

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université de Jijel

Faculté de Technologie

Département de Mécanique

Cours de Systèmes Hydrauliques et Pneumatiques

Sommaire	<i>Pages</i>
Chapitre 1 : Introduction et Rappels.....	7
1. Les fluides hydrauliques.....	7
2. Les différents types de fluides hydrauliques:.....	7
2.1. Huile minérale.....	7
2.2. Huile de synthèse.....	8
3. Contrôle, surveillance et analyse des huiles.....	9
4. Rôle des fluides hydrauliques.....	10
5. Les caractéristiques des fluides hydrauliques.....	10
6. Choix d'un fluide hydraulique.....	11
7. Facteurs de maintenance d'une huile.....	11
8. Propriétés des fluides hydrauliques.....	12
9. Grades normalisés et services.....	12
10. Viscosité.....	13
11. Influence de la température sur la viscosité.....	14
12. Le régime d'écoulement.....	14
13. Le nombre de Reynolds.....	15
14. Théorème de Bernoulli pour un fluide réel.....	16
15. Les pertes de charges.....	16
16. la filtration.....	17
16.1. Les différents procédés de filtration.....	18
17. L'humidité de l'air.....	18
18. Contamination de l'air par des particules solides.....	19
19. Les différents types de filtre à air.....	20
20. Les grandeurs hydrauliques.....	21
Chapitre 2 : Les pompes et les compresseurs.....	23
I. Les pompes.....	23
1. Classification	23
2. Les Pompes Centrifuges.....	22
2.1 .Le principe de fonctionnement.....	25
2.2. Les différents montages.....	25
2.3. Caractéristiques.....	25

2.4. Avantages et inconvénients.....	26
2.5. Les différents types de pompes centrifuges.....	27
3. Les Pompes Volumétriques.....	27
3.1. Définition et principe.....	27
4. Les pompes alternatives ou à pistons axiaux.....	28
4.1. Réglage de débit et de pression.....	29
5. Les pompes à membrane (variante des pompes à piston).....	30
6. Les pompes rotatives.....	31
6.1. Pompes à engrenages.....	31
6.2. Pompes à lobes.....	32
6.3. Pompes à pistons radiaux.....	32
6.4. Pompes à vis.....	32
6.5. Pompes à rotor hélicoïdal excentré.....	33
6.6. Pompes à palettes rigides ou souples.....	33
7. Avantages et inconvénients.....	34
II. Les moteurs hydrauliques.....	35
1. Principaux types de moteurs hydrauliques :.....	35
2. Moteurs à palettes:.....	35
3. Moteurs à pistons axiaux.....	35
4. Moteurs à pistons radiaux.....	36
5. Moteurs à engrenage.....	36
6. Formules de détermination :	36
a) Vitesse de rotation d'un moteur.....	36
b) Calcul du couple.....	36
c) Calcul de la puissance.....	37
III. Les compresseurs.....	37
1. Généralités.....	37
1.1. Principe de fonctionnement.....	37
2. Piston et cylindre.....	38
3. Soupapes de sécurité.....	38

4. Principe de fonctionnement.....	39
5. Clapets anti-retour – Manomètres.....	40
6. Rampe de chargement.....	40
7. Le compresseur de base à un étage.....	40
8. Compression polytropique.....	42
9. Cycles de compression.....	43
10. Rendement volumique.....	44
11. Le compresseur multi étage.....	44
12. Taux de compression.....	45
Chapitre 3 : Les Vérins Pneumatiques.....	46
1. Introduction:.....	46
2. Définition.....	46
3. Classification des vérins.....	47
4. Les vérins pneumatiques à simple effet (V.S.E).....	47
5. Exemple d'utilisation d'un vérin simple effet.....	48
6. Les vérins pneumatiques doubles effets (V.D.E.).....	49
7. Exemple d'utilisation d'un vérin double effets.....	50
8. Vérin double tige	51
9. Vérin à tige télescopique.....	51
10. Vérin rotatif	51
11. La raideur d'un vérin.....	52
12. Résistance au flambage.....	52
13. L'amortissement pneumatique.....	54
14. Détermination et calcul de dimensionnement.....	54
15. Effort pratique utilisable.....	54
16. Application n°1.....	55
17. Application n°2.....	55
18. Distributeurs.....	56
19. Les commandes.....	57
20. Les types de pilotage les plus courants.....	57
21. Les accessoires.....	58

Chapitre 4 : Canalisations hydrauliques	60
1. Introduction	60
2. Définition	60
3. Comparaison de L'hydraulique à la Pneumatique	60
4. Canalisation	61
5. Types de canalisation	61
6. Tuyaux, tubes, boyaux et raccords :	61
7. Tuyau d'acier rigide	62
8. Tubes et raccords	62
9. Boyaux	63
10. Limiteur de pression	64
11. Le Limiteur de pression à action direct simple	64
12. Le Limiteur de pression à action indirecte	64
13. Réducteur de pression	65
14. Les appareils de pression	66
15. Les réducteurs de débit unidirectionnel (RDU):	68
16. Régulateurs de débit :	68
17. Les accumulateurs	69
a. Principe de fonctionnement	69
b. Fonctions	69
Chapitre 5 : Exemples pratiques	72
1. Commande d'un moteur pneumatique	72
Application	72
2. Commande d'un moteur hydraulique à deux sens de rotation	73
a. Réglage sur l'entrée du moteur	73
b. Réglage en sortie du moteur	73
c. Drainage des moteurs hydrauliques	74
3. Réglage de la vitesse d'une tige de vérin	74
Configuration	75

4. Dimensionnement du diamètre du piston d'un vérin.....	76
5. Réalisation d'un circuit hydraulique.....	78
Configuration.....	79
Références bibliographiques.....	80

Chapitre 1 : Introduction et Rappels

1. Les fluides hydrauliques

a). Définition d'un fluide : les fluides sont des corps dont les molécules sont très mobiles les unes par rapport aux autres.

Un fluide prend automatiquement la forme du récipient qui le contient

On peut classer les fluides en deux groupes : des liquides et des gaz.

Les liquides ont un volume propre tant que les gaz occupent tout le volume qui leur est offert

b). Compressibilité des fluides : on appelle un fluide incompressible lorsque la masse volumique ρ est indépendante de la pression P et de la température T . les liquides sont très peu compressibles.

Pratiquement ; on considère que les liquides sont incompressibles et les gaz sont compressibles.

c). Fluide parfait- fluide réel

Un fluide parfait est un fluide dont les molécules se déplacent sans aucun frottement les uns par rapport aux autres, donc sans viscosité $\mu=0$, (c'est théorique) [1].

Un fluide est réel lorsque la viscosité $\mu \neq 0$

2. Les différents types de fluides hydrauliques:

Les huiles hydrauliques les plus utilisés sont :

2.1. Huile minérale [2]

- **H** : Huiles hydrauliques sans additifs. Ces huiles sont de moins en moins utilisées en hydraulique
- **HL**: Huiles minérales + propriétés anti-oxydantes et anticorrosion particulières. Elles présentent un bon comportement vis-à-vis de l'eau. Elles sont préconisées dans les installations à moyenne pression (jusqu'à 200 bar) lorsque des additives anti-usures ne sont pas nécessaires.
- **HM** : Fluides HL + propriétés anti-usure particulières (pression > 200bar)
- **HV** : Fluides HM + propriétés viscosité/température améliorées.

Fluides difficilement inflammables [2] :

HFA et HFB : Fluides difficilement inflammables à base d'émulsion d'eau et d'huile.

HFC : Fluide à base d'eau et glycol.

HFD : Fluide synthèse (sans eau), ester phosphorique ou hydrocarbure chloré. Ces fluides nécessitent l'utilisation de joints spéciaux, ils posent des problèmes pour la protection de l'environnement.

Additifs:

Une huile ayant les propriétés demandées pour une utilisation donnée est constituée : d'une huile de base (minérale, synthétique ...) et d'un certain nombre d'additifs, ajoutant chacun une propriété particulière.

Voici quelques exemples de propriétés et d'additifs :

- Anti oxydant : protège les parties métalliques de la corrosion.
- Détergent: tensio-actif évitant les dépôts (particules, charbons ...).
- Anti émulsion : évite le mélange de fluides étrangers avec l'huile (de l'eau par exemple) et favorise la décantation de l'ensemble.
- Désaérant : favorise la séparation des gaz de l'huile.
- Indice de viscosité : des additifs permettent d'augmenter celui-ci.
- Additif extrême pression : renforce la tenue de l'huile pour des utilisations où le film d'huile a du mal à se former (engrenages en particulier).
- Anti friction : diminue l'usure des surfaces lubrifiées.
- Compatibilité avec les élastomères.

2.2. Huiles de synthèse:

Ces huiles sont radicalement différentes des huiles minérales.

- Pour la production d'huile minérale on extrait du pétrole certaines catégories de molécules. Mais le procédé n'est pas parfait: les molécules obtenues sont de tailles différentes, ce qui nuit à l'homogénéité de l'huile et limite ses possibilités d'application. Des produits indésirables restent également dans cette huile de base (par exemple : paraffines, solvants légers...)[2].

- Dans le cas de l'huile synthétique, au contraire, on fabrique la molécule dont on a précisément besoin, si bien que l'on obtient une huile de base dont le comportement est voisin de celui d'un corps pur. En créant un produit dont les propriétés physiques et chimiques sont prédéterminées, on fait mieux que la nature. On rajoute ensuite les additifs nécessaires pour répondre à un service voulu.

Ces huiles ont des performances élevées, en particulier pour des objectifs et des conditions de service difficiles. De plus, le choix d'un lubrifiant synthétique dépend du problème posé. Les mélanges d'huiles de base d'origines différentes sont parfois possibles, toutefois une huile dite "synthétique" doit contenir moins de 15% d'huile minérale.

3. Contrôle, surveillance et analyse des huiles :

La surveillance des huiles en fonctionnement a deux buts essentiels:

- Surveiller l'huile pour vérifier son état conforme.
- Surveiller, à travers l'huile, l'état de l'installation. C'est souvent le but principal.

3.1. Contrôle de l'eau :

La présence d'eau dans un circuit hydraulique provoque des dégâts graves: oxydation, destruction des additifs, colmatage des filtres... Cette eau provient généralement d'une condensation (dans la bêche, par exemple), mais aussi de pénétration par les joints (vérins, arbres de moteur...). La teneur maximale généralement tolérée est de 0,05% [2].

3.2. Maintenance

Afin d'assurer une maintenance de qualité il est nécessaire d'effectuer une analyse du fluide hydraulique régulièrement (basé sur un temps de fonctionnement ou sur une périodicité) pour suivre l'évolution de l'usure des composants. Pour ce faire, il est important de mettre à niveau les centrales et circuits hydrauliques [2].

On devra

- S'assurer de l'étanchéité du circuit et du réservoir (joint de couvercle)
- S'assurer au niveau du réservoir, qu'aucun orifice ne doit être en liaison directe avec l'extérieur (le filtre à air doit être un filtre bien nettoyé).
- supprimer le bouchon de remplissage et le remplacer par un raccord rapide, le remplissage sera effectué par l'intermédiaire d'un groupe de remplissage et de filtration, car l'huile distribuée par les fabricants est polluée
- À installer conformément à la norme, une prise d'échantillon pour pouvoir effectuer un prélèvement dynamique.

4. Rôle des fluides hydrauliques :

Les fluides hydrauliques ont pour rôle de transmettre l'énergie fournie par la pompe aux organes récepteurs tels que les vérins et les moteurs hydrauliques. Ils doivent présenter des qualités suffisantes pour assurer un bon fonctionnement avec un rendement optimum :

Le fluide a donc deux fonctions possibles :

- Transmettre l'énergie
- Lubrifier et protéger.

Pour remplir ses deux fonctions L'huile doit avoir les caractéristiques suivantes :

5. Les caractéristiques des fluides hydrauliques

- Viscosité appropriée ;
- Variation de la viscosité, en fonction de la température, la plus faible possible;
- Pompabilité à la température minimale d'utilisation;
- Faible compressibilité due à la présence d'air;
- Absence de moussage;
- Désaération rapide ;
- Propriétés anti-usure ;
- Propriétés anti-rouille, anti-corrosive et résistance à l'oxydation ;
- Stabilité des propriétés ;
- Résistance à l'oxydation ;
- Résistance au cisaillement.

6. Choix d'un fluide hydraulique

Le choix d'un fluide est très important afin d'obtenir de son installation une efficacité, un rendement et une longévité optimaux. Le fluide devra répondre aux exigences de sécurité, du matériel et de la maintenance.

Les critères de sélection sont :

- Danger d'incendie,
- Température de service continu et de pointe avec également la température de démarrage (viscosité appropriée),
- Présence d'eau,
- Compatibilité avec le matériel (métaux sensibles à la corrosion),
- Toxicité,
- Environnement,
- Coût.

7. Facteurs de maintenance d'une huile

Pour qu'une huile puisse être efficace dans le temps, afin d'éviter une détérioration prématurée de l'installation, elle doit conserver au maximum ses propriétés. Pour cela il convient de respecter certaines règles de maintenance suivantes [2] :

- Eviter le contact avec l'extérieur si ce n'est à travers le filtre à air du réservoir (propre),
- Eviter une température excessive de l'huile dans l'installation (prévoir un refroidisseur),
- Respecter la filtration imposée par le constructeur,
- Changer régulièrement les filtres,
- Vérifier le niveau d'huile (entre mini et maxi),
- Faire l'appoint d'huile à travers un groupe de filtration (conserver la même huile),
- Prendre des échantillons pour analyse,
- Utiliser des flexibles et des joints compatibles avec le fluide,
- Contrôler la teneur en eau pour des fluides de catégorie HFA - HFB - HFC.

8. Propriétés des fluides hydrauliques

Le respect des performances prévues, la durée de vie, la sécurité de fonctionnement et en définitive la rentabilité d'une installation hydraulique sont directement influencés par le choix du fluide hydraulique.

Les fluides de base sont les suivants :

- Les huiles minérales
- Les huiles végétales
- Les huiles synthétiques
- L'eau

Ils sont utilisés sous forme de liquides homogènes (solution) ou d'émulsion.

Les principales missions d'un fluide hydraulique sont les suivantes :

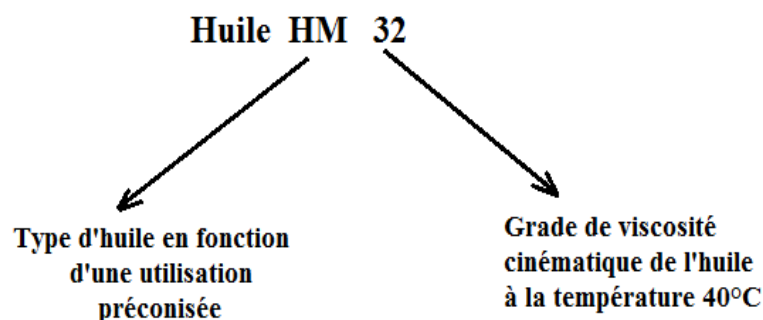
- Transmission de la puissance hydraulique de la pompe jusqu'au récepteur,
- Graissage de toutes les pièces en mouvement,
- Protection contre la corrosion des surfaces métalliques humidifiées,
- Evacuation des impuretés : boues, eau, air, etc.
- Dissipation des calories dues aux pertes provoquées par les fuites et frottements.

9. Grades normalisés et services

Normes ISO

Plus particulièrement destinées aux huiles dites "industrielles" monogrades.

La norme ISO - NF désigne une huile par un grade et un service rendu par cette huile (ou domaine d'application). La désignation indiquée ci-après est succincte et ne donne pas toutes les caractéristiques d'une huile. La norme complète et les indications du fabricant sont donc souvent nécessaires [2].



La viscosité indiquée dans le grade est fixée à 40°C avec une tolérance autour de cette valeur médiane (voir le tableau ci-dessous [2]). Les grades sont espacés par un facteur multiplicatif de 1,5 (changer de 1 grade = varier de $\pm 50\%$ en viscosité).

Grade ISO VG	Viscosité cinématique médiane à 40 °C	Limites de viscosité	
		minimum	maximum
2	2,2	1,90	2,42
3	3,2	2,88	3,52
5	4,6	1,14	5,06
7	6,8	6,12	7,48
10	10	9,00	11,00
15	15	13,50	16,50
22	22	19,00	24,20
32	32	28,80	35,20
46	46	41,40	50,60
68	68	61,20	74,80
100	100	90,00	110,00
150	150	135,00	165,00
220	220	198,00	242,00
320	320	288,00	352,00
460	460	414,00	506,00
680	680	612,00	748,00
1000	1000	900,00	1100,00
1500	1500	1350,00	1650,00

10. Viscosité

La viscosité caractérise la résistance à l'écoulement d'un fluide. Cette résistance résulte d'une apposition de déplacement relatif des molécules les unes sur les autres.

La viscosité d'un fluide varie avec :

- La nature du fluide,
- La température,
- La pression.

La viscosité est doublée pour une pression de 300 à 350 bars [3].

- Coefficient de viscosité dynamique « μ » : exprimé dans le système international en Poiseuille (Pl) ou en Pascal seconde (Pa.s).
- Coefficient de viscosité cinématique « ν » : exprimé dans le système international en mètre carré par seconde (m^2/s). On utilise souvent le stokes (St).

D'où : $1\text{st} = 10^{-4}\text{m}^2/\text{s}$.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

Avec ρ est la masse volumique du fluide.

Unités de viscosité

- Le centistoke ou mm^2/s ,
- Seconds SAYBOLT universal (USA),
- Seconds REDWOOD (Grande Bretagne).

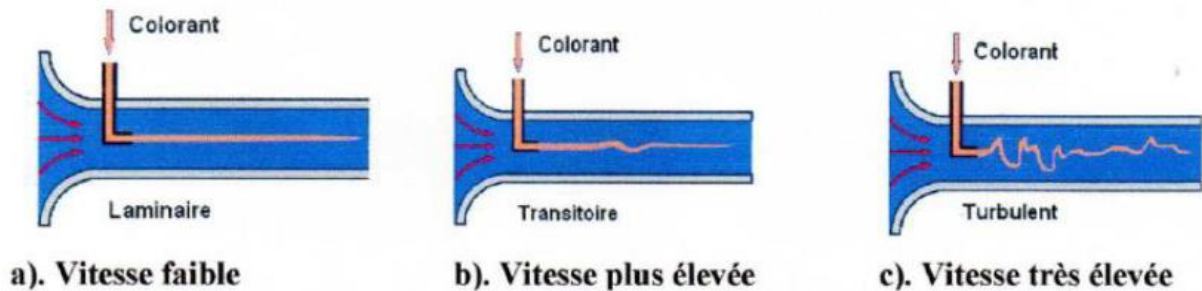
L'échelle couramment employée est le Centistoke (CST) ou mm^2/s .

11. Influence de la température sur la viscosité

- Pour les liquides : si la température T° augmente, la viscosité ν diminue.
- Pour les gaz : si la température T° augmente, la viscosité ν augmente aussi.

12. Le régime d'écoulement

Expérience : soit un courant d'eau qui circule dans une conduite à section circulaire. On introduit un filet de colorant dans l'axe de la conduite. Suivant la vitesse d'écoulement de l'eau, on peut observer les phénomènes suivants [3] :



- 1) **Régime laminaire** : (cas a) le fluide s'écoule en couches cylindriques coaxiales ayant pour axe le centre de la conduite.
- 2) **Régime transitoire** : (cas b) c'est une transition entre le régime laminaire et ce lui turbulent.
- 3) **Régime turbulent** : (cas c) formation du mouvement turbulent dans le fluide. Cette expérience est faite par Reynolds en faisant varier le diamètre de la conduite, la température le débit etc...) pour des divers fluides.

13. Le nombre de Reynolds

La détermination du régime d'écoulement se fait par le calcul d'un nombre sans dimensions appelé nombre de Reynolds R_e :

$$R_e = \frac{D \cdot u \cdot \rho}{\mu} = \frac{Du}{\nu}$$

Avec :

D : Diamètre de la conduite (en m) ;

U : Vitesse moyenne d'écoulement (en m/S)

ρ : Masse volumique du fluide (en kg/m³)

μ : Coefficient de viscosité dynamique (en Pa.S)

ν : Coefficient de viscosité cinématique (en m²/S)

- Si $R_e < 2000$, le régime est laminaire.
- Si $R_e > 3000$, le régime est turbulent.
- Si $2000 < R_e < 3000$, le régime est transitoire.

Remarque : si la section n'est pas circulaire, on définit le diamètre équivalent

$$(D_e) \text{ par : } D_e = \frac{4 \cdot \text{la section de la conduite}}{\text{le périmètre mouillé par le fluide}}$$

14. Théorème de Bernoulli pour un fluide réel

Lorsque le fluide est réel la viscosité est non nulle, alors au cours de déplacement du fluide, les différentes couches frottent les unes contre les autres et contre les parois qui n'est pas parfaitement lisses d'où il y a une perte sous forme de dégagement d'énergie; cette perte est appelée perte de charge.

La relation de Bernoulli s'écrit sous la forme suivante :

$$Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} = Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} + \Delta H_{1,2}$$

$\Delta H_{1,2}$: C'est l'ensemble des pertes de charges entre (1) et (2) exprimé en hauteur.

Les pertes de charge peuvent être exprimées en pression : $\Delta P_{1,2} = \rho g \Delta H_{1,2}$

15. Les pertes de charges

Les pertes de charge sont à l'origine :

- Des frottements entre les différentes couches de liquide et des frottements entre le liquide et la paroi interne de la conduite le long de l'écoulement : ce sont les pertes de charge régulières (linéaire).
- De la résistance à l'écoulement provoqué par les accidents de parcours (vannes, coudes, etc...) ; ce sont les pertes de charges singulières ou localisés

a) Les pertes de charge régulières : ΔH_r

Soit un écoulement permanent d'un liquide dans une conduite de diamètre D . La perte de charge entre deux points séparés d'une longueur L , est de la forme:

$$\Delta H_r = \lambda \frac{D}{L} \cdot \frac{V^2}{2g}$$

Avec :

V : Vitesse moyenne du fluide

λ : Coefficient de perte de charge régulière

Pour déterminer le coefficient de perte de charge régulière, on fait souvent appel à des formules empiriques [3], tel que :

- Si l'écoulement est laminaire, nous avons la loi de **Poiseuille** : $\lambda = \frac{64}{R_e}$

- Si l'écoulement est turbulent, on a deux cas :

-Turbulent, $R_e < 10^5$, on a la loi de **Blasius** : $\lambda = 0,316 \cdot R_e^{-1/4}$

- Turbulent, $R_e > 10^5$, on a la loi de **Biénich** : $\lambda = 0,79 \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon}{D}}$

Avec : ε est la hauteur moyenne des aspérités (mm). En pratique pour les tubes en acier soudés $\varepsilon \approx [0.15 ; 0.25]$

b) Les pertes de chargé singulières ΔH_s

$$\Delta H_s = k \cdot \frac{V^2}{2g}$$

K : est en fonction des caractéristiques géométriques et du nombre de Reynolds.

16. la filtration

Le but de la filtration est de séparer les constituants d'un mélange liquide-solide par passage à travers un milieu filtrant. Cette opération est beaucoup plus rapide que la sédimentation: elle est donc plus utilisée.

On récupère après filtration soit le solide (après une cristallisation), soit le liquide (récupération d'eaux usées avant traitement et après sédimentation), soit le liquide et le solide (opération de recristallisation) [4].

16.1. Les différents procédés de filtration: On distingue:

- **La filtration par gravité:** le mélange est soumis uniquement à la pression atmosphérique. Le liquide passe à travers le support filtrant, qui peut être du sable par exemple, tandis que le solide est récupéré sur le support filtrant.
- **La filtration par surpression:** la suspension arrive sous pression dans le filtre.
- **La filtration sous pression réduite:** le mélange est soumis d'un côté du filtre à la pression atmosphérique, et de l'autre côté, où sort le filtrant, à une dépression réalisée grâce à une pompe à vide.

Lors du passage d'une suspension à travers un milieu filtrant, le fluide circule à travers les ouvertures tandis que les particules sont arrêtées. En s'enchevêtrant, ces dernières finissent par former un second milieu filtrant pour les autres particules qui se déposent d'une manière continue sous forme de gâteau dont l'épaisseur va en croissant au fur et à mesure de l'écoulement de la suspension.

La différence de pression entre l'amont et l'aval (perte de charge) a une grosse importance car elle règle la vitesse de filtration. On peut concevoir deux types de filtration:

- **La filtration à pression constante:** on régule la différence de pression amont-aval à une valeur constante. L'épaisseur du gâteau augmentant au cours du temps, la vitesse de filtration va donc diminuer sous l'effet de l'augmentation de la perte de charge. C'est la filtration la plus utilisée dans l'industrie.
- **La filtration à débit constant :** on augmente au cours du temps la différence de pression amont-aval pour garder un débit constant malgré l'augmentation de perte de charge.

17. L'humidité de l'air

L'air ambiant d'un local, quel qu'il soit, contient une certaine quantité d'eau, présente sous forme de vapeur ; on a par conséquent affaire à un mélange binaire d'air sec et de vapeur d'eau.

Air humide : Air sec + vapeur d'eau = mélange de gaz parfaits

Dans un bâtiment, cette quantité de vapeur est variable suivant les pièces et leur occupation.

On peut d'ailleurs la caractériser de diverses manières [5]:

- Soit par la teneur en eau de l'air (Humidité absolue)
- Soit par le degré hygrométrique de l'air (Humidité relative)
- Soit par la pression partielle de la vapeur contenu dans l'air d'un local

La teneur en eau

La teneur en eau de l'air d'un local est également appelée l'humidité absolue ou encore humidité spécifique de l'air de ce local.

Elle est notée r ou r^S . On trouve également les notations: x ou w .

Il s'agit du rapport de la masse de vapeur d'eau à la masse d'air sec:

$$r^S = \frac{m_v}{m_{as}}$$

Le degré hygrométrique

Le degré hygrométrique de l'air d'un local est également appelé humidité relative. On compare en fait la teneur en eau d'un air ambiant à la teneur en eau qu'il aurait s'il était saturé, c'est-à-dire s'il ne pouvait plus contenir d'eau sous forme de vapeur, à la température θ_s :

$$H_r = \frac{r^S}{r_{sat}^S}$$

D'où l'appellation d'humidité relative!

18. Contamination de l'air par des particules solides

Définition : Il existe un grand nombre de termes utilisés couramment pour décrire la pollution particulaire.

On appelle poussière les particules solides de dimensions et de provenances diverses pouvant rester un certain temps en suspension dans un gaz.

Ces particules ont des diamètres aérodynamiques moyens inférieurs respectivement à 10 et 2.5 μm , c'est sur cette catégorie de particules qu'il y a essentiellement la surveillance depuis des années, car elles correspondent aux particules respirables par l'être humain et utilisables comme combustibles dans les moteurs. C'est pour cette raison que l'accent est mis aujourd'hui à la filtration [6].

19. Les différents types de filtre à air

Le procédé de filtration peut être continu ou discontinu.

Filtre discontinu: dans les filtres discontinus, l'opération a lieu par charge, c'est à dire que l'alimentation de la suspension et le chargement du solide se font par intermittence. La filtration est arrêtée quand la capacité au-dessus de la surface filtrante est remplie ou que le colmatage du filtre atteint une valeur limite.

Filtre presse: c'est le plus répandu. Les éléments du filtre (plateaux et cadres) sont serrés avec une presse. Les toiles filtrantes séparent les plateaux et les cadres. Le filtre fonctionne sous pression (quelques bars). On peut alors procéder au lavage du plateau en faisant circuler le liquide de lavage dans le filtre.

Ces filtres sont simples; par contre ils nécessitent beaucoup de main d'œuvre.

Filtre de Nütsche: Ce filtre fonctionnant sous vide est l'équivalent industriel du Buchner de laboratoire.

Filtre continu: Dans les filtres continus, la surface filtrante fermée sur elle-même se déplace lentement devant l'alimentation; le gâteau atteint une certaine épaisseur et dès qu'il sort de la partie filtrante il est détaché par un système raclant. Un cycle de lavage puis d'essorage est souvent adjoint. Ces filtres constituent un investissement plus important mais ils ont un coût de fonctionnement moindre: Ils conviennent donc aux productions importantes.

On trouve principalement des appareils fonctionnant sous vide: On peut citer les filtres rotatifs à tambour et les filtres à bande. Ils ont les mêmes applications mais les filtres à bande traitent des bouillies plus épaisses (jusqu'à 50 % de solide).

Filtre rotatif à tambour: Il est constitué par deux tambours cylindriques coaxiaux; le tambour extérieur supporte une toile filtrante. Il est divisé en plusieurs zones:

- Zone de filtration: le liquide est aspiré et le gâteau se dépose sur le filtre.
- Zone de lavage: le gâteau est lavé grâce à un arrosage par de l'eau.
- Zone d'essorage du gâteau.
- Zone de séchage et décollage: l'air comprimé est introduit par les canalisations; du déroulement devant des chambres sous dépression.

Filtre à bande sans fin: Une bande sans fin horizontale en caoutchouc synthétique tourne sur deux tambours dont l'un est moteur. La bande de caoutchouc est perforée à intervalles réguliers d'orifices allongés qui passent au fur et à mesure du déroulement devant des chambres sous dépression. Elle est revêtue d'une toile de filtration adaptée au mélange liquide-solide à séparer. On retrouve les zones de filtration, lavage et séchage.

20. Les grandeurs hydrauliques

a)- La Pression

Lorsqu'une force s'exerce sur une surface, nous parlerons de la notion de pression.

La formule qui permet de définir la pression hydraulique :

$$Pression(bar) = \frac{Force\ (daN)}{Section\ (cm^2)}$$

$$1\ bar = 1\ daN/cm^2$$

b)- Le Débit :

Le volume du fluide déplacé par unité de temps est appelé le débit.

En hydraulique le débit caractérise la rapidité de mouvement [3].

C'est le volume de fluide qui s'écoule pendant l'unité de temps.

$$Débit = \frac{Volume\ déplacé}{Temps} \quad , \quad on\ note : \quad Q_v = \frac{V}{t}$$

En unité usuelle :

Le débit s'exprime en litre par min (L/mn)

Le volume s'exprime en Litre

Le temps s'exprime en mn

c)- La puissance :

En mécanique la puissance s'exprime : $P = F \cdot V$

Par analogie la Puissance hydraulique s'écrit :

$$P(kw) = \frac{Q_v(l/mn) \cdot p(bar)}{600}$$

Chapitre 2 : les pompes et les compresseurs

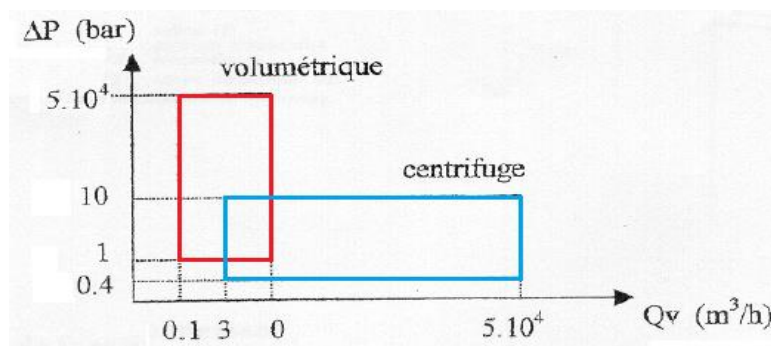
I. Les pompes

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

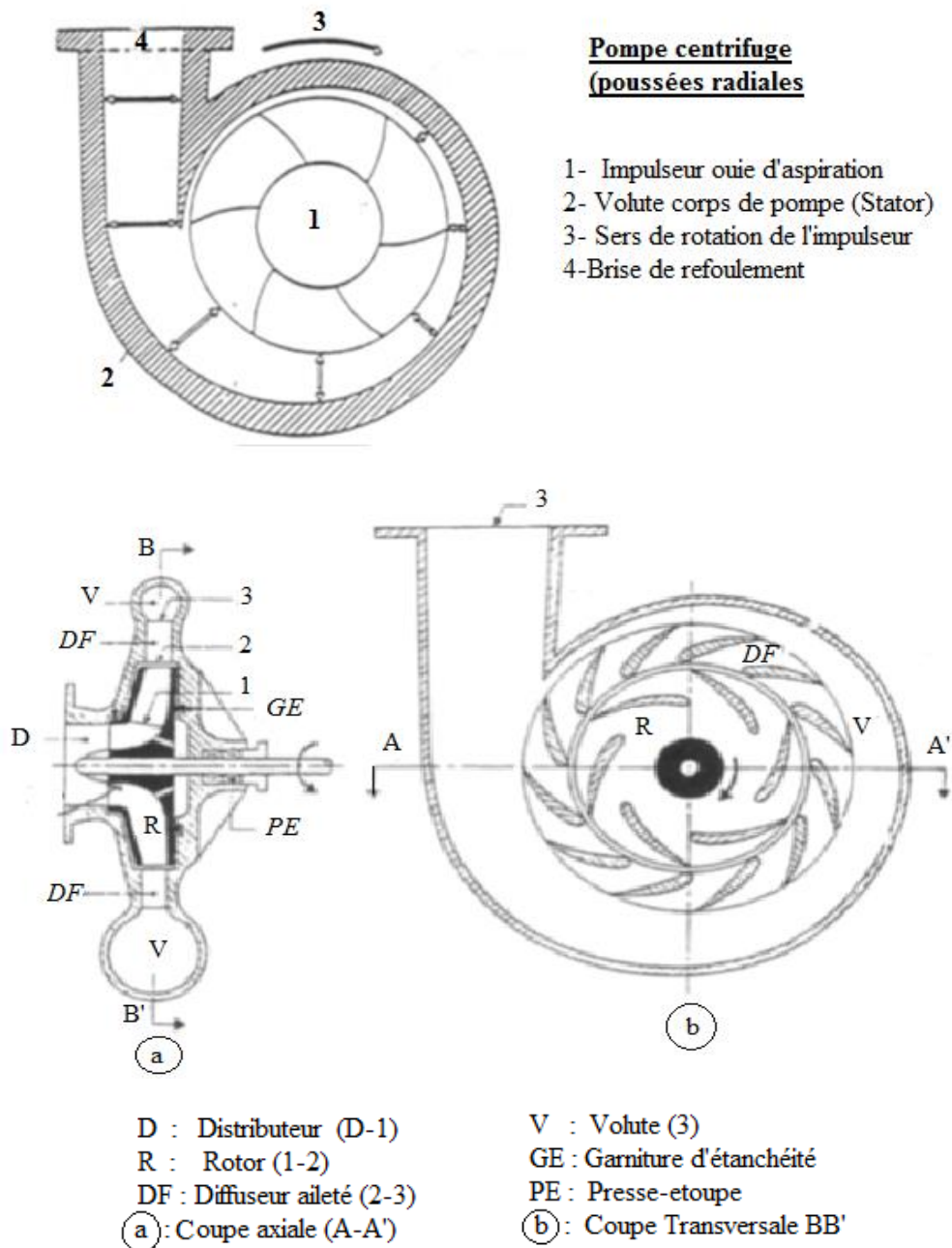


Figure (1) : Pompe centrifuge monocellulaire (coupes) [8].

2.1. 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.

2.2. Les différents montages

Il existe deux types de montage

- En aspiration
- En charge

2.3. 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].

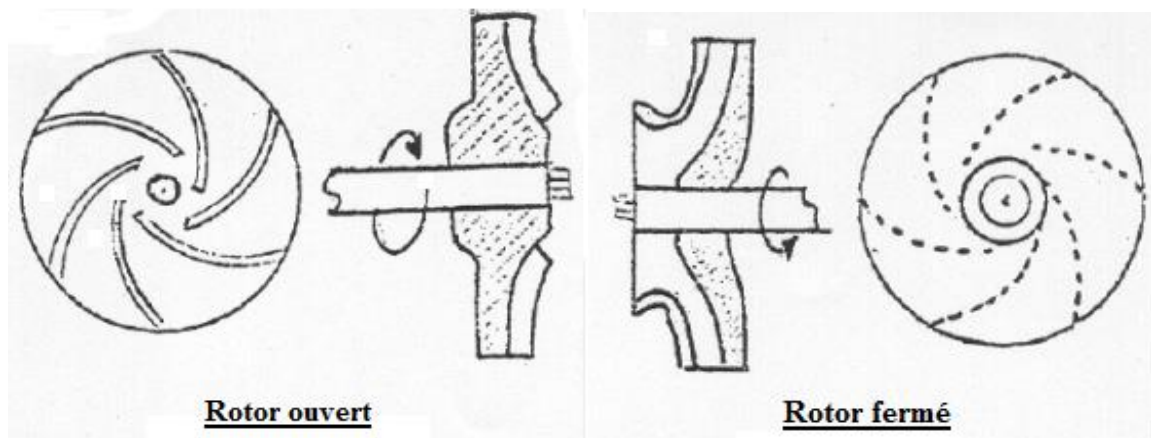


Figure (2) : Pompes multi-étagées [9]

3. Les Pompes Volumétriques

3.1. 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 différents 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

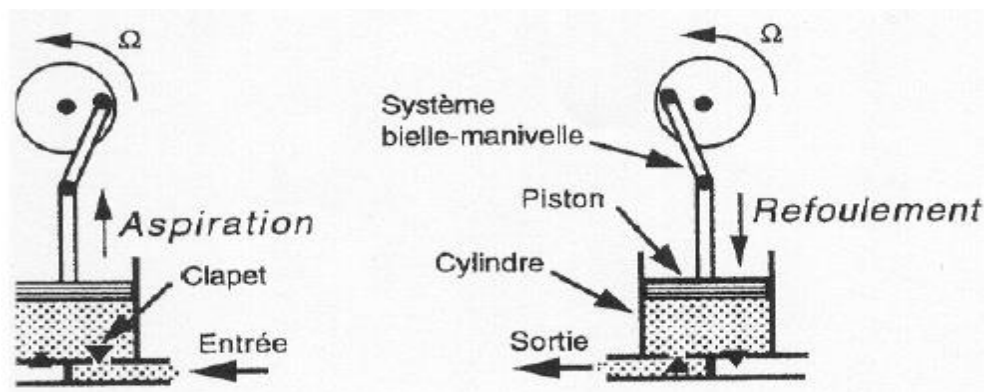


Figure (3) : Pompes à simple effet

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

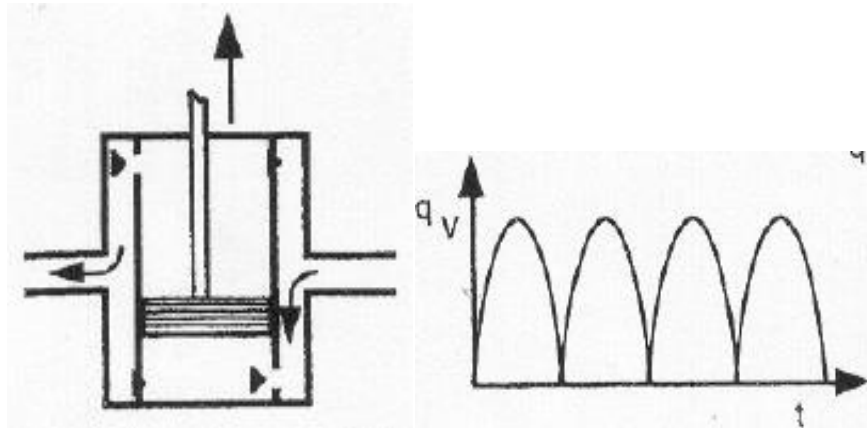


Figure (4) : Pompes à double effet [9]

- **Pompes à plusieurs pistons déphasés**

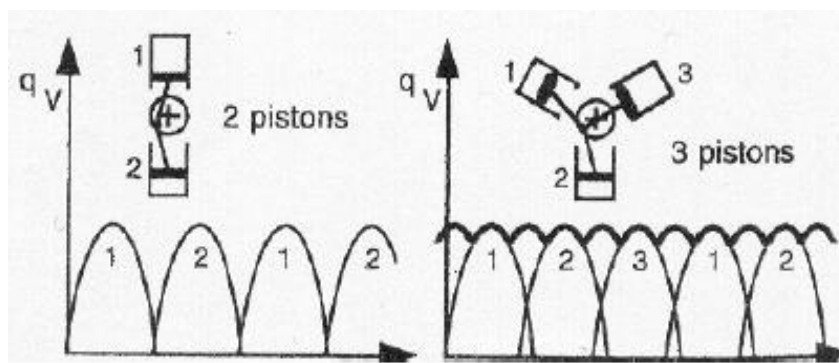


Figure (5) : Pompes multi-pistons [9]

4.1. 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].

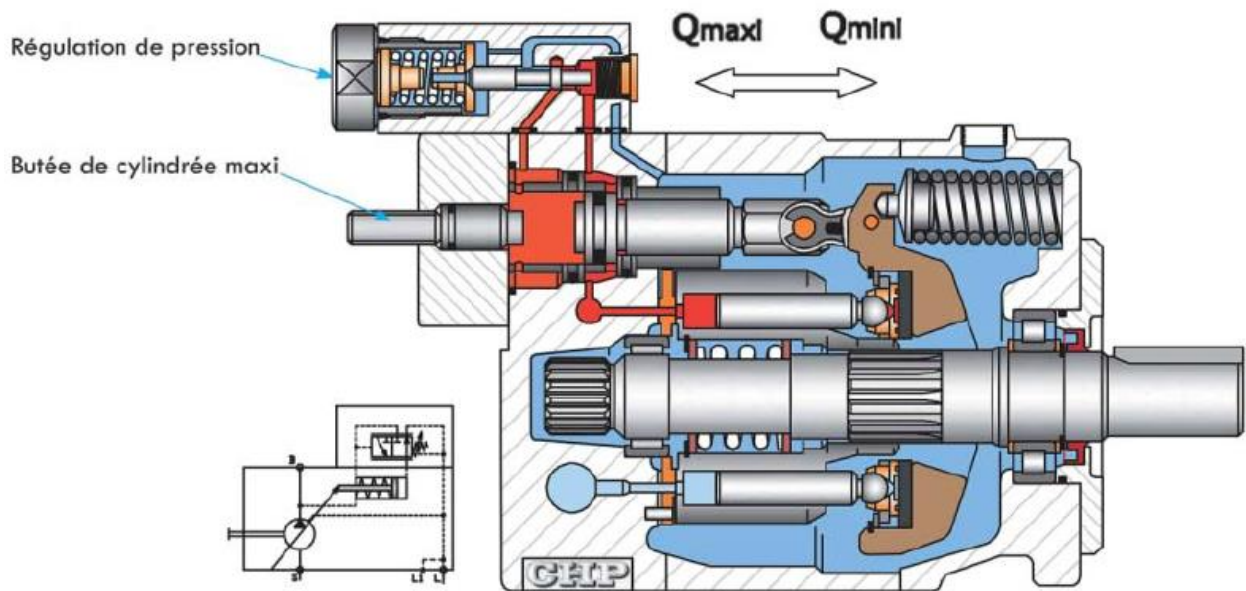


Figure (6) : Régulation de débit et de la pression [10].

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.

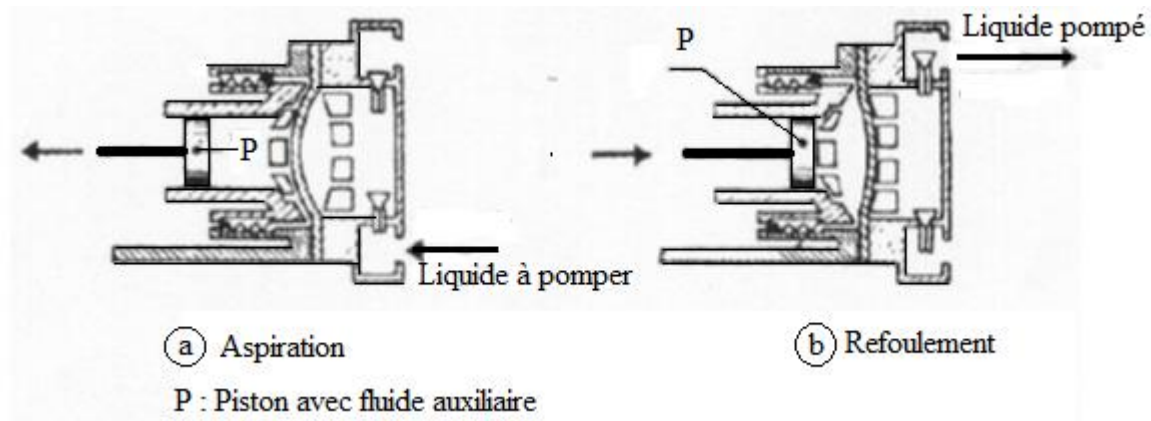


Figure (7) : Pompe à piston [8]

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:

6.1. 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.

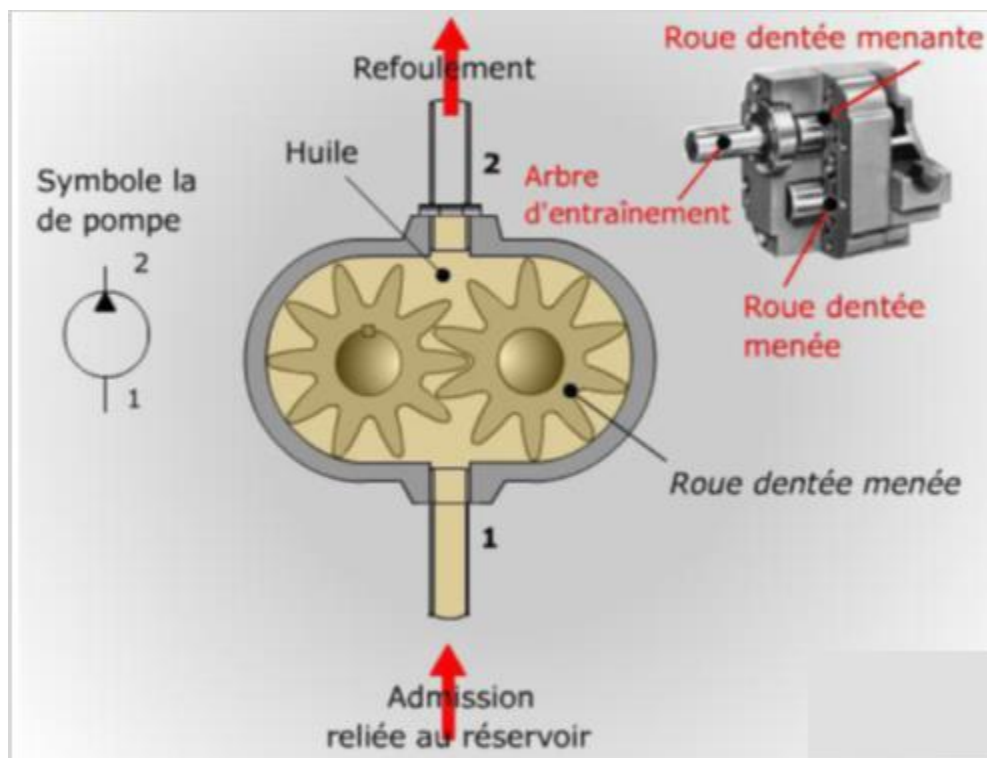


Figure (8) : Pompes à engrenage [8].

6.2. Pompes à lobes :

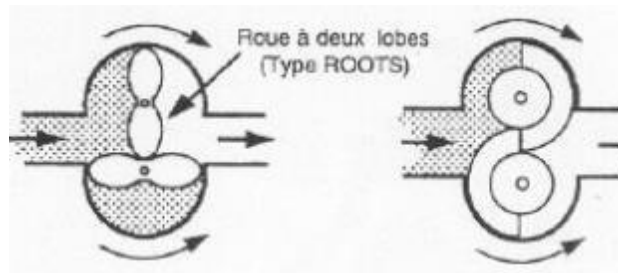


Figure (9) : pompe à deux lobes [9]

6.3. 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.

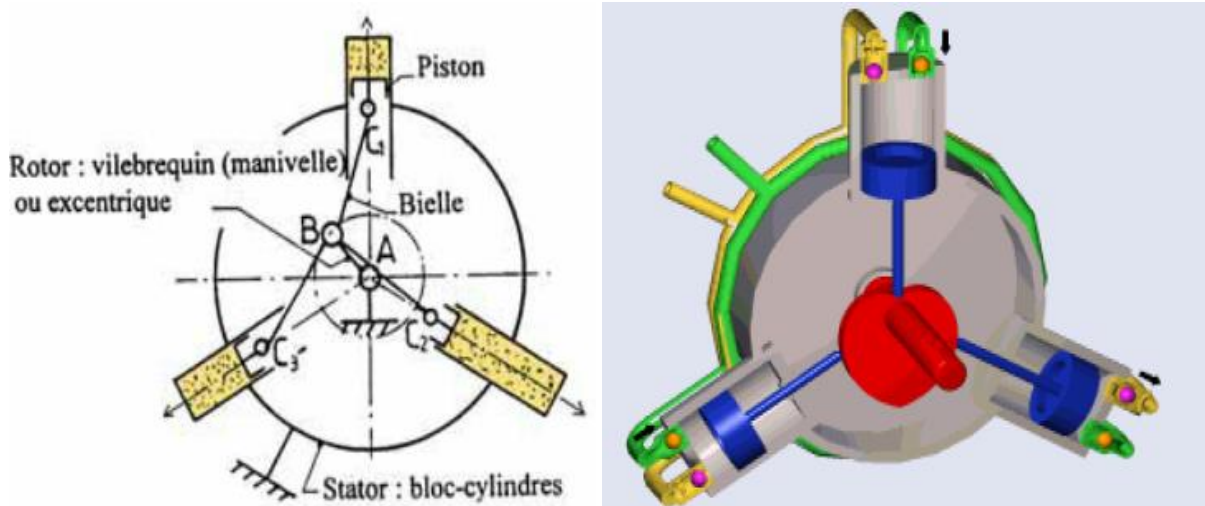


Figure (10) : Pompe à pistons radiaux [9]

6.4. 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].

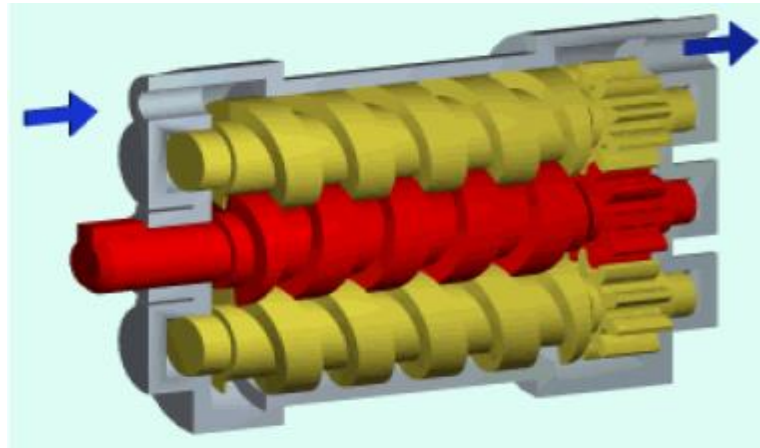


Figure (11) : Pompe à Vis [9]

6.5. Pompes à rotor hélicoïdal excentré

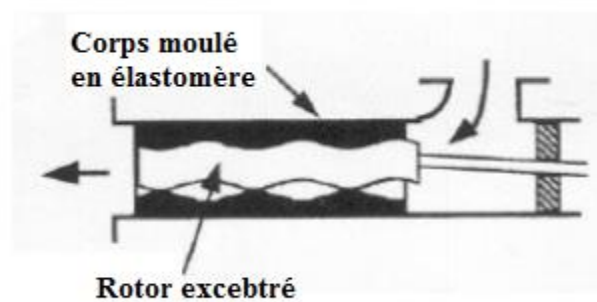


Figure (12) : Pompe à rotor hélicoïdal excentré [9]

6.6. 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.

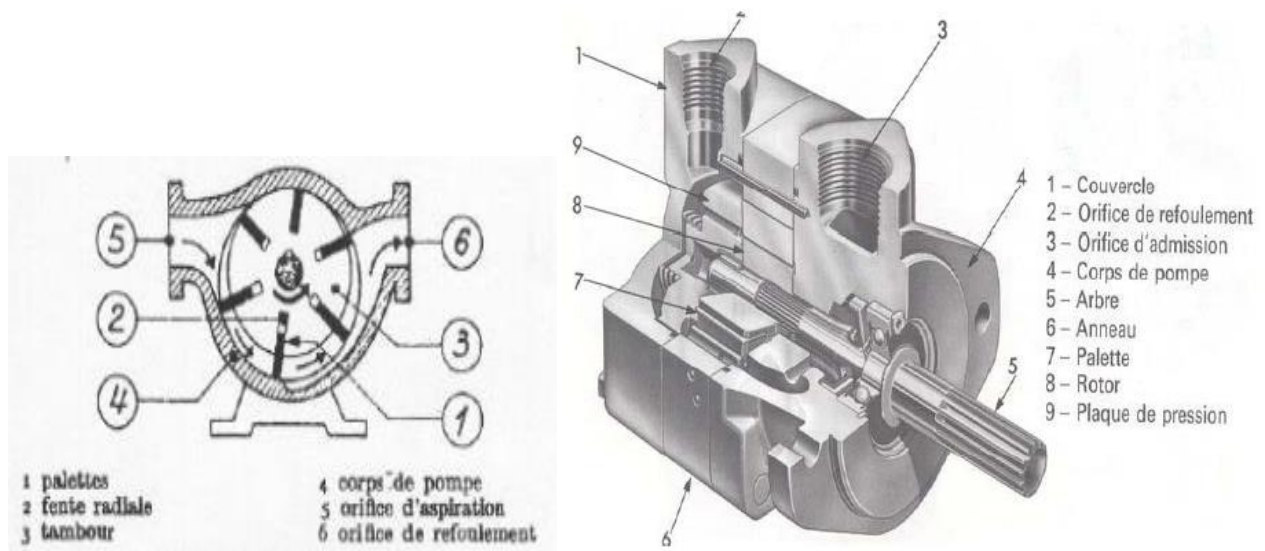


Figure (13). Pompes à palettes [9]

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] :

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

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).

1.1. 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

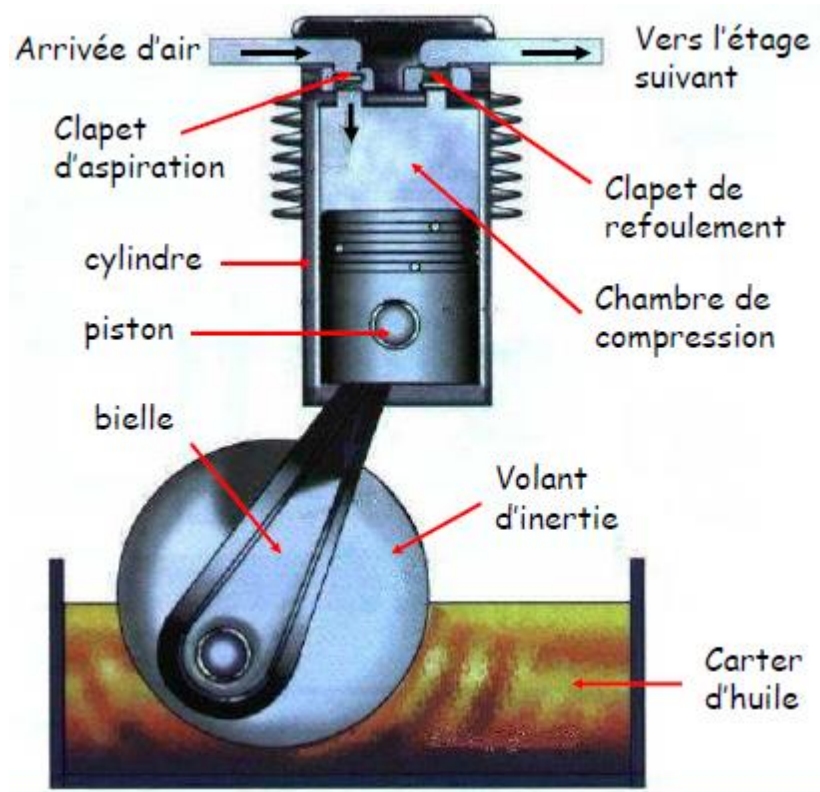


Figure (14) : Schéma de principe du compresseur [11]

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.

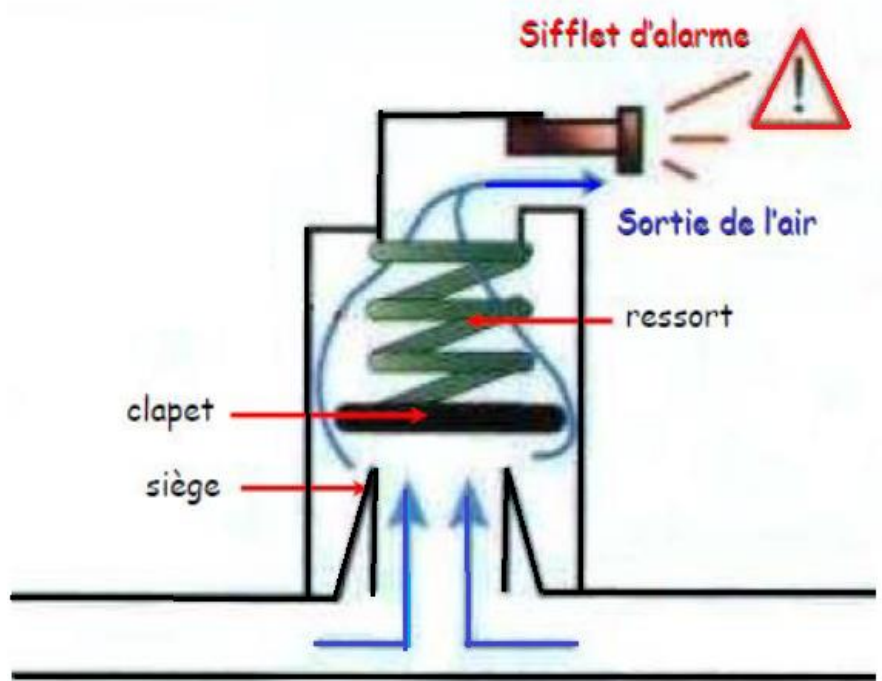


Figure (15) : Schéma de principe de la soupape de sécurité [11]

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].

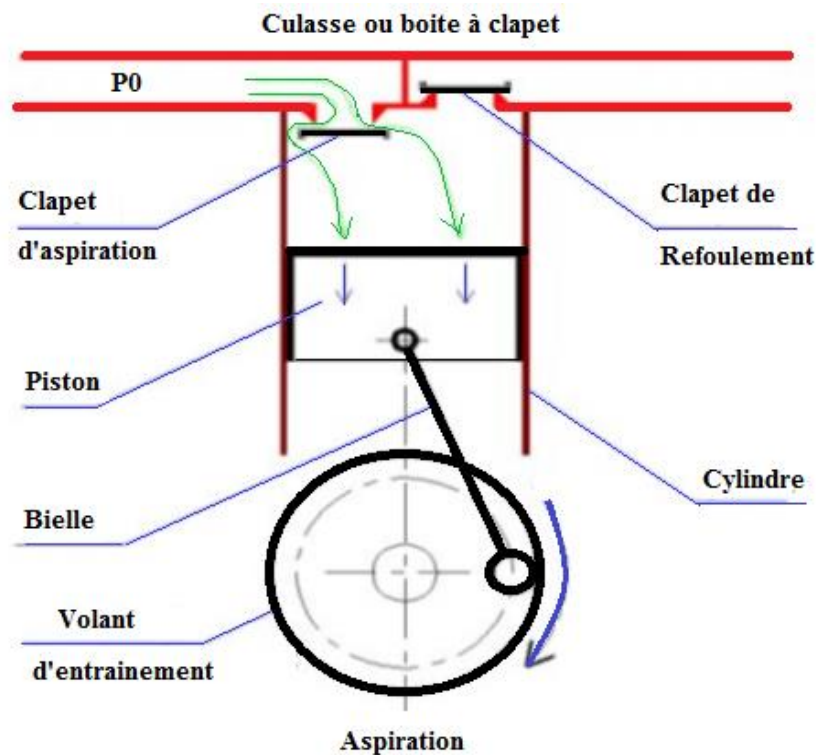


Figure (16) : Principe de fonctionnement du compresseur, phase d'aspiration [12]

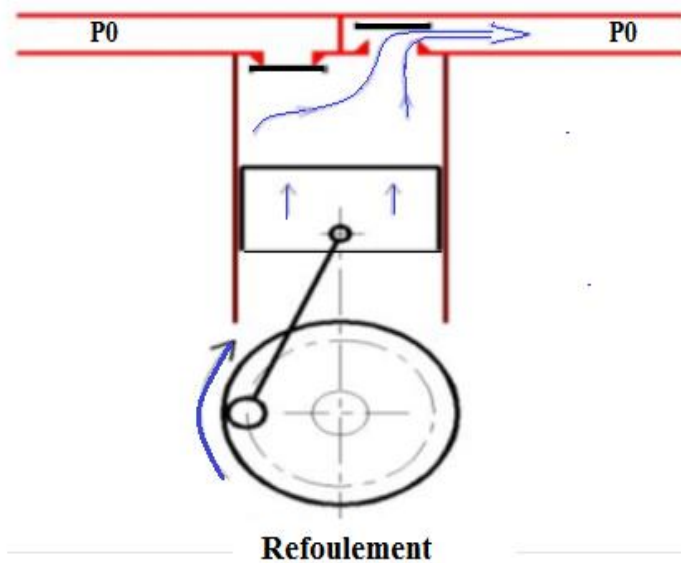


Figure (17) : Principe de fonctionnement du compresseur, phase de refoulement [12]

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 :

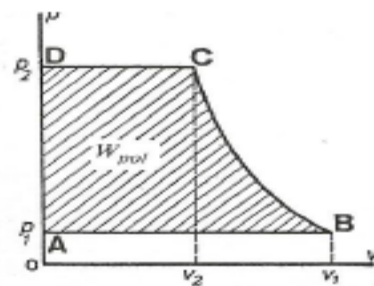


Figure (18) : Compression polytropique en cycle PV

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

et ceci pour une course arbitraire donc un polytrophe

$$PV^n = P_1 V_1^n$$

On aura :

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

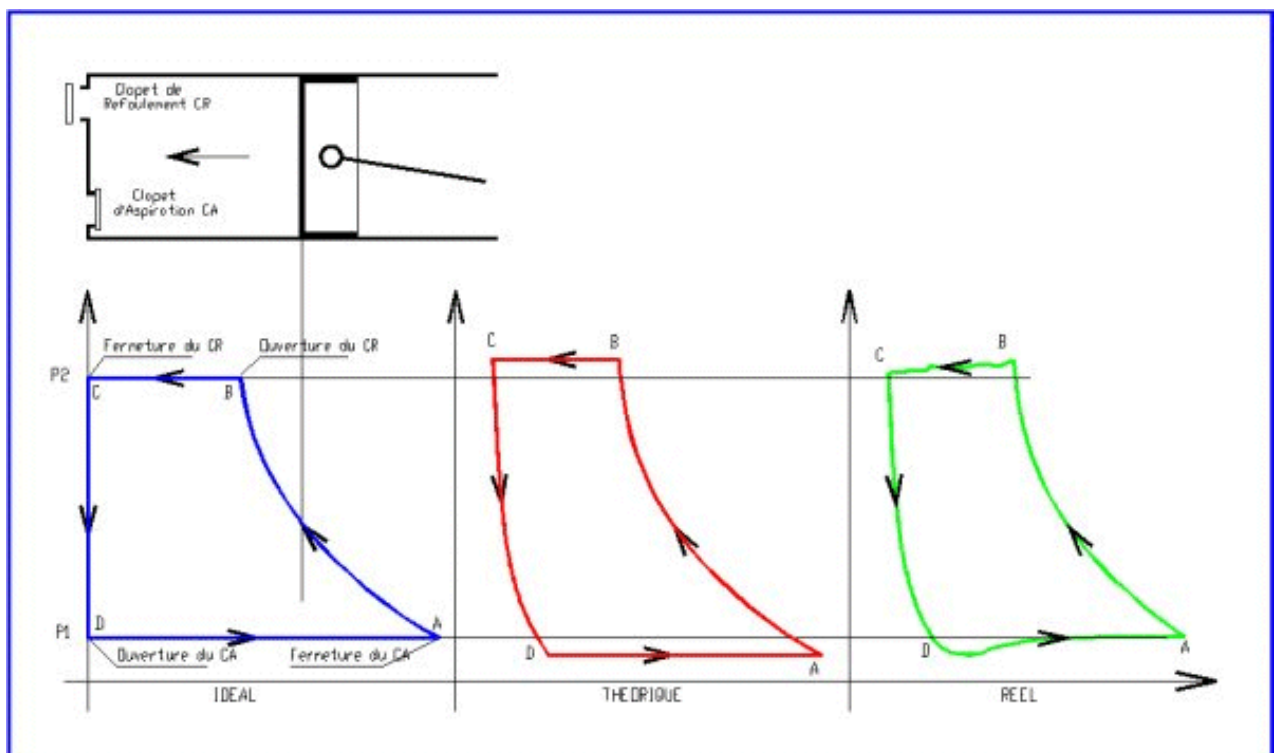
$$W = \frac{n}{n-1} P_1 V_1 \left(\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right)$$

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 ;

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

- 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.

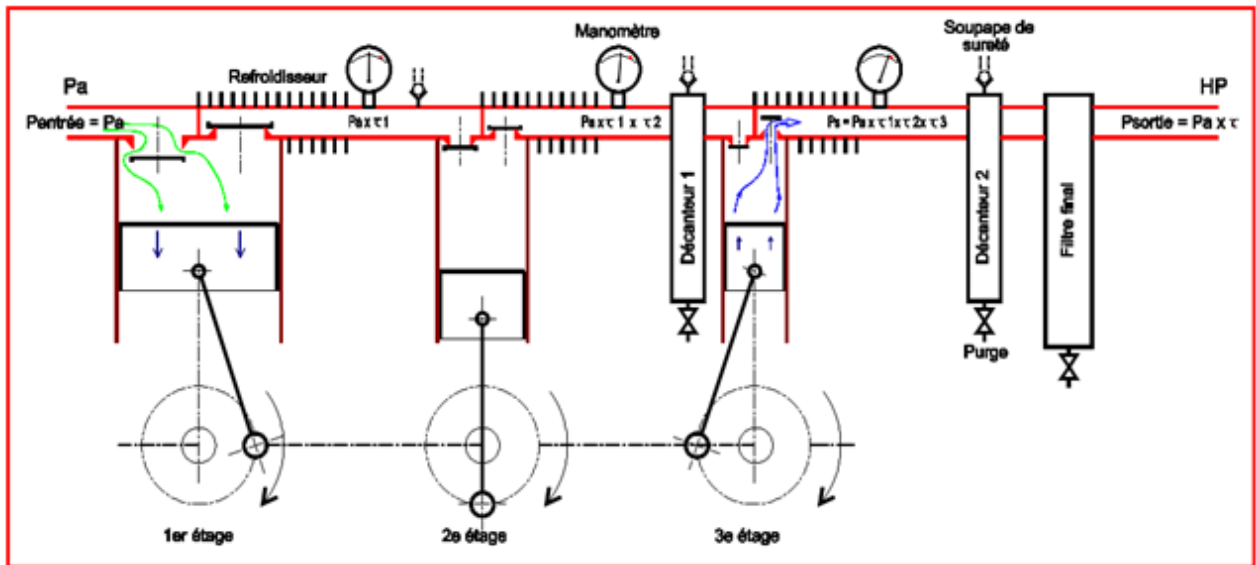


Figure (20) : Compresseur multi-étages [12].

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 :

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

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.