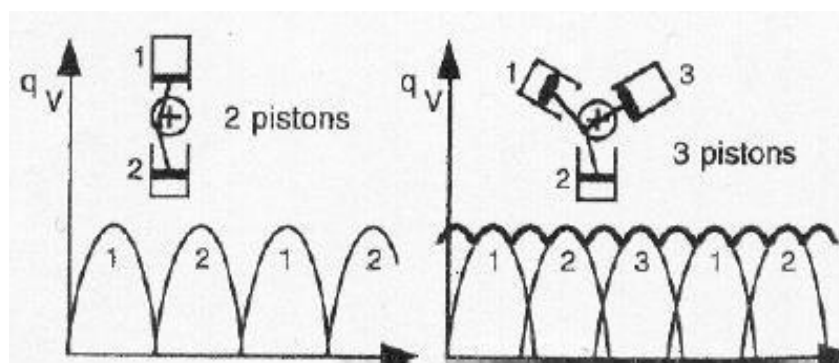


Figure (5) : Pompes multi-pistons [9]

Réglage de débit et de pression: En fonctionnement, la pompe est en cylindrée maximum jusqu'à ce que la pression du circuit atteigne la valeur de la régulation de pression. La cylindrée va donc diminuer jusqu'à trouver le débit consommé par le circuit sous une valeur de pression correspondant au tarage de la régulation. Ce type de régulation est aussi appelé annulation de cylindrée à pression maximum, ou encore pression constante [10].

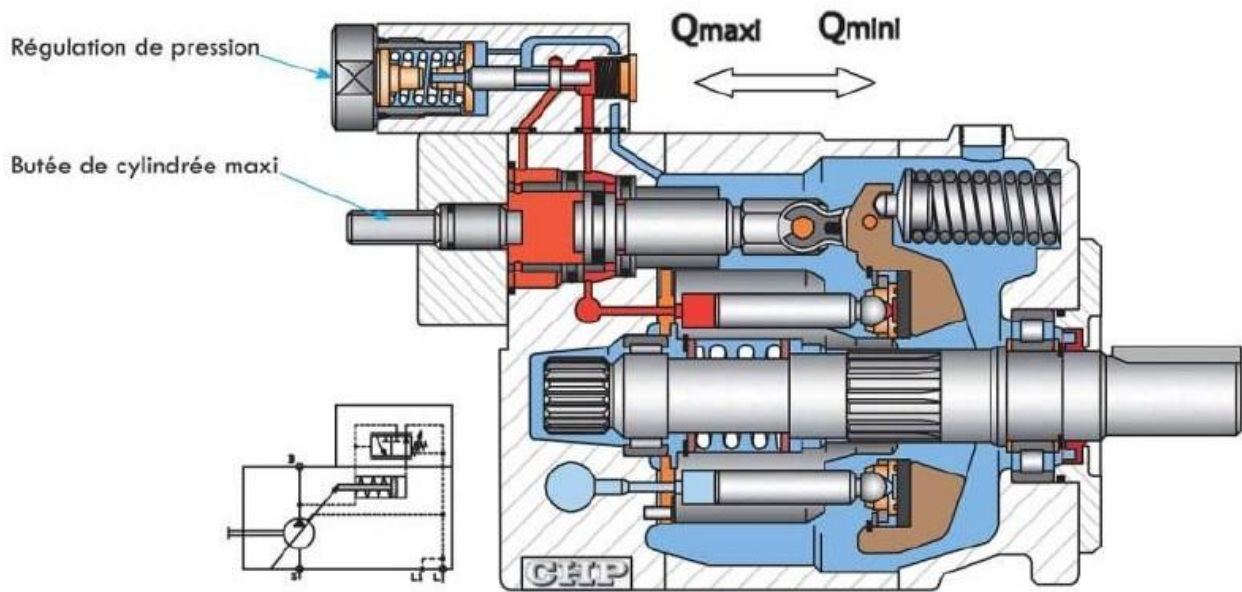


Figure (6) : Réglage de débit et de la pression [10].

Remarque : Soit S la surface du piston, L sa course, V_0 le volume de liquide déplacé est égale à $S.L$. Si le piston effectue N allers retours en 1 seconde alors le débit volumique théorique d'une pompe à piston simple est donnée par la relation suivante :

$$Q_v = N . S . L$$

5. Les pompes à membrane (variante des pompes à piston)

Dans ce type de pompe, le fluide n'entre pas en contact avec le piston. Il est séparé par une membrane souple ou diaphragme.

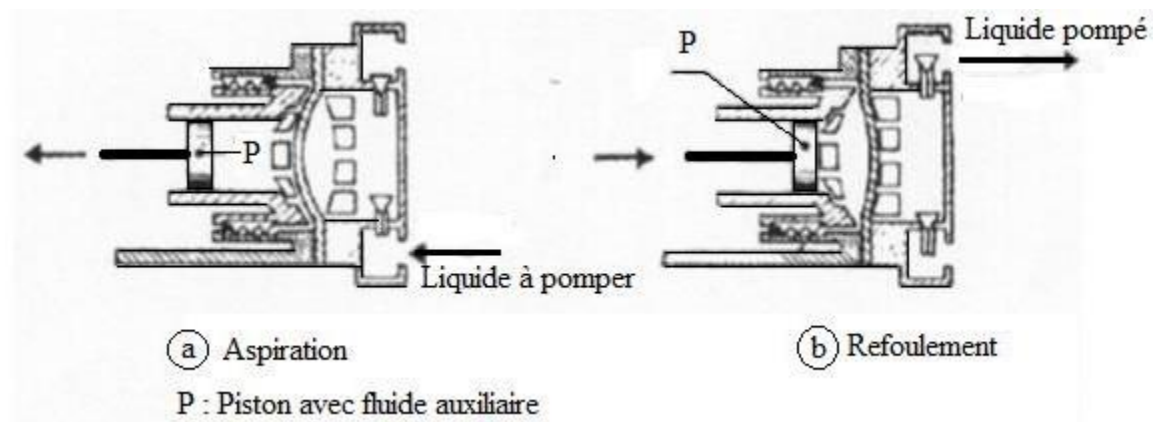


Figure (7) : Pompe à piston [8]

6. Les pompes rotatives

Définition et principe :

Deux rotors tournent en roulant l'un sur l'autre sans glisser pour éviter les frottements et déplacent un volume de fluide.

Il existe différentes pompes rotatives:

Pompes à engrenages

Les pompes hydrauliques volumétriques à engrenage sont de constitution simple parce qu'elles ne possèdent que peu de pièces mobiles internes. Ce type de pompe présente l'avantage d'être celui le moins coûteux.

Comme le nom l'indique, les pompes à engrenage renferment deux roues dentées qui s'engrènent (s'engagent) l'une dans l'autre.

Il existe deux catégories de pompes à engrenage [8] :

- Les pompes à engrenage externe.
- Les pompes à engrenage interne.

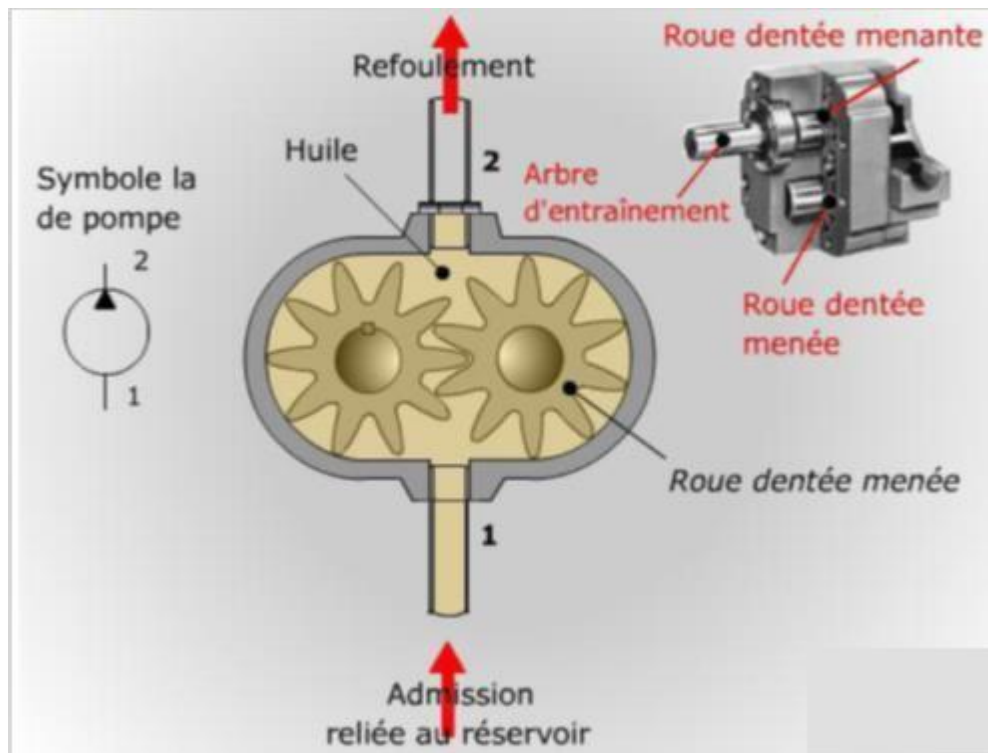


Figure (8) : Pompes à engrenage [8].

Pompes à lobes :

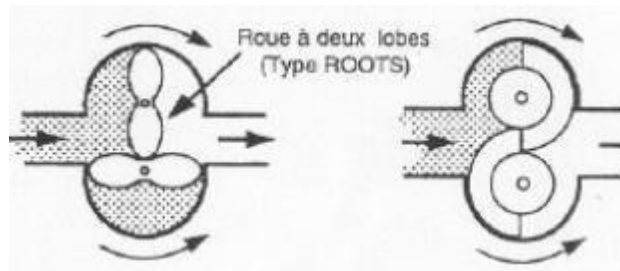


Figure (9) : pompe à deux lobes [9]

Pompes à pistons radiaux : Les pistons sont disposés radialement au stator, leurs axes sont perpendiculaires à l'arbre d'entraînement principal. Une bielle-excentrique de forme particulière communique un mouvement alternatif aux pistons permettant ainsi les phases d'admission et de refoulement du fluide.

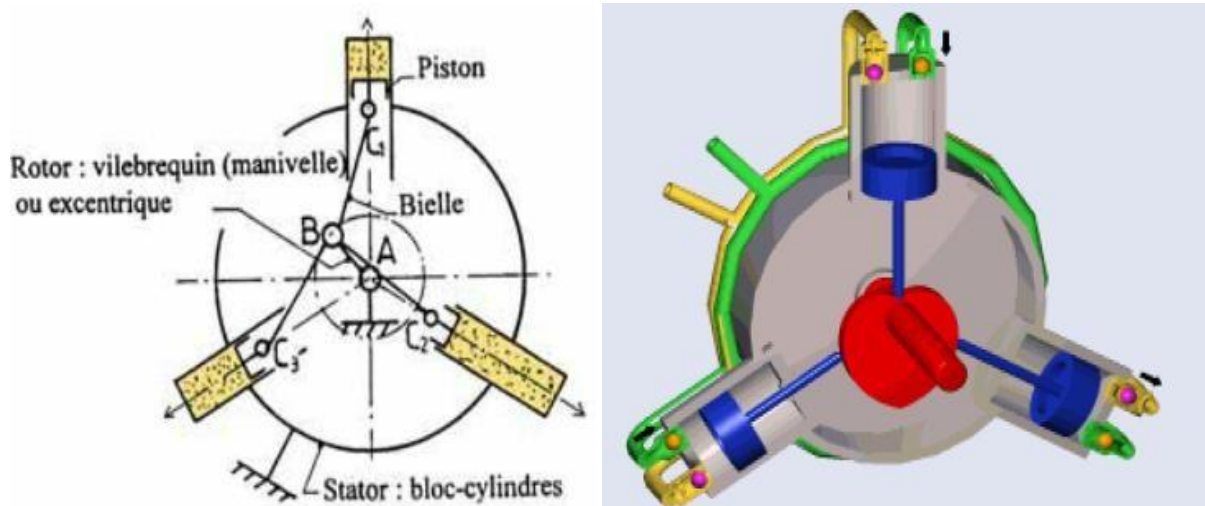


Figure (10) : Pompe à pistons radiaux [9]

Pompes à vis : Deux vis dont l'une est motrice, tournent en sens inverse, créant ainsi d'un côté une zone d'aspiration et de l'autre une zone de refoulement. Cette pompe existe aussi avec trois vis dont un est central [9].

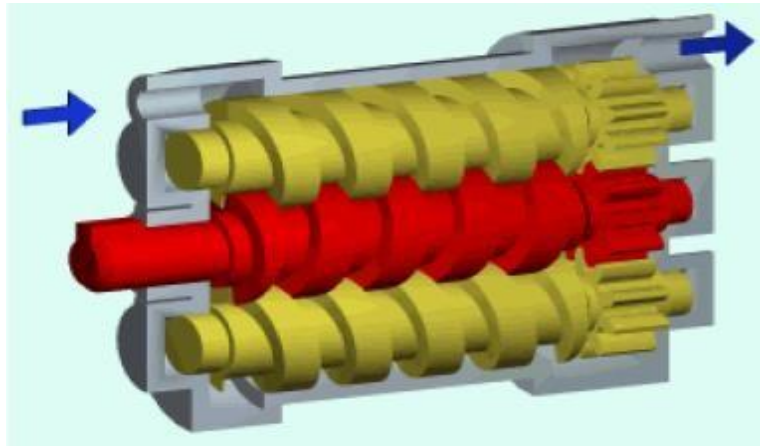


Figure (11) : Pompe à Vis [9]

Pompes à rotor hélicoïdal excentré

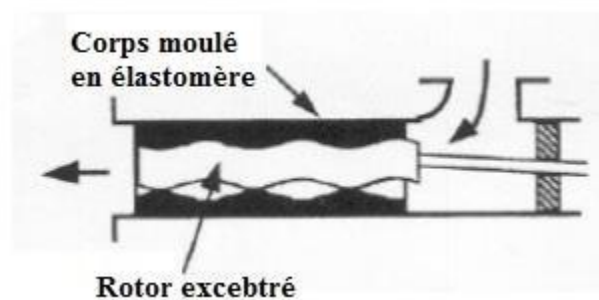


Figure (12) : Pompe à rotor hélicoïdal excentré [9]

Pompes à palettes rigides ou souples : La rotation du rotor entraîne celle des palettes dont les extrémités sont continuellement en contact avec le stator, grâce à la force centrifuge. Outre, des ressorts de compression poussent les bases des palettes.

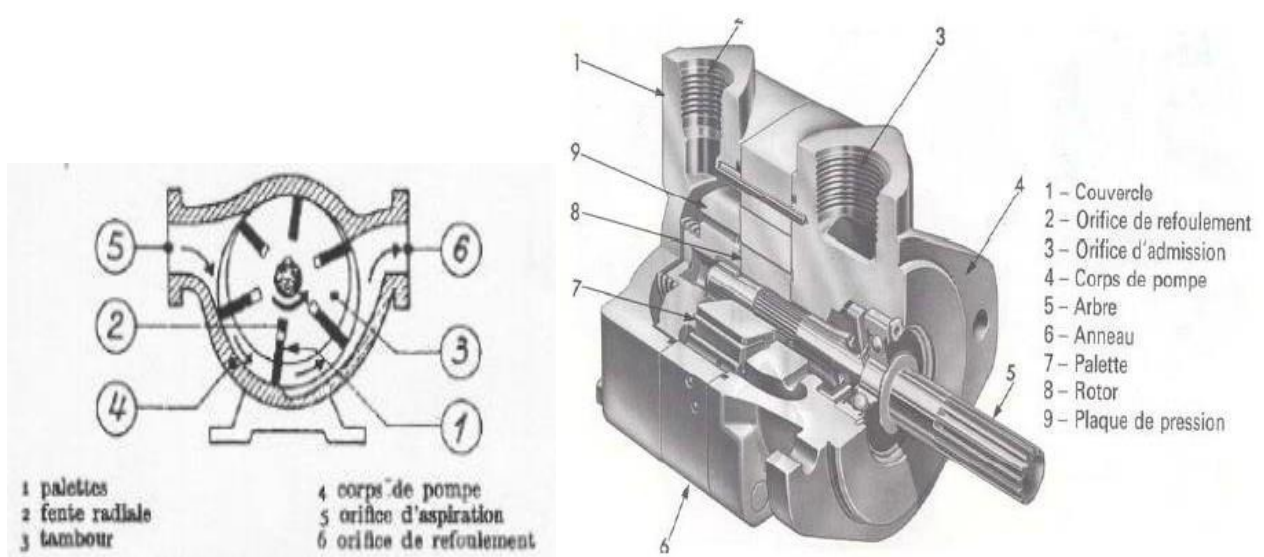


Figure (13). Pompes à palettes [9]

7. Avantages et inconvénients

Avantages

- Construction robuste ;
- Pompage possible de liquide très visqueux ;
- Rendement élevé ;
- Amorçage automatique en fonctionnement normal ;
- Obtention de faibles débits facile à mesurer sous pression élevée (pompes doseuses alimentaires).

Inconvénients

- Appareils plus lourds et plus encombrants ;
- Débit pulsé ce qui nécessite l'installation d'appareils spéciaux (anti coup de bélier) ;
- Impossibilité d'obtenir de gros débits sous faible pression ;
- Danger de surpression dans le circuit de refoulement d'où la présence indispensable de sécurités (by-pass et soupape de sûreté) ;
- Impossibilité en général de pomper des liquides chargés ;
- Prix d'achat plus élevé ;
- Frais d'entretien plus élevés.

II. Les moteurs hydrauliques :

Frères jumeaux des pompes, ce sont probablement les composants qui font apparaître de la façon la plus spectaculaire les énormes possibilités des techniques hydrauliques, ce sont les moteurs (avec les vérins) qui concrétisent la puissance mise en œuvre.

Par conséquent, à l'inverse des pompes, les moteurs sont des composants qui retransforment la puissance hydraulique (pression x débit) en puissance mécanique (couple x vitesse de rotation). On peut ajouter que l'intérêt principal des moteurs hydrauliques réside dans le rapport puissance/encombrement particulièrement avantageux par rapport aux autres types de moteurs, qu'ils soient électriques ou thermiques.

Ces moteurs entraînent des systèmes mécaniques. Si le couple résistant devient trop important, la pression monte. Quand elle atteint la valeur de réglage du limiteur de pression, le débit retourne au réservoir.

Leur avantage c'est qu'ils développent une grande puissance pour un encombrement réduit.

1. Principaux types de moteurs hydrauliques :

Les moteurs sont classés en deux familles [9] :

- Les moteurs rapides (les moteurs à palettes, les moteurs à engrenages, les moteurs à pistons axiaux, et les moteurs à pistons radiaux).
- Les moteurs lents (cylindrée élevée).

2. Moteur à palettes:

L'huile sous pression provoque la rotation des palettes implantées sur le rotor.

Avantages : réalisation simple

Inconvénients : puissance transmise relativement faible.

3. Moteur à pistons axiaux :

Les pistons en communication avec la haute pression se déplacent en tournant.

Avantages : couple très important, possibilité de varier la cylindrée, vitesse importante.

Inconvénient: coûteux.

4. Moteur à pistons radiaux :

Contrairement aux pompes à pistons radiaux, les pistons peuvent tourner sur une came (Stator) permettant d'avoir plusieurs courses par tour. Le nombre des pistons est impair pour la continuité de débit et l'équilibrage.

Avantages : Couple très important.

Inconvénients : Vitesse faible, encombrant, coûteux, problèmes d'étanchéité pour la distribution.

5. Moteur à engrenage :

Même conception que la pompe à engrenage, la pression du fluide entraîne en rotation les roues dont l'une est motrice.

Avantages : Encombrement très réduit, économique.

Inconvénients: Rendement limité.

6. Formule de détermination :

a) Vitesse de rotation d'un moteur :

Elle est donnée par la relation :

$$N = \frac{Q}{q_{th}} \eta_v$$

Relation dans laquelle Q est le débit d'alimentation des moteurs, q_{th} la capacité théorique ou cylindrée du moteur et η_v le rendement volumétrique du moteur.

Formule pratique [9] :

$$N_{tr/min} = \frac{10^3 Q}{q_{th \text{ cm}^3 / \text{tr}}} \eta_v$$

b) Calcul du couple :

$$C = \frac{\Delta P \cdot q_{th} \cdot \eta_m}{2\pi}$$

Avec :

Δp : La différence de pression entre l'entrée et la sortie du moteur ;

η_m : rendement mécanique du moteur.

Formule pratique [9] :

$$C_{dan.m} = \frac{\Delta P_{bar} \cdot q_{th \text{ cm}^3/tr}}{628} \cdot \eta_m$$

c) Calcul de puissance :

$$P = C \cdot \omega = C \cdot 2 \cdot \pi \cdot n$$

Avec ω : la vitesse angulaire

Formule pratique :

$$P_{kw} = 10^{-2} C_{dan.m} \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot n_{tr/min}$$

III. Les compresseurs

1. Généralités

La qualité de l'air respiré par le plongeur est une donnée primordiale de sécurité.

- Le rôle du compresseur est de fournir de l'air à haute pression non toxique.
- Son principe de fonctionnement est une application directe de la compressibilité des gaz (Loi de Boyle-Mariotte) [11].

Description

Il existe plusieurs sortes de compresseurs différenciés par :

- Leur débit (en litres/minute ou m³/heure),
- Leur système de compression (piston ou membrane),
- Leur mode d'entraînement (moteur électrique ou thermique),
- Leur système de refroidissement (à air, à eau ou mixte).

Principe de fonctionnement

Contrairement aux solides et aux liquides, très peu compressibles, les gaz peuvent se comprimer aisément.

- Cette opération consiste à rapprocher les molécules pour en faire tenir un plus grand nombre dans un même volume en plonge.
- Les compresseurs que nous présentons compriment l'air pour l'amener progressivement de la pression atmosphérique à la pression désirée : 176, 200, 230 ou 300 bars.

2. Piston et cylindre

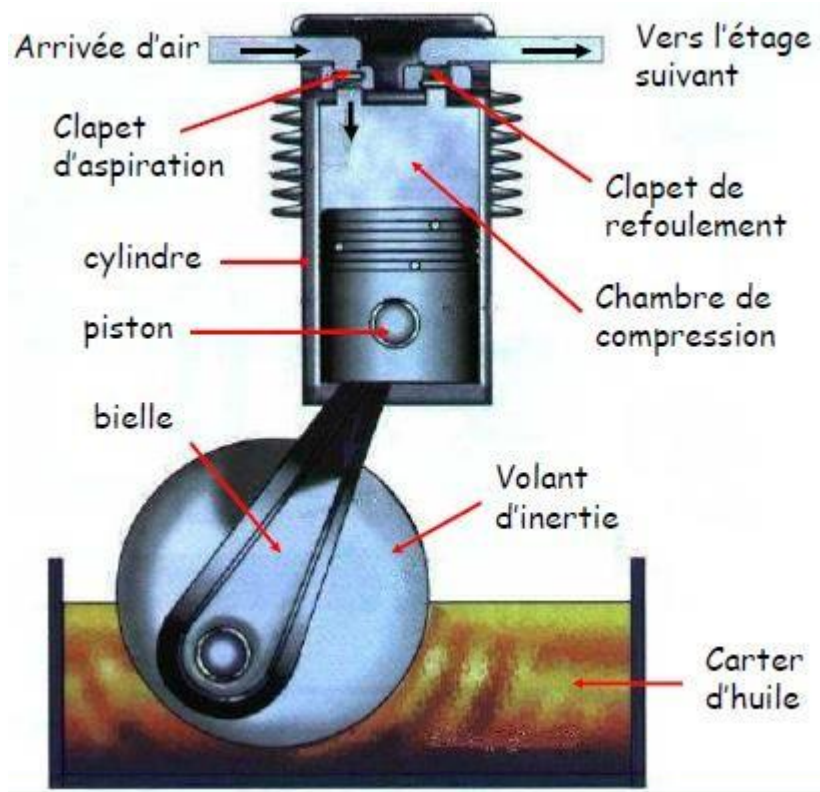


Figure (14) : Schéma de principe du compresseur [11]

Le cœur du mécanisme est un ensemble de plusieurs pistons en mouvement, chacun à l'intérieur d'un cylindre; lorsque le premier piston descend, cela ouvre un clapet d'aspiration par lequel l'air ambiant s'engouffre jusqu'à la limite de course du piston (point mort bas) [11].

3. Soupapes de sécurité :

Les soupapes de sécurité sont interposées entre chaque étage du compresseur pour éviter toute montée excessive en cas de dysfonctionnement des clapets d'admission ou de refoulement.

4. **Principe de fonctionnement** : le principe est simple le clapet est maintenu sur son siège par un ressort taré à une force légèrement supérieure à la pression maximale attendue, si cette pression est dépassée, le clapet se soulève et l'air s'échappe.

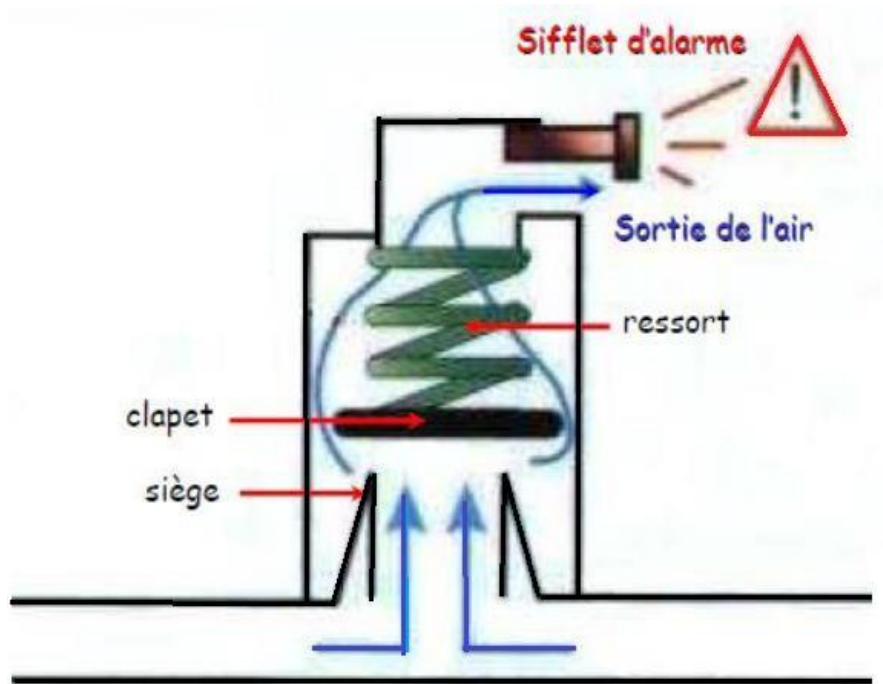


Figure (15) : Schéma de principe de la soupape de sécurité [11]

La lubrification :

Des pièces métalliques en mouvement ne peuvent fonctionner sans lubrification;

- L'huile servant à lubrifier le compresseur étant au contact avec l'air respiré doit être non toxique et adaptée aux contraintes thermiques qu'elle subit (huile spécifique : minérale ou synthétique);
- Les caractéristiques de cette huile garantissent une faible présence dans l'air produit (faible toxicité), tout en conservant un pouvoir lubrifiant à haute température (faible dépôt, pas de calaminage dans les clapets, bonne protection anti-corrosion);
- Le coût de cette huile, dont le niveau doit être contrôlé avant chaque utilisation, est relativement élevé.

5. Clapets anti-retour - Manomètres

En fin de compression, des clapets anti-retour (ou non-retour) empêchent que l'air provenant des bouteilles chargées ne soit refoulé dans le compresseur;

- Le contrôle des pressions de refoulement (inter-étage) est effectué par des manomètres qui équipent parfois chaque étage de compression;
- Il existe même des manomètres pour surveiller les pressions d'huile aux points importants des circuits.

6. Rampe de chargement

- Des soupapes de sécurité sont obligatoires entre le dernier étage et la rampe de chargement pour les groupes fixes, ou le flexible de chargement pour les groupes portables;
- Ces soupapes (couplées à un détendeur) doivent éviter de dépasser la pression de service d'un compresseur pouvant être bien supérieure à celle des bouteilles (ex : 176 bars) [11].

Les moteurs

Un compresseur peut être entraîné :

- Par un moteur électrique (monophasé ou triphasé),
- Par un moteur thermique (essence ou diesel);

La principale caractéristique d'un moteur est sa puissance, l'unité normalisée est le Watt, on utilise souvent le Kilowatt (kW) et parfois encore le Cheval Vapeur (CV); la relation entre ces unités est simple, 1 CV = 736 watts.

- Pour donner une idée, il faut un moteur d'environ 1 CV pour comprimer en une heure 2 m³ d'air à 350 bars;
- Dans les mêmes conditions il faut donc environ 20 CV ou 15 kW pour un compresseur de 40 m³/heure.

7. Le compresseur de base à un étage

- Selon la figure ci-dessous, le compresseur à un étage se compose :
- d'un cylindre;
- d'un piston;
- d'un clapet d'aspiration;

- d'un clapet de refoulement;
- d'une bielle;
- d'un volant d'entraînement.

Remarques:

1. Le clapet et son siège constituent une soupape. Le clapet est la partie mobile, le siège la partie fixe. Dans le langage courant, on utilise souvent le mot clapet au lieu de soupape pour désigner l'ensemble (c'est l'inverse dans le langage automobile).
2. Les soupapes sont contenues dans la culasse qu'on appelle plus généralement boîte à clapets [12].

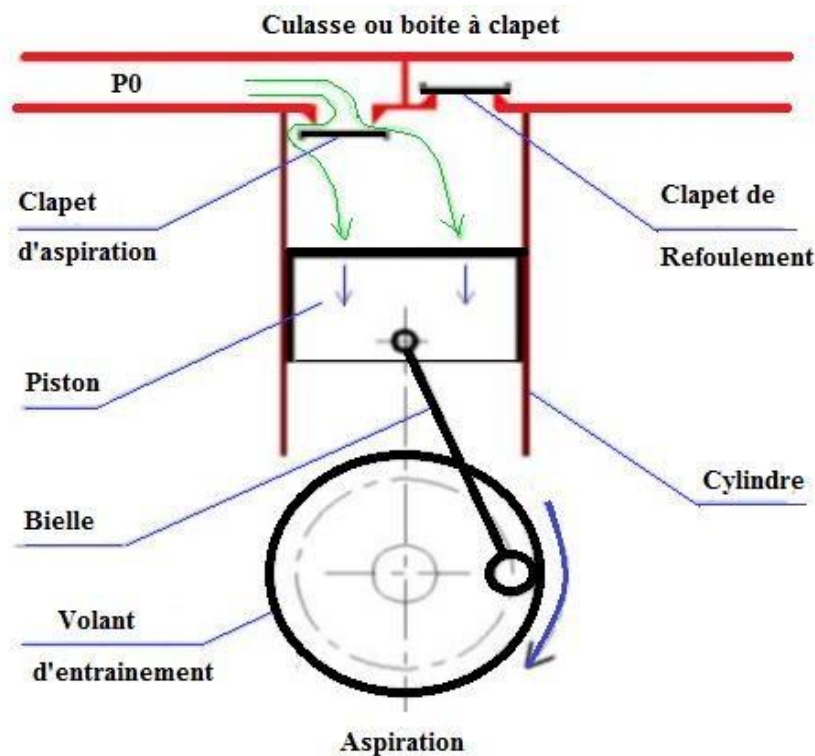


Figure (16) : Principe de fonctionnement du compresseur, phase d'aspiration [12]

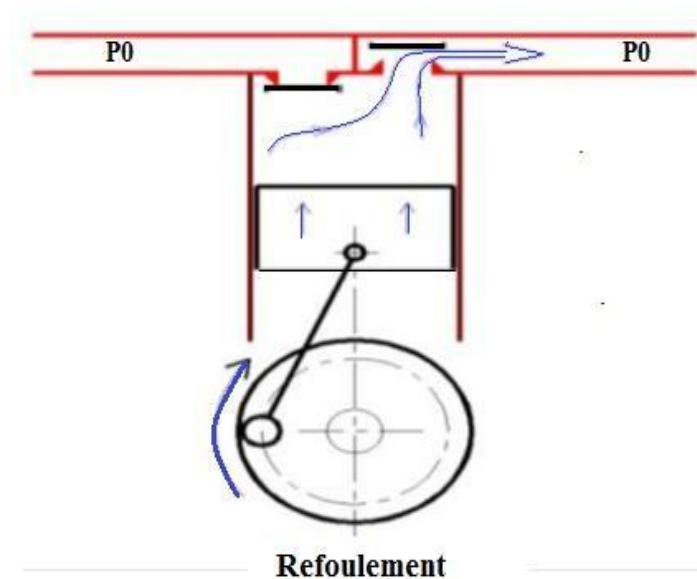


Figure (17) : Principe de fonctionnement du compresseur, phase de refoulement [12]

8. Compression polytropique

Ce cas est théorique parce que sans espace morte le piston touche le côté supérieure ce qui provoquera des débris. Nous utilisons ce cycle pour calculer le travail de compression. Le travail de compression est représenté par la surface ABCDA [13].

Donc :

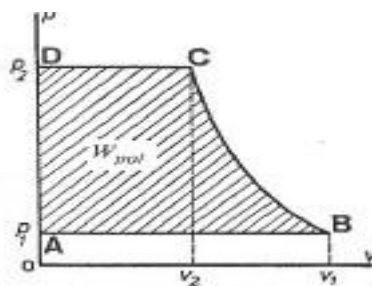


Figure (18) : Compression polytropique en cycle PV

$$W = \int_B^C V dp$$

et ceci pour une course arbitraire donc un polytrophe

$$P_1 V_1^n = P_2 V_2^n$$

On aura :

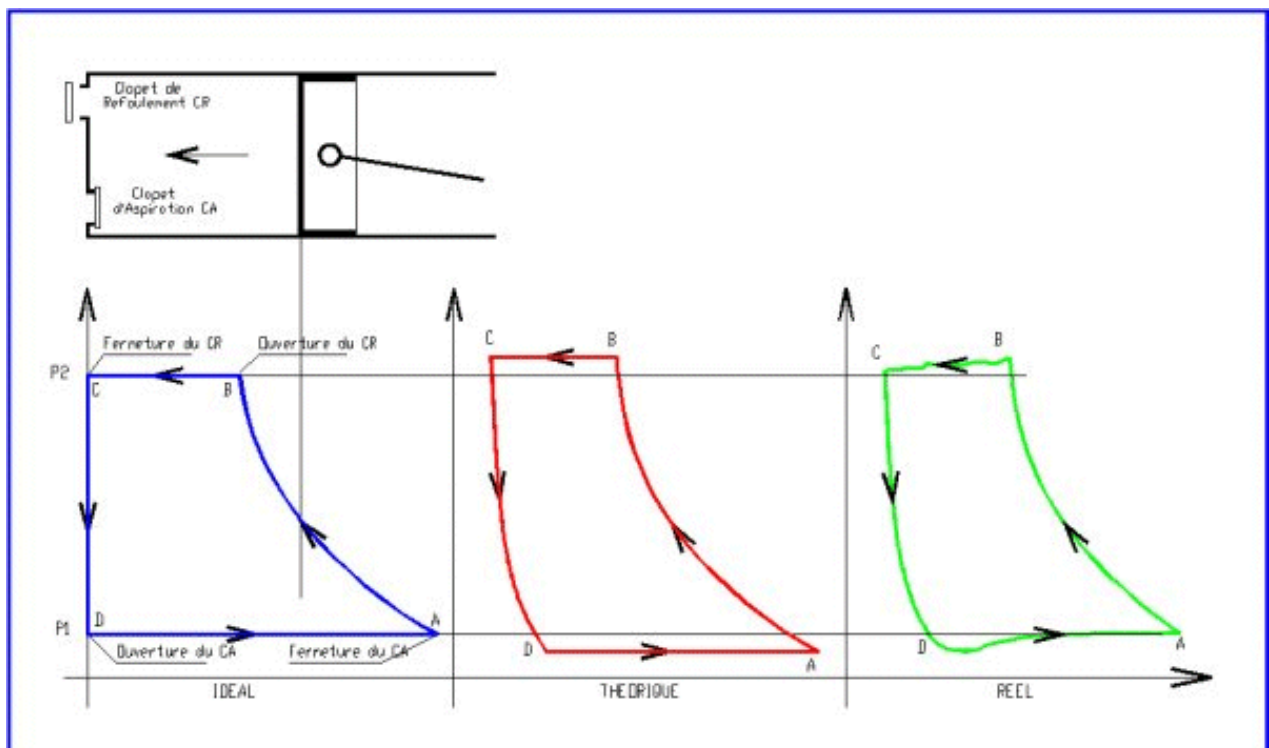
$$W = \int_{P_1}^{P_2} P \frac{dV}{V} = \frac{n}{n-1} P_1 V_1 \left(\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right)$$

Le travail de compression dépend donc de :

- Les états initial et final
- Type de changement d'état, exposant n
- Type de gaz

9. Cycles de compression

Les cycles de compression représentés dans la figure suivante montrent l'évolution de la pression en fonction des déplacements du piston.



Figure(19). Les cycles de compression [12].

Débit engendré

C'est le produit de la cylindrée du premier étage du compresseur par la vitesse de rotation.

10. Rendement volumique

C'est le rapport du volume aspiré sur le volume engendré. Ce rendement varie avec la pression qui règne dans l'espace mort en aval de l'étage, lorsque le piston est au point mort haut. (Tout le volume comprimé ne franchit pas le clapet de refoulement). Cette pression empêche le clapet d'aspiration de s'ouvrir immédiatement, dès que le piston commence à redescendre.

On en déduit le rendement volumique :

$$\eta = \frac{V_a}{V_e}$$

- V_a : le volume aspiré en litres par tour ;
- V_e : le volume engendré en litres par tour ;

$$\eta = 1 - \frac{V_m \left(\frac{P_{av}}{P_{am}} - 1 \right)}{V_e}$$

- P_{am} : la pression en amont du clapet d'aspiration en bar ; (Généralement 1 bar pour le premier étage).
- P_{av} : la pression en aval du clapet d'aspiration en bars ; (En fait elle est égale à la pression de refoulement)
- V_m : le volume mort en litres.

11. Le compresseur multi étage

Il y a plusieurs avantages à utiliser des compresseurs multi étages :

1. Le rendement volumétrique est supérieur.
2. La puissance absorbée est plus faible.
3. Les températures en sortie de chaque étage sont moins élevées.

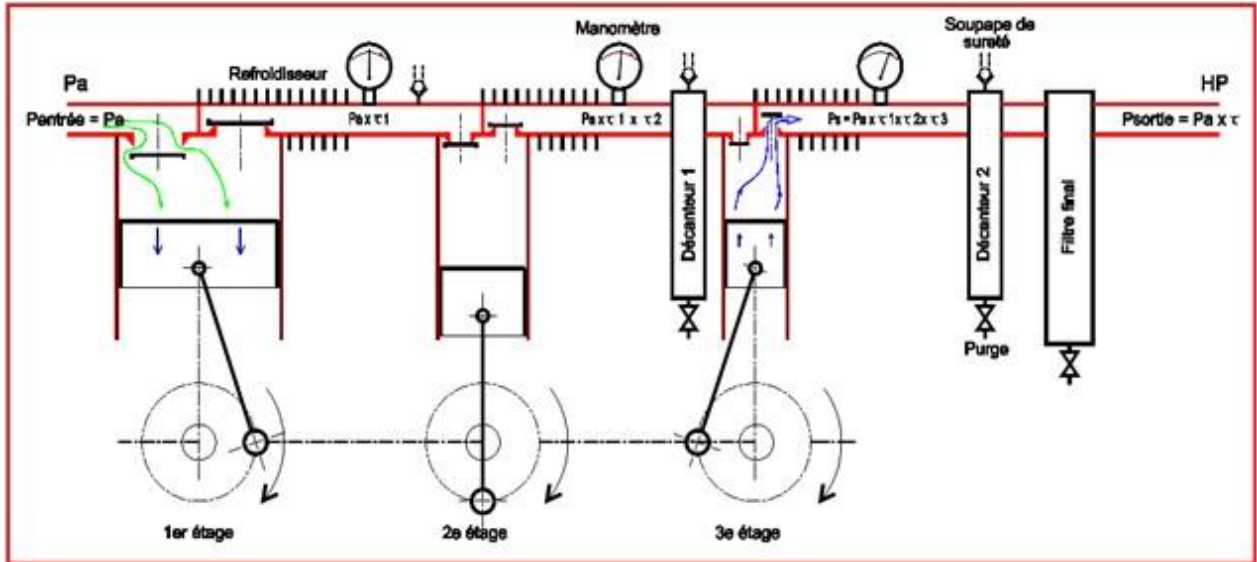


Figure (20) : Compresseur multi-étages [12].

12. Taux de compression

Le faible taux de compression possible avec un compresseur à un étage conduit à disposer plusieurs étages en série.

Si on appelle $\tau_1, \tau_2, \tau_3 \dots$ Le taux respectif de chaque cylindre, le taux résultant sera :

$$\tau = \tau_1 \cdot \tau_2 \cdot \tau_3$$

La pression de sortie maximum sera :

$$P_{\text{sortie}} = P_{\text{entrée}} \cdot \tau$$

Il est cependant rare de dépasser 5 étages car, cela augmente considérablement la complexité mécanique et diminue le rendement en raison des pertes de charges qui ne manquent pas de se produire dans les différentes parties du compresseur.

