

Chapitre I

Théorie des pompes

Introduction

Dans ce chapitre on va aborder l'aspect théorique des pompes en général. Leurs principe de fonctionnement et leurs classification.

I .1. Definition

Les pompes sont des machines hydrauliques qui fournissent de l'énergie au fluide cette énergie permet au fluide de couler dans une conduite pour le déplacer au niveau le plus élevé. [1]

ET Les pompes sont des appareils permettant un transfert d'énergie entre le fluide et un dispositif mécanique convenable. Suivant les conditions d'utilisation, ces machines communiquent au fluide soit principalement de l'énergie potentielle par accroissement de la pression en aval, soit principalement de l'énergie cinétique par la mise en mouvement du fluide. [2]

Et Les pompes sont des appareils mécaniques servant à véhiculer des liquides d'un point A, à un point B. Elles permettent, notamment, de prendre un liquide à la pression P_1 et de le porter à la pression P_2 (avec $P_2 > P_1$). Pour véhiculer un liquide d'un endroit à un autre, la pompe doit fournir une certaine énergie Cette dernière se manifeste sous deux formes:

- Cinétique : pour la mise en mouvement du fluide (le débit).
- Potentielle : pour accroître la pression en aval.
- L'énergie requise pour faire fonctionner ces machines dépend donc des nombreux facteurs rencontrés dans l'étude des écoulements :
 - Les propriétés du fluide : masse volumique, viscosité, compressibilité.
 - Les caractéristiques de l'installation : longueur, diamètre, rugosité, singularités
 - Les caractéristiques de l'écoulement : vitesse, débit, hauteur d'élévation, pression. [3]

Devant la grande diversité de situations possibles, on trouve un grand nombre de machines que l'on peut classer en deux grands groupes :

- Les pompes volumétriques comprenant les pompes alternatives (à piston, à diaphragme, ...) et les pompes rotatives (à vis, à engrenage, à palettes, hélicoïdales, péristaltiques ...).

- Les turbopompes sont toutes rotatives ; elles regroupent les pompes centrifuges, à hélice et hélico-centrifuges.

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. [2]

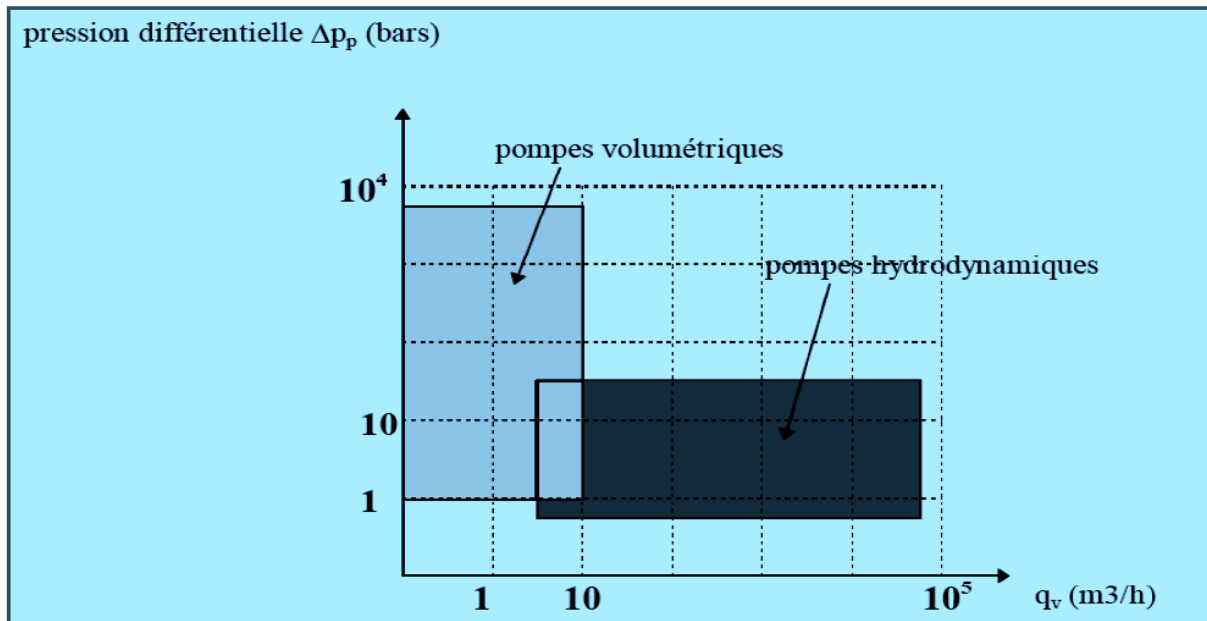


Figure I. 1. Comparaison entre pompes volumétrique et hydrodynamique. [3]

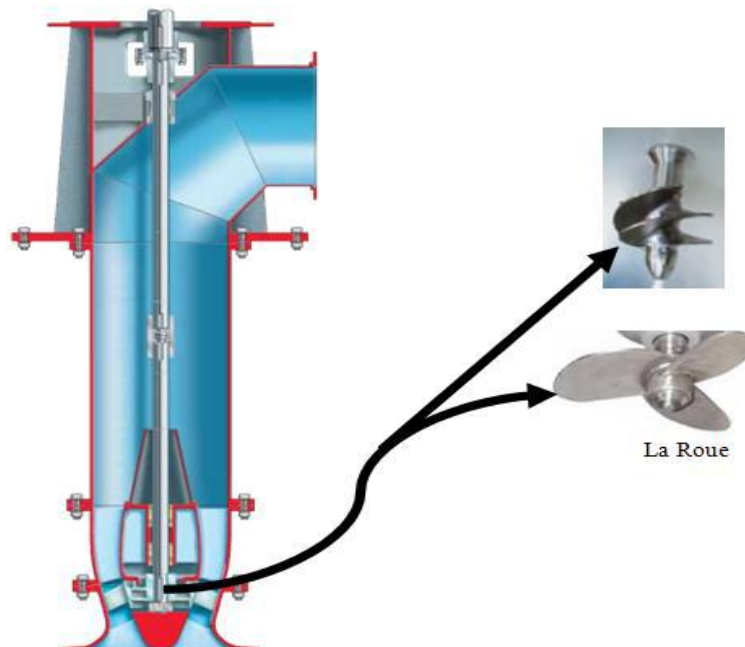
I.2. Les Turbopompes

Les turbopompes sont actuellement les plus employées dans le domaine de l'hydraulique, les principales raisons de ce choix sont les suivantes :

- ces appareils sont étants relatifs et ne comportent aucune liaison articulée.
- L'encombrement des turbopompes est environ huit fois moindre que celui des pompes volumétriques.
- Les frais entretiens d'une turbopompe sont peu élevés.
- Leur entraînement par un moteur électrique. [1]

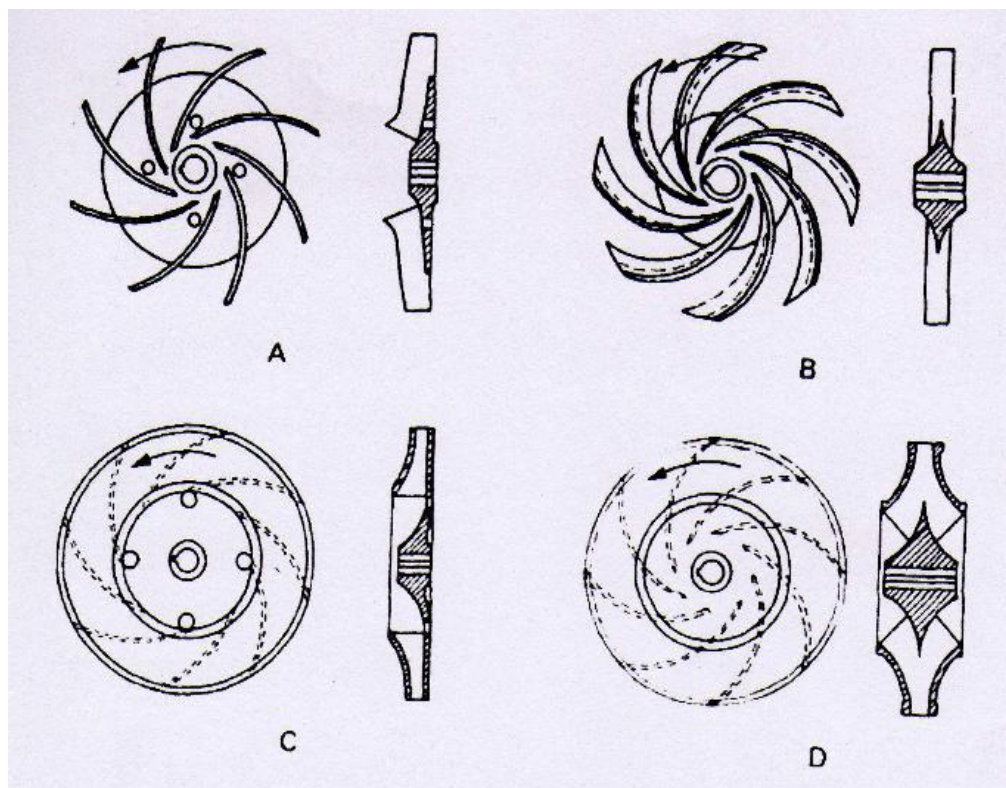
I.2.1. Différents types des turbopompes

Suivant le type de rotor et son mode d'action il faut distinguer dans la catégorie des turbopompe:

A) Les pompes centrifuges radiales.**Figure I.2. Pompe centrifuge. [4]****B) Les pompes axial****Figure I .2. Pompe-hélice. [4]**

C) Les pompes helico-centrifuges**Figure I .3. Pompe hélico-centrifuge. [5]**

Cette classification est base sur la forme de la trajectoire du liquide à l'intérieur de la roue. [1]

**Figure I .4. Les Types Des Roues Des Pompes. [5]**

I.2.2.Principe de fonctionnement

Sous l'effet de la rotation de la roue, le liquide emmagasiné entre les aubes du rotor est projeté de la région axiale à la périphérie à cause de la force d'inertie centrifuge, de ce fait une dépression est créée à l'entrée de la pompe, provoquant l'aspiration du liquide, par suite, un écoulement continu de la veine liquide laquelle est recueillie par la volute ou par le diffuseur et dirigée dans la conduite de refoulement . [6]

Dans la volute, l'énergie cinétique est transformée en énergie potentielle et on dispose, ainsi à l'orifice de refoulement un débit sous une certaine pression qui se traduit par une hauteur manométrique de refoulement. [7]

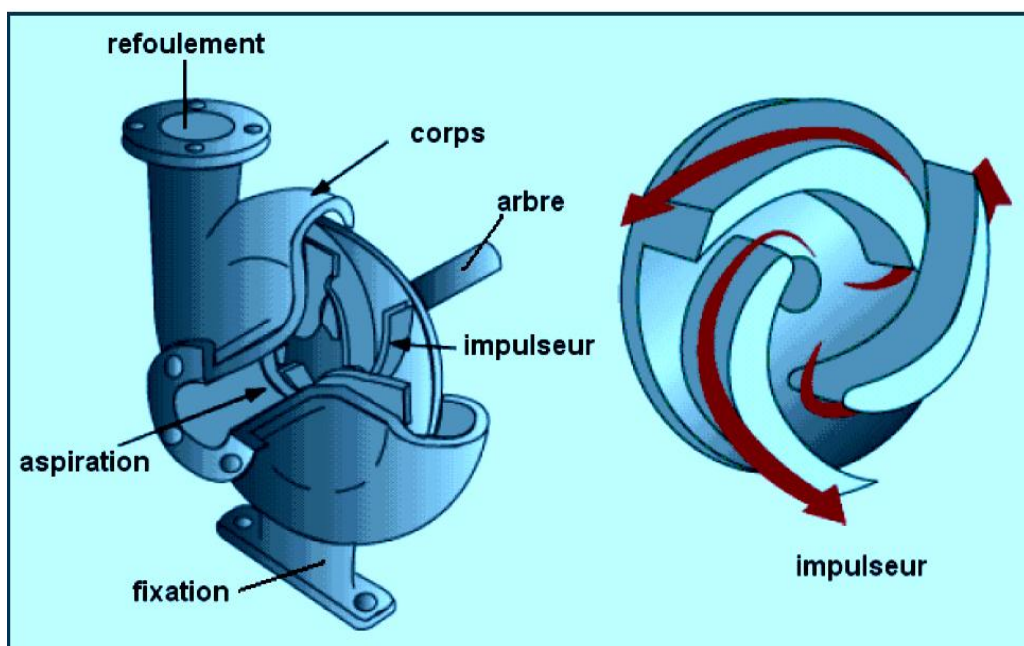


Figure I. 5. Principe de fonctionnement d'une pompe centrifuge.

Et Le principe de fonctionnement se base sur une interaction de force entre les aubes de la roue et le courant d'eau qu'il contourne.

Pour :

- une pompe centrifuge radial est défini par un refoulement perpendiculaire à l'axe de la pompe ce dernier est parallèle avec le sens de l'aspiration.
- pour une pompe helico-centrifuges avec une roue semi axiale, le refoulement se fait parallèlement à l'axe de la pompe et à l'aspiration.

- Pour une pompe à hélices comportant une roue axiale le refoulement se fait parallèlement à l'axe de la pompe et à l'aspiration.

Une pompe centrifuge est constituée par:

- une roue à aubes tournant autour de son axe
- un distributeur dans l'axe de la roue
- un collecteur de section croissante, en forme de spirale appelée volute.

Le liquide arrive dans l'axe de l'appareil par le distributeur et la force centrifuge

le projette vers l'extérieur de la turbine. Il acquiert une grande énergie cinétique qui se transforme en énergie de pression dans le collecteur où la section est croissante.

L'utilisation d'un diffuseur (roue à aubes fixe) à la périphérie de la roue mobile permet une diminution de la perte d'énergie. [1]

I.2.3.Utilisation

Ce sont les pompes les plus utilisées dans le domaine industriel à cause de la large gamme d'utilisation qu'elles peuvent couvrir, de leur simplicité et de leur faible coût. Néanmoins, il existe des applications pour lesquelles elles ne conviennent pas telles que :

- utilisation de liquides visqueux: la pompe centrifuge nécessaire serait énorme par rapport aux débits possibles.
- utilisation de liquides "susceptibles" c'est-à-dire ne supportant pas la très forte agitation dans la pompe (liquides alimentaires tels que le vin, le lait et la bière).
- utilisation comme pompe doseuse: la nécessité de réaliser des dosages précis instantanés risque d'entraîner la pompe en dehors de ses caractéristiques optimales.
- Ces types d'application nécessitent l'utilisation de pompes volumétriques.

Par contre contrairement à la plupart des pompes volumétriques, les pompes centrifuges admettent les suspensions chargées de solides. [1]

I.3.Les pompes centrifuges

I.3.1. Composants d'une pompe centrifuge

Une pompe centrifuge dans sa forme la plus simple est constituée d'une roue munie d'ailettes radiales tournantes à l'intérieur d'une enveloppe (Corps de pompe).

Elle se compose de trois organes principaux, qui sont :

- le distributeur
- le rotor (roue)
- le récupérateur

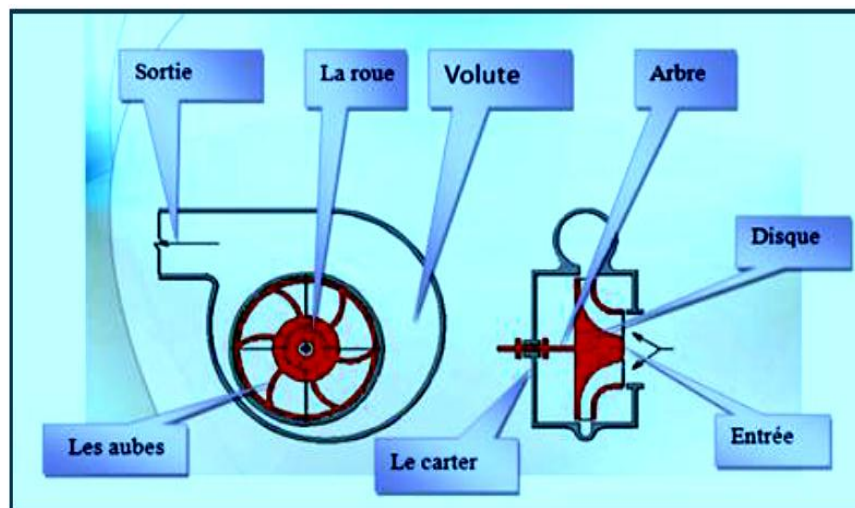


Figure I. 6. Représentation schématique d'une pompe centrifuge.

- **Le Distributeur** : Le rôle du distributeur, situé en amont de la roue, est de permettre une Accélération et une meilleure orientation des filets fluide à l'entrée de la roue. Il se réduit à une simple tuyauterie pour les pompes monocellulaires
- **Roue (turbine, rotor)** : C'est l'organe principal de la pompe. Elle comporte des aubes ou ailettes qui grâce à leur interaction avec le liquide véhiculé transforme l'énergie mécanique en une énergie cinétique.

Elles peuvent être :

- Ouvertes sans flasque; les aubes sont reliées seulement au moyeu.
- Semi-ouvertes avec un seul flasque arrière.
- Fermés avec deux flasques ou trois Toutes ces roues centrifuges sont alimentées axialement par le liquide qui, après circulation dans les canaux, sort radialement par rapport à l'axe de rotation.

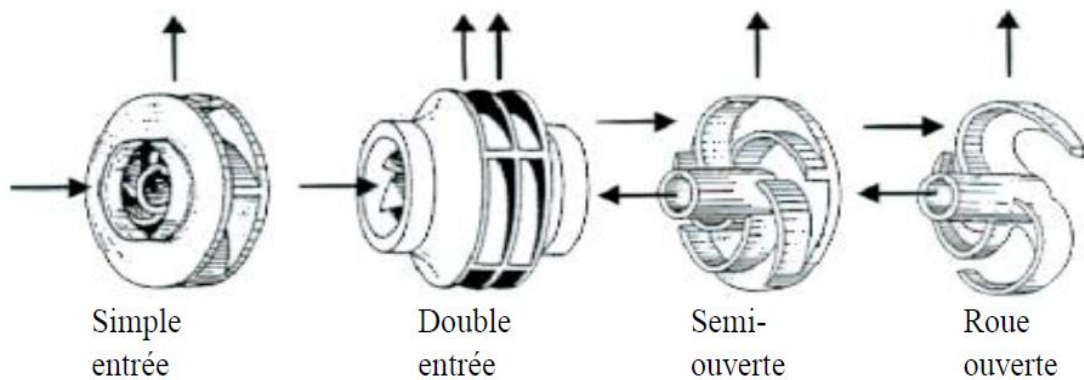


Figure I. 7. Différentes roues d'une pompe centrifuge.

- **Le Récupérateur** : Est un organe fixe qui collecte le liquide à la sortie du rotor et le canalise vers la sortie de la pompe avec la vitesse désirée, durant cette opération une transformation pareille de l'énergie de pression tient lieu. Le récupérateur se compose en générale de deux organes :
- **Le diffuseur** : Avec ou sans aubages, cet organe permet de transformer une partie l'énergie cinétique due à la vitesse et d'orienter correctement le fluide à la sortie de la roue pour son entrée dans la volute ou dans le distributeur de l'étage suivant.
 - **La volute** : est un collecteur du liquide venant du diffuseur, elle assure la transformation de l'énergie cinétique en énergie de pression, et la canalisation du liquide vers la section de sortie de la pompe.

I.3.2. Classification des pompes centrifuges

Les pompes centrifuges sont classées suivant la forme de la roue, la forme du corps de la pompe, le nombre des roues et la position de l'axe de la pompe.

A) Forme de la roue

Il existe essentiellement trois types de pompes :

- a- Les pompes centrifuges proprement dite, ou à écoulement radial ;
- b - Pompes hélico centrifuges ;
- c - Pompes à écoulement axial.

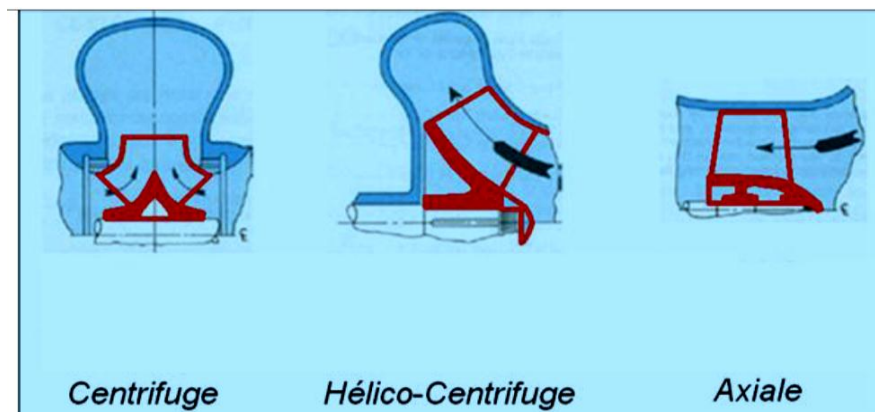


Figure I. 8. Différentes pompes selon la trajectoire du fluide

B) Forme du corps de pompe :

Ils existent essentiellement les types de pompes suivants :

- **Pompes a volute ou colimaçon** : Corps de pompe dessiné de façon à maintenir les vitesses égales autour de la roue et à réduire la vitesse de l'eau dans le passage à la section de sortie.
- **Pompes a diffuseur circulaire ou du type turbine** : Corps de pompe à section constante et concentrique à la roue, qui dans ce cas est entourée d'aubes fixes qui dirigent l'écoulement et réduisent la vitesse de l'eau, ainsi transformant l'énergie cinétique en énergie de pression.

C) Nombre de roues:

On peut diviser les pompes en deux catégories :

- **Pompes a un seul étage, (pompes monocellulaires)** : Quand la pompe ne comporte qu'une seule cellule, elle est dite monocellulaire. Elle se compose d'une roue et d'une volute ou corps de pompe, qui joue le rôle du diffuseur de la pompe. On peut atteindre des pressions de 1,5 à 8 bars (soit 15 à 80 m d'eau). [6]

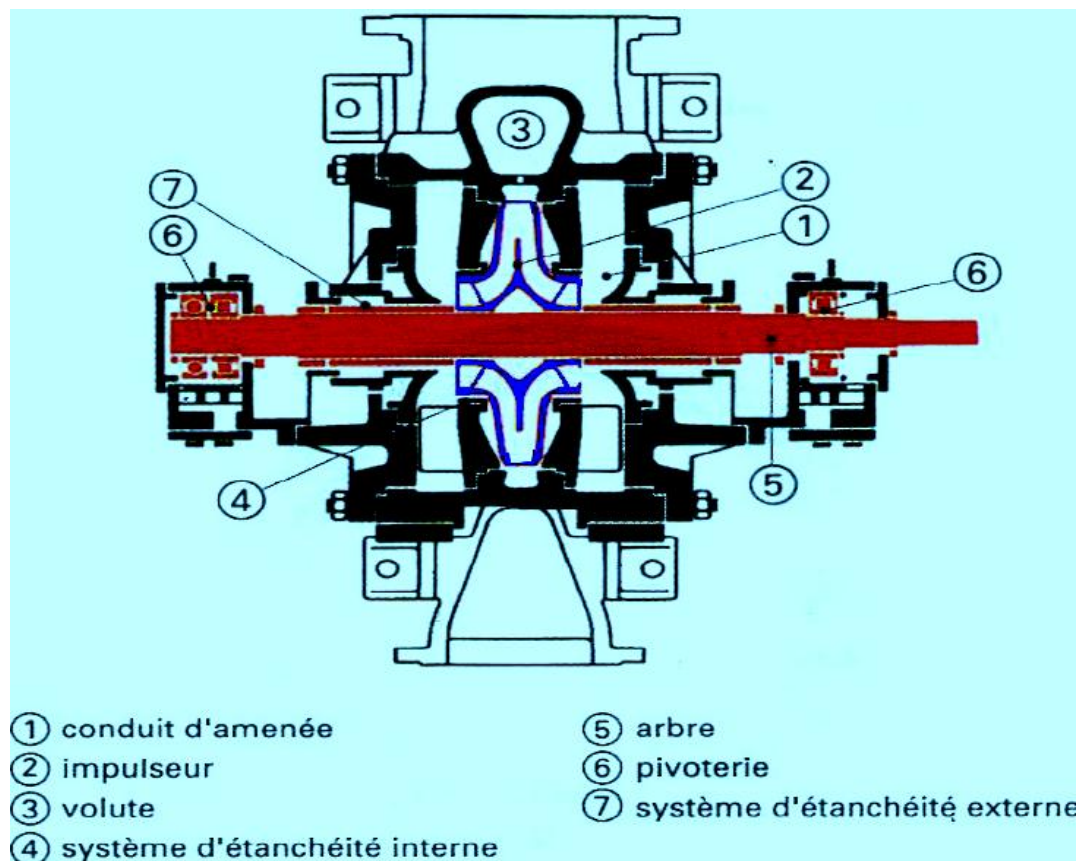


Figure I. 9. Pompe centrifuge monocellulaire.

- **Pompes multicellulaires** : Elles sont utilisées lorsque la pression exigée au refoulement est importante, donc il serait théoriquement possible d'utiliser une pompe équipée d'une roue de grand diamètre, mais il est en général très rentable d'utiliser des pompes multicellulaires (plusieurs étages) constituées de pompes monocellulaires montées en série sur un même arbre de commande. On peut atteindre des pressions très importantes de 8 à 30 bars (soit 80 à 300 m d'eau).

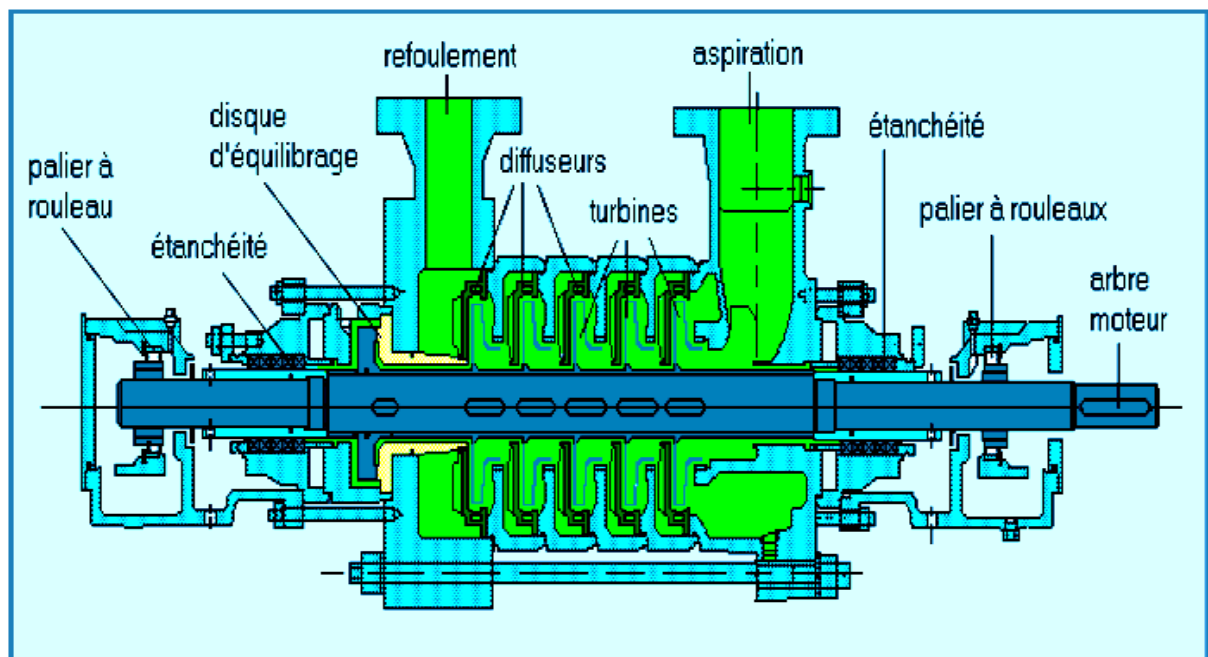


Figure I. 10. Vue en coupe d'une pompe multicellulaire.

d) La Position de l'axe :

Les pompes sont classées en pompes à axe horizontal, à axe vertical et à axe incliné.

- **Pompes à axe horizontal** : Cette disposition est la plus classique, elle est adoptée généralement pour les pompes de surface. L'entretien et le démontage de la pompe sont simplifiés.

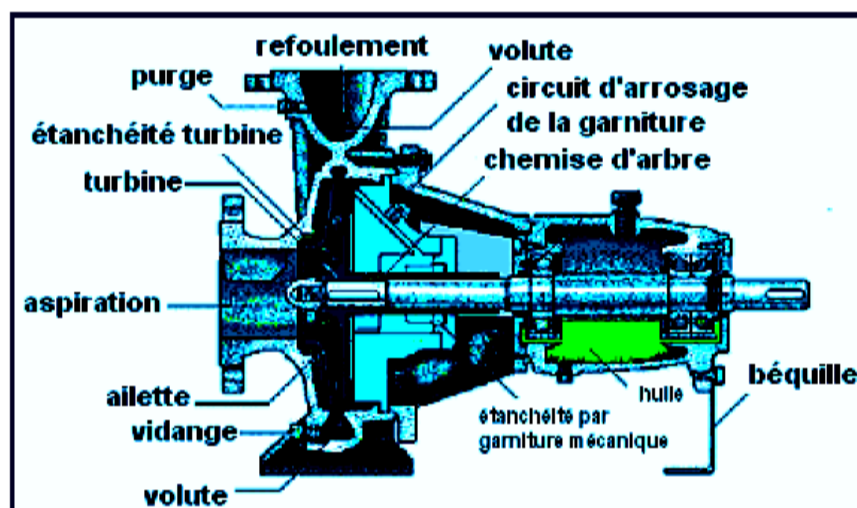


Figure I.11. Pompe à arbre horizontal.

- **Pompes à axe vertical** : Ces pompes verticales sont submergées ou immergées, elles sont spécialement conçues pour l'équipement des puits profonds. [8]

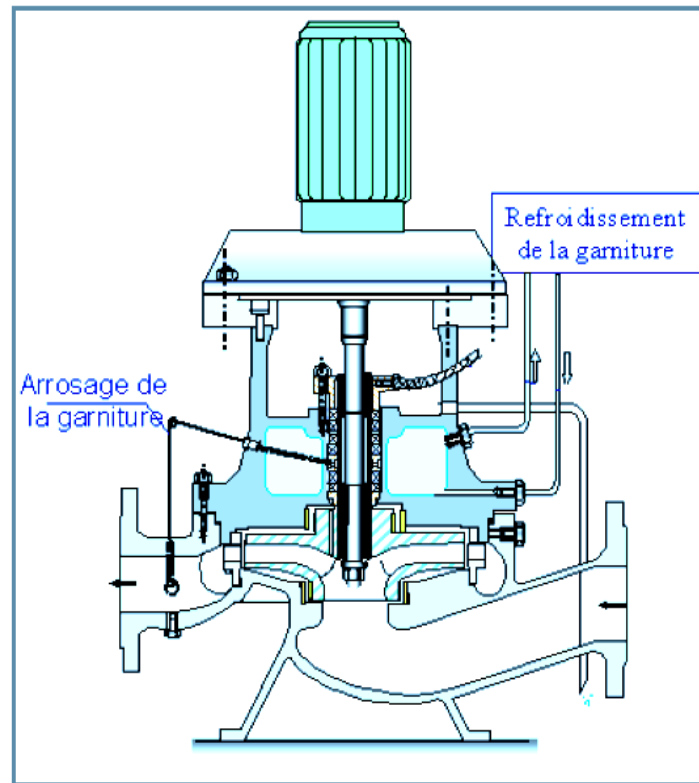


Figure I.12. Pompes a arbre vertical

I.3.3. Caractéristiques générales des pompes centrifuges

A) La Vitesse de rotation H (Tr/Min) : c'est le nombre de tours qu'effectue la pompe par unités de temps :

$$\omega = 2\pi \cdot n / 60 \text{ [rd/sec]} \dots\dots\dots (I.1)$$

B) Débit : Le débit Q fourni par une pompe centrifuge est le volume refoulé pendant l'unité de temps. Il s'exprime en mètres cubes par seconde (m^3/s) ou plus pratiquement en mètres cubes par heure (m^3/h). [9]

C) Hauteur manométrique : On appelle Hauteur manométrique (H_{mt}) d'une pompe, l'énergie fournie par la pompe à l'unité de poids du liquide qui la traverse. Si **HTA** est la charge totale du fluide à l'orifice d'aspiration et **HTR** la charge totale du fluide à l'orifice de refoulement, la hauteur manométrique de la pompe est :

$$H_{MT} = H_{TR} \pm H_{TA} \dots\dots\dots (I.2)$$

La hauteur varie avec le débit et est représentée par la courbe caractéristique $H = f(Q)$ de la pompe considérée. [9]

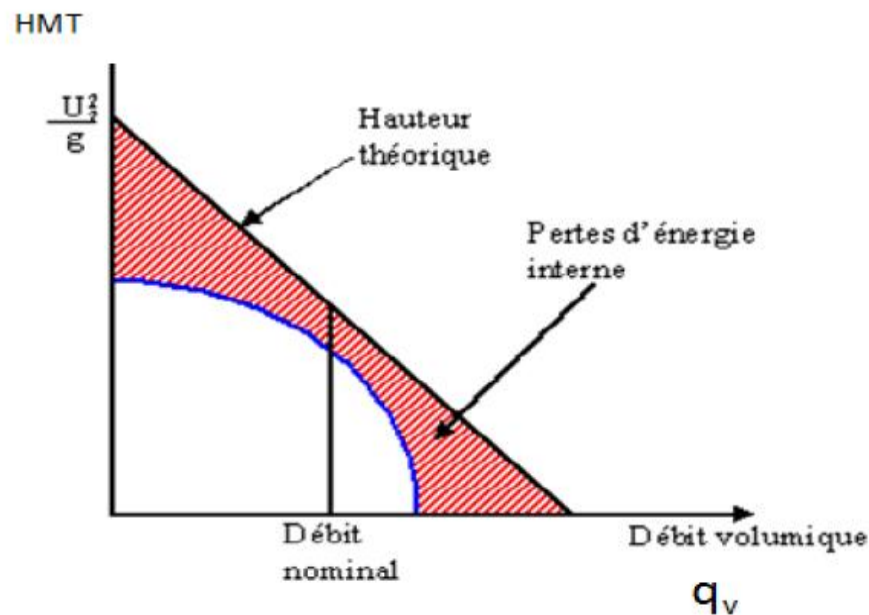


Figure I. 13. Courbe hauteur-débit.

d) Le Rendement : Le rendement (η) d'une pompe est le rapport de la puissance utile P (puissance hydraulique) communiquée au liquide pompé à la puissance absorbée P_a par la pompe (en bout d'arbre) ou par le groupe (aux bornes du moteur). Si Q est le débit volume du fluide, ρ sa masse volumique et HMT la hauteur manométrique de la pompe, la puissance P et le rendement η sont respectivement donnés par les équations : [9]

$$P = \rho g H Q \dots\dots\dots(I.3)$$

$$\eta = \rho g H Q / P_a \dots\dots\dots(I.4)$$

Le rendement de la pompe varie avec le débit et passe par un maximum pour le débit nominal autour duquel la pompe doit être utilisée. [2]

I.4. Représentation graphique

Hauteur manométrique totale : La hauteur manométrique totale d'élévation est la somme des termes suivants :

I.4.1. La Hauteur géométrique d'élévation h_g

Entre le plan d'eau de pompage et le plan le plus Haut à atteindre. Cette hauteur géométrique se décompose en deux :

A) Hauteur géométrique d'aspiration h_a : qui, pour une pompe horizontale, est la distance entre le plan de pompage et l'axe de la pompe et, pour une pompe verticale, la distance

entre le plan de pompage et le plan médian de la première roue, c'est-à-dire celle située à l'altitude la plus basse.

B) Hauteur géométrique de refoulement H_r : qui est la distance séparant le point le plus haut à atteindre, soit de l'axe horizontal, pour un groupe horizontal, soit du plan de la première roue pour un groupe vertical. Ces termes s'ajoutent algébriquement et on a :

$$H_g = H_r + H_a \text{ pour une élévation avec aspiration.}$$

$$H_g = H_r - H_a \text{ pour une élévation avec aspiration sous pression. [10]}$$

I.4.2. Les Pertes De Charge Totales H_f

Tant à l'aspiration qu'au refoulement. Leur calcul ne présente aucune difficulté et les formules suivantes représentent les différents cas qu'on peut rencontrer

➤ **1er cas :**

$$HMT = H_h + H_f \text{ asp} + H_f \text{ rouf} + P_r$$

➤ **2ème cas:**

$$HMT = H_h + H_f \text{ asp} + H_f \text{ rouf}$$

➤ **3ème cas:**

$$HMT = H_h + H_f \text{ asp} + H_f \text{ rouf} + (P_2 - P_1)$$

(A condition que P_1 soit $>$ à la pression atmosphérique).

➤ **4ème cas:**

$$HMT = H_h + H_f \text{ asp} + H_f \text{ rouf} + P_r + (p_{atm} - p_1)$$

(A condition que P_1 soit $<$ à la pression atmosphérique).

Avec :

H_h = Charge hydraulique en Pa avec $H_h \text{ (en Pa)} = 9,81.H_g.p$

p = masse volumique du liquide en kg/m^3 .

9.81 = Intensité moyenne de la pesanteur.

H_g = Hauteur géométrique (d'aspiration ou de refoulement ou les deux) en mètre d'eau, mCE. [11]

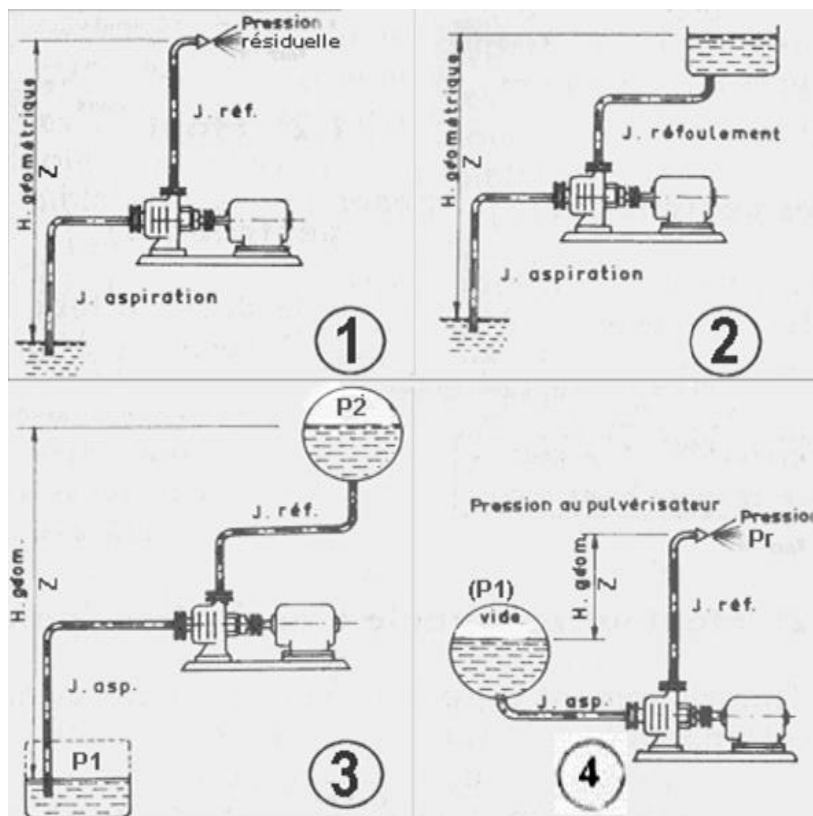


Figure I. 14. Les Déférents branchements possibles d'une pompe. [9]

Remarque : La densité est un facteur important à considérer lors du dimensionnement d'une pompe. La densité d'un liquide peut affecter la pression de sortie d'une pompe. Sur une hauteur verticale identique, un liquide plus lourd que l'eau exige une plus grande force pour véhiculer le fluide. [12]

$H_{f\text{ asp}} = \text{Pertes de charge de la conduite d'aspiration en Pa ;}$

$H_{f\text{ refou}} = \text{Pertes de charge de la conduite de refoulement en Pa ;}$

$Pr = \text{Pression résiduelle ou pression de service en Pa (Pr est une pression relative).}$

I.5.Courbes caractéristiques

Les courbes principales qui caractérisent une pompe sont :

A) La courbe débit-hauteur : On trace cette courbe réelle à partir de la courbe théorique par soustraction des pertes d'énergies. Cette courbe montre la variation de la pression ou hauteur en fonction du débit, ce qui permet aux exploitants d'obtenir la pression désirée par une simple manoeuvre de la vanne de refoulement, ce qui change le débit

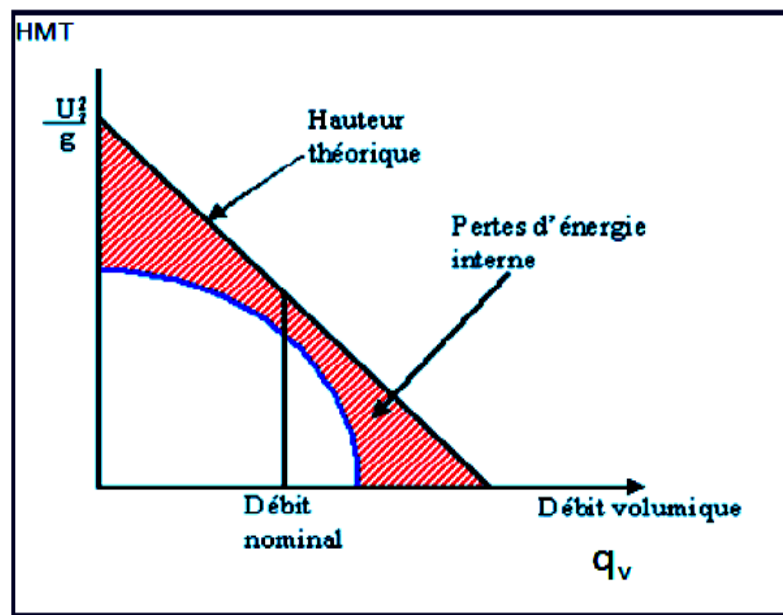


Figure I. 15. Courbe hauteur-débit.

B) La Courbe de puissance absorbée : Dans les pompes à faible et moyenne vitesse spécifique, les courbes P_{ab} représente la puissance absorbée par l'arbre de pompe, ce qui permet de faire le choix de la courbure qui convient, les courbes $P_{ab}=F(qV)$. Sont régulièrement montantes et atteignent par fois un maximum.

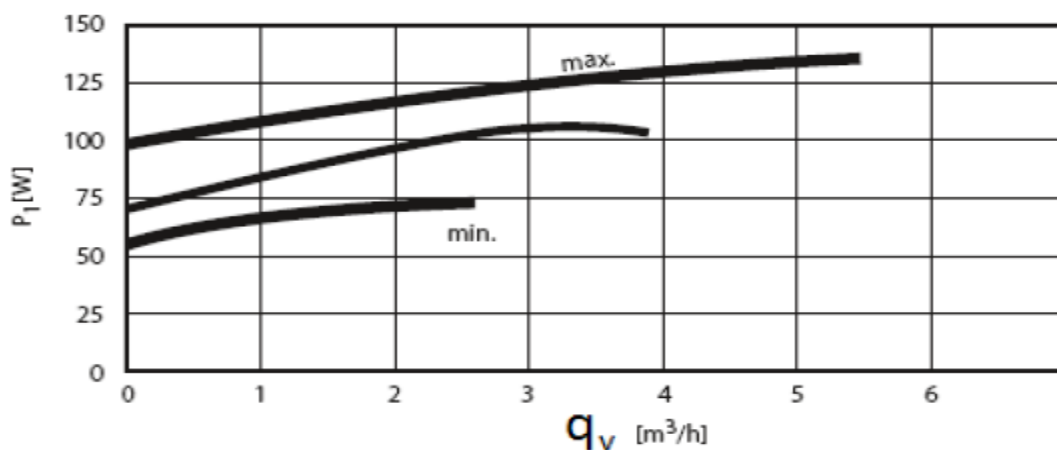


Figure I.16. Courbe puissance-débit

C) La Courbe de rendement: les courbe de rendement $\eta = F(qV)$: montent d'abord jusqu'au sommet η_{max} , qui correspond aux conditions optimales de fonctionnement et rendement, en suite d'une façon moins marquées dans les pompes à faible vitesse spécifique, et d'une façon plus marquée dans les pompes à vitesse spécifique élevée.

- Elle montre l'efficacité de la pompe

- Elle se définit comme étant le rapport entre la puissance utile et la puissance absorbée par l'arbre.

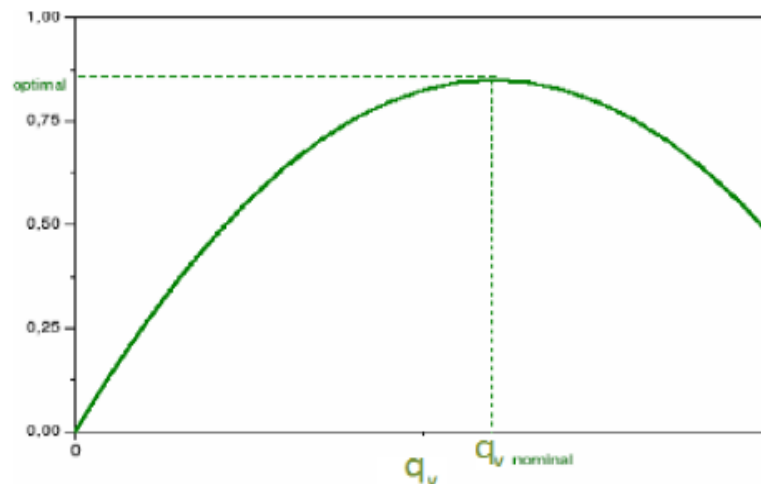


Figure I. 17. Courbe rendement-débit.

I.6.Installation d'une pompe centrifuge sur un réseau hydraulique

Considérons une pompe aspirant dans un réservoir et refoulant dans un autre réservoir, à un niveau plus élevé que le premier, ainsi que cela est représenté sur la figure (I.19). La hauteur demandée par le circuit comprend deux termes

- le premier terme correspond à la hauteur d'élévation géométrique du liquide H_g (en m) ;
- le second terme correspond aux pertes de charge dans les tuyauteries.

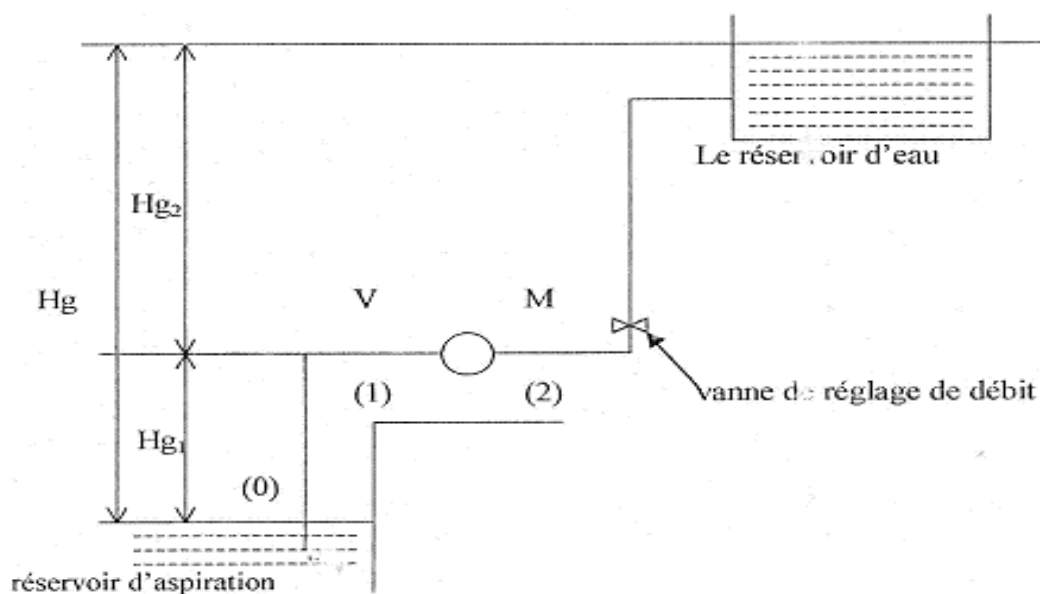


Figure I. 18. Installation d'une pompe centrifuge sur un réseau hydraulique.

Hg : hauteur géométrie d'élévation.

Hg1 : hauteur géométrie à l'aspiration.

Hg2 : hauteur géométrie au refoulement.

M : manomètre sert à mesurer la pression du liquide à la sortie de la pompe.

V : vacuomètre, sert à mesurer la pression du liquide à l'entrée de la pompe.

Lorsque une pompe alimente un réseau hydraulique, le débit qui la traverse est le même que celui qui entre dans le réseau et l'énergie fournie par la pompe (ou hauteur) d'eau est égale à celle consommée par le réseau.

A) Calcul des paramètres de la pompe :

a- débit : d'après les considérations précédentes, nous avons :

$$Q = Q_{\text{cond}} = Q_P \dots\dots (I.10)$$

b- la hauteur manométrique de la pompe : La hauteur créée par la pompe est obtenue par application de l'équation de Bernoulli entre l'entrée et la sortie, ce qui se traduit par :

$$H_P = H_{MT} = P_M - P_v / \rho g \dots\dots (I.11)$$

avec :

P_M : Pression à la sortie donnée par le manomètre

P_v : pression d'aspiration à l'entrée de la pompe mesurée par le vacuomètre.

B) Calcul des paramètres de la conduite d'aspiration :

L'équation de Bernoulli entre la surface libre du réservoir d'aspiration et l'entrée de la pompe donne :

$$H_1 = p_v / \rho g = H_{g1} + (v_1^2 / 2g) + \sum h'_{1\dots\dots} (I.12)$$

H1 : hauteur de charge de la conduite d'aspiration

Pv : pression d'aspiration à l'entrée de la pompe mesurée par le vacuomètre ;

V1 : vitesse d'écoulement à l'entrée de la pompe ;

$\sum h'_1$: Somme des pertes de charge à l'aspiration.

Cette équation permet la détermination des paramètres de la Conduite d'aspiration qui sont la hauteur géométrique et la vitesse d'écoulement (**Hg1** et **V1**).

C) Calcul des paramètres de la conduite de refoulement :

L'équation de Bernoulli appliquée à la sortie de la pompe et la surface libre du réservoir de refoulement aboutit à :

$$H_2 = p_M / \rho g = H_{g2} + (v_2^2 / 2g) + \sum h'_{2} \dots (I.13)$$

Avec :

PM : Pression à la sortie donnée par le manomètre ;

V2 : la vitesse d'écoulement à la sortie de la pompe ;

$\sum h'_2$: Somme des pertes de charge au refoulement.

En combinant les expressions précédentes, On obtient :

$$H_P = H_g + \sum h' \dots (I.14)$$

Avec :

Hg : hauteur géométrique totale ;

$\sum h'$: Les pertes de charge totale ;

HP : la hauteur de charge créée par la pompe.

$\sum h'$: Sont fonctions de la vitesse dans la conduite ou du débit

$$\sum h' = (\sum_{i=1}^n \xi_i + \lambda * l/d) * v^2 / 2g = KQ^2 \dots (I.15)$$

Avec :

ξ_i : Somme des coefficients des pertes de charge singulières de différentes singularités;

l : longueur de la conduite ;

λ : Coefficient des pertes de charge linéaires dans les conduites.

Dans le cas le plus habituel où l'écoulement dans les conduites est turbulent, la caractéristique résistante du circuit est représentée par. [13]

$$H_{cond} = H_g + KQ^2 \dots (I.16)$$

K : coefficient de la parabole caractéristique du circuit. En réalité, il n'est pas constant car en régime laminaire la perte de charge traduite en hauteur est linéaire en fonction de Q . En régime turbulent, il faudra estimer la rugosité des tubes du circuit et le nombre de Reynolds correspondant. [7]

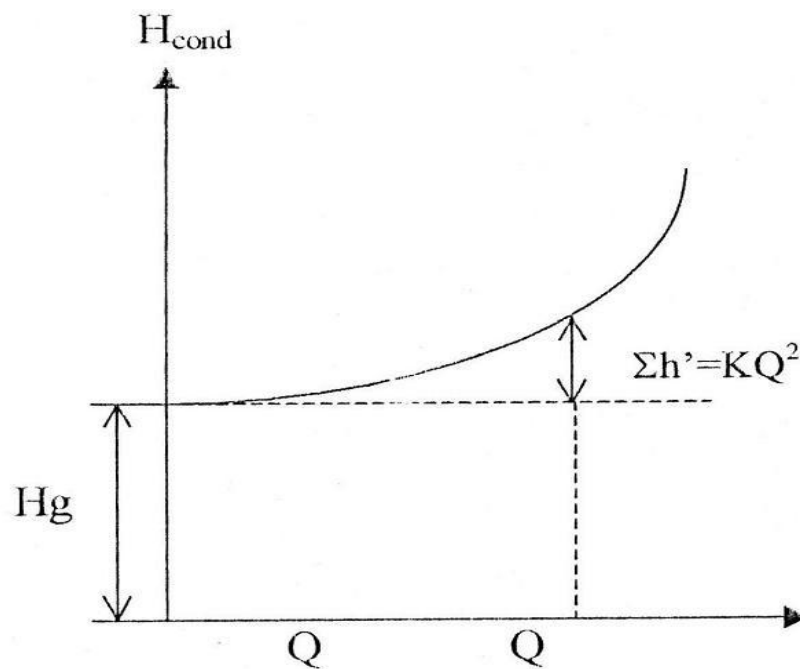


Figure I. 19. Courbe caractéristique de la conduite.

D) Point de fonctionnement :

Le point de fonctionnement de l'ensemble Circuit-pompe se trouve à l'intersection de la caractéristique de la pompe.

$H_p = f(Q)$ et de la caractéristique du circuit.

$H_c = f(Q)$ C'est à dire au point M de la figure (I.21). [13]

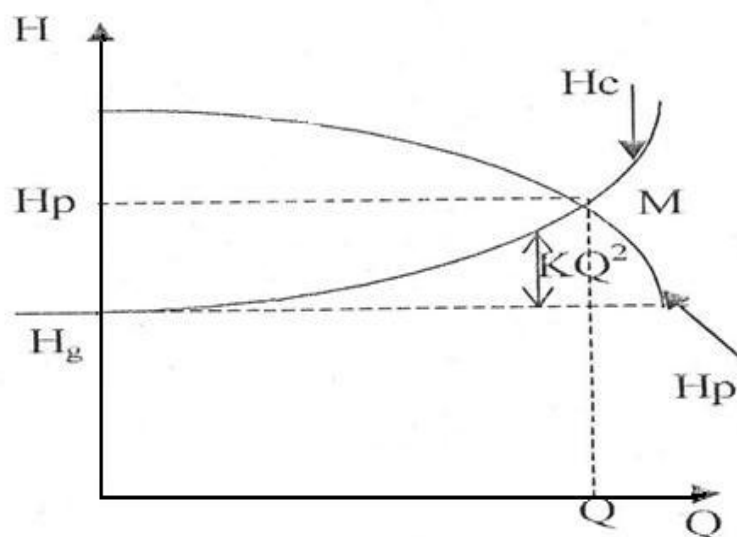


Figure I. 20. Point de fonctionnement ensemble circuit-pompe. [13]

Remarque : Lorsque la caractéristique de la pompe est toujours descendante, il n'y a qu'un seul point de fonctionnement possible. Ce point d'intersection détermine le point de régime de fonctionnement de la pompe sur la conduite.

Pour changer le point de fonctionnement du réseau (pompe -conduite) il faut changer la caractéristique de la conduite en fermant la vanne de refoulement ou de réglage. [13]

I.7. Avantages et inconvénient des pompes centrifuge

➤ **Avantage:**

- Elles sont moins encombrées par rapport aux pompes volumétrique
- Elles ont un meilleur rendement
- Elles sont adaptées à une très large gamme de liquides
- Elles sont simples
- Régularité dans le fonctionnement (absence de variation du débit et de pression)
- Aptitude au fonctionnement à grande vitesse, dans l'accouplement peut se faire directement avec des moteurs électriques ou diesel.
- En cas de colmatage partiel ou d'obstruction de la conduite de refoulement, la pompe centrifuge ne subit aucun dommage et l'installation ne risque pas d'éclater.

➤ **Inconvénients :**

- Faible débit
- Impossibilité de pomper des liquides trop visqueux
- Production d'une pression différentielle peu élevée (de 0,5 à 10 bar)
- Leurs amorçage ne se fait pas automatiquement
- A l'arrêt ces pompes ne s'opposent pas à l'écoulement du liquide par gravité

I.8. Les pompes volumétriques

Comprenant les pompes alternatives (à piston, à diaphragme ...) et les pompes rotatives (à vis, à engrenage, à palettes, hélicoïdales, péristaltiques ...). [2]

Conclusion

Dans ce chapitre on a montré les divers types de pompes et les diverses roues employées dans leur construction. Les divers paramètres et les caractéristiques permettent le calcul et le choix des pompes pour une exploitation rationnelle.