

Chapitre III : Théorie des machines hydrauliques et pneumatiques

Pompes hydrauliques

III.1 Définition de la pompe

Une pompe est une machine hydraulique qui aspire et refoule un liquide (l'eau, l'huile, l'essence,etc) d'un point à un endroit voulu.

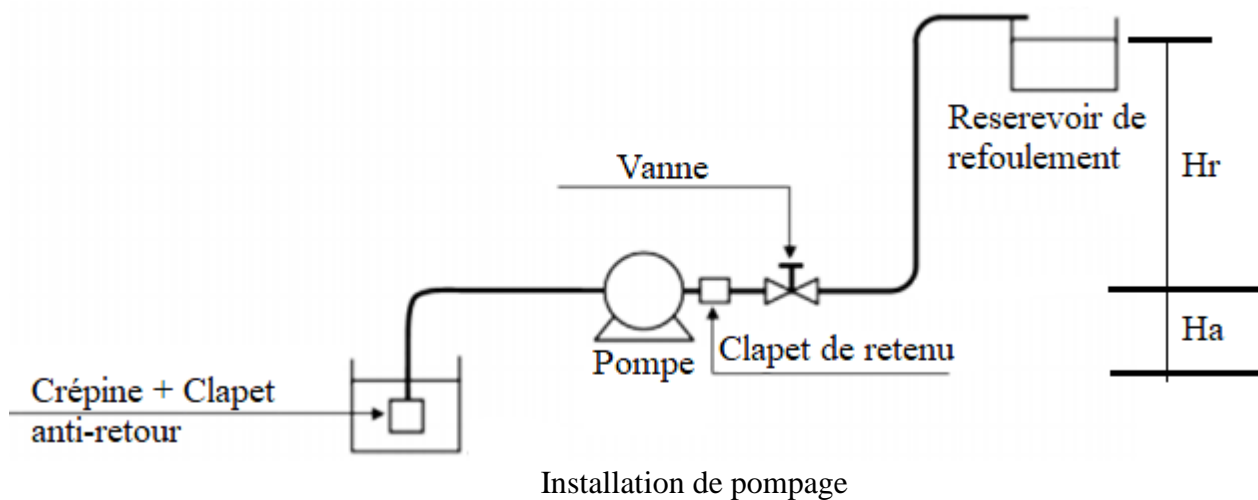
La pompe est destinée à élever la charge du liquide pompé. La charge ou l'énergie est la somme de trois catégories d'énergie :

- Energie cinétique $V^2/2g$
- Energie potentielle Z
- Energie de pression $P/\rho g$

L'énergie requise pour que la pompe fonctionne dépend des caractéristiques du fluide (ρ et μ) , des caractéristiques de l'installation (H), et les caractéristiques d'écoulement (V).

Une installation de pompage (voir figure) est constituée des principaux éléments suivants :

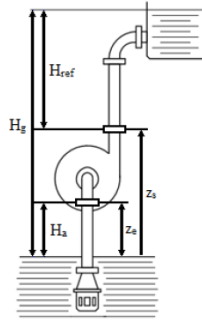
- Une pompe (ou plusieurs)
- Une conduite d'aspiration (D_a , L_a)
- Une conduite de refoulement (D_r , L_r)
- Un réservoir d'aspiration
- Un réservoir de refoulement
- Appareils de mesure (capteurs)
- Appareil de réglage de débit (Vanne)



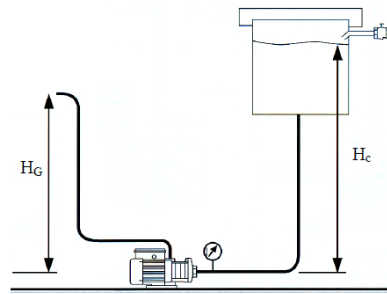
Il existe deux types de montage

- en aspiration
- en charge

Pompe en aspiration



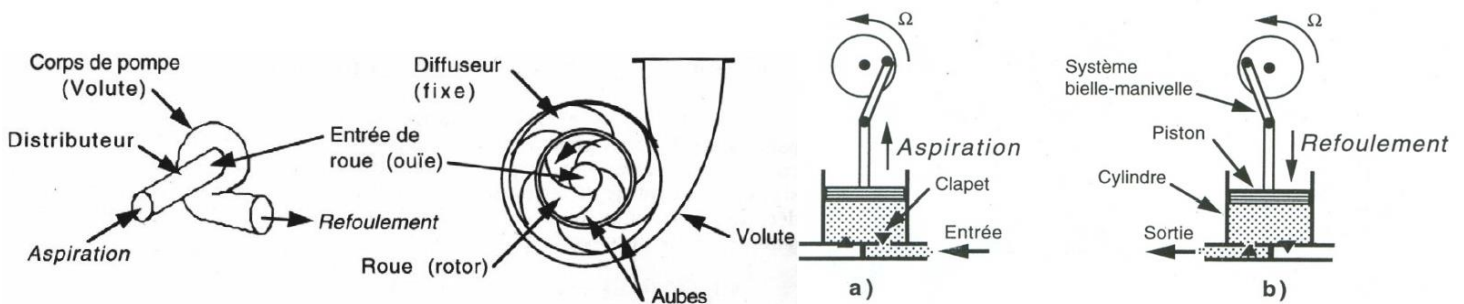
Pompe en charge



III.2 Classification des pompes

Il existe deux grands types de pompes :

- Les turbopompes, qui agissent sur l'énergie cinétique : Une turbopompe est une machine rotodynamique qui sert à élever, par l'effet de rotation de la roue à aubes, la pression du fluide qui la traverse
- Les pompes volumétriques : est une pompe dans laquelle une certaine quantité de fluide « emprisonnée » est forcée à se déplacer jusqu'à l'orifice de sortie



Turbopompe

Pompe à piston

III.3 Principe de fonctionnement des Turbopompes

Le principe de fonctionnement repose sur la variation de vitesse de l'eau pompée. Pratiquement, leur fonctionnement se résume en trois étapes :

- **L'aspiration** : assurée et facilitée par le distributeur ; la vitesse du fluide entrant augmente alors que la pression diminue
- **L'accélération** : assurée par le rotor ; la rotation de la roue augmente la vitesse du liquide et les forces centrifuges augmentent la pression.
- **Le refoulement** : assuré par le diffuseur, la vitesse diminue et la pression augmente. L'énergie cinétique est donc convertie en énergie de pression.



Rotor d'une pompe centrifuge

Les turbopompes sont actuellement parmi les plus employées des pompes. Les principales raisons de ce choix sont les suivantes ;

Ces appareils étant rotatifs et ne comportant aucune liaison articulée, leur entraînement par un moteur électrique, ne présente aucune difficulté. Selon le type du rotor et son mode d'action, on distingue dans la catégorie des turbopompes, les trois principaux types suivants :

- Les pompes centrifuges ;
- Les pompes hélices ou axiale ;
- Les pompes hélico-centrifuge ou semi-axiales.

Les pompes centrifuges sont les plus utilisées et elles couvrent 80% des pompes utilisées et présentent les avantages suivants :

- Machine de construction simple et nécessitant peu d'entretien
- Prix d'achat modéré, coût de maintenance faible
- Bon rendement (70% à 80%)
- Adaptées à toute sorte de liquide

III.4 Caractéristiques importantes de la pompe

1. Vitesse de rotation N (tr/min)

Est le nombre de tours qu'effectue la turbomachine par unité de temps. Elle est définie en fonction de la vitesse angulaire ω (rd/s) : $N = 60\omega/2\pi$. Avec : ω est la vitesse angulaire (rd/s).

2. Débit d'une pompe Q

C'est le volume de liquide recueilli au refoulement de la pompe pendant l'unité de temps. Il s'exprime en (m³/h) ou en litres par seconde (l/s).

3. Hauteur nette d'élévation H ou Hauteur manométrique HMT

Énergie fournie par la pompe à l'unité de poids du fluide qui la traverse pour surmonter les pertes de charges. Elle dépend du débit, et est représentée par la courbe caractéristique de la pompe considérée $HMT = f(Q_v)$. Elle s'exprime en mètre (m)

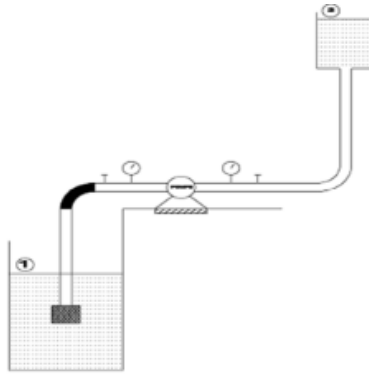
4. Puissance absorbée et utile de la pompe

- a) La **puissance absorbée** ou la **puissance consommée** est la puissance disponible au niveau de l'arbre d'entraînement de la roue de la pompe (exemple ; moteur électrique)
- b) La **puissance utile** ou la **puissance hydraulique** est la puissance transmise au fluide. Elle est définie par :

$$P_u = \rho g HMT Q \quad (\text{W})$$

II.5 Calcul de la HMT

Considérons l'installation de pompage ci-après



L'équation généralisée de Bernoulli entre les points 1 et 2 donne :

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + HMT = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + \Delta H_{asp} + \Delta H_{ref}$$

$$HMT = \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + (Z_2 - Z_1) + \Delta H_{asp} + \Delta H_{ref}$$

Pour le cas de cette installation $P_2 = P_1 = P_{atm} \Rightarrow P_2 - P_1 = 0$ d'où

$$HMT = (Z_2 - Z_1) + \Delta H_{asp} + \Delta H_{ref}$$

$$HMT = H_g + \Delta H$$

S'il existe une surpression p dans le réservoir supérieur par rapport au réservoir inférieur

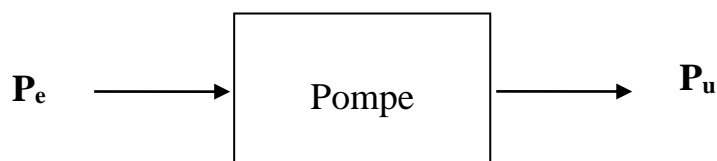
$$HMT = H_g + \Delta H + \Delta h \quad \Delta h = \frac{P_2 - P_1}{\rho g}$$

Tout le problème réside donc dans l'évaluation des pertes de charge.

II.6 Rendements de la pompe

Dues aux pertes qui se passent dans la pompe : Pertes hydrauliques, Pertes volumétriques, Pertes mécaniques.

Le rendement global s'écrit : $\eta_g = \eta_m \times \eta_v \times \eta_h$



Le rendement de la pompe ou rendement global est le rapport de la puissance fournie au fluide et de la puissance absorbée sur l'arbre moteur :

$$\eta_g = \frac{P_u}{P_e} = \frac{\rho H_m Q}{C_m \omega}$$

Ce rendement est donné dans les catalogues des fabricants, et peut être affecté par différentes pertes dans la pompe :

a/ **les pertes hydrauliques** : elles comprennent les pertes dans la roue et celles dans le diffuseur (ou plus généralement dans les parties fixes de la machine, telle que volute, etc.). Au régime normal, ce sont les seules pertes qui existent.

b/ **les pertes volumétriques** ou par fuite : ces pertes existent dans le joint extérieur de la roue et dans les jeux entre la roue et la volute. Si q le débit de fuite et Q le débit refoulé par la pompe, alors le débit absorbé par la pompe ou traversant la roue est :

$$Q_a = Q + q$$

S'il existe un débit de fuite q (le débit dans la roue doit être de $Q + q$). Le débit de fuite augmente avec la pression et diminue avec la viscosité.

c/ **les pertes mécaniques** : elles se produisent par frottement dans les presse-étoupes, dans les paliers et dans les roulements de la pompe.

On peut alors décomposer le rendement global en :

1.6.1 Rendement hydraulique : est défini comme le rapport de la puissance fournie au fluide et de la puissance de la pompe.

$$\eta_{hy} = \frac{P_u}{P_p} = \frac{\rho H_m Q}{\rho H_p Q} = \frac{H_m}{H_p} = \frac{H_p - \Delta H_p}{H_p} = 1 - \frac{\Delta H_p}{H_p}$$

Ce rendement caractérise les pertes de la charge internes à la pompe (les pertes dans les aubages).

1.6.2 Rendement volumétrique : est défini comme le rapport de la puissance de la pompe et de la puissance absorbée par la roue. Ce rendement caractérise les pertes par fuite.

$$\eta_v = \frac{P_p}{P_r} = \frac{\rho H_p Q}{\rho H_p (Q + q)} = \frac{Q_{rée}}{Q_{théo}}$$

1.6.3 Rendement mécanique : est défini comme le rapport de la puissance absorbée par la roue et de la puissance du moteur. Ce rendement caractérise les pertes par fuite.

$$\eta_{méc} = \frac{P_r}{P_e} = \frac{\rho H_p (Q + q)}{C_m \omega}$$

Le rendement global peut dès s'écrire $\eta_g = \eta_h \times \eta_v \times \eta_m$ avec un rendement caractéristique des performances internes à la pompe ($\eta_v \times \eta_m$), et un rendement lié à la partie externe à la pompe ($\eta_{méc}$). Pour des débits nuis, aucune puissance n'est communiquée au fluide ($P_u=0$) et pour un débit très important la puissance utile est nulle car les pertes de charge sont trop importantes. Finalement, la courbe de rendement a une allure en cloche. La pompe devra travailler évidemment dans des conditions pour les quelles le rendement est maximum, afin entre autre de baisser les coûts d'utilisation.

II.7 Courbe caractéristiques de la pompe et point de fonctionnement

Pour un circuit donné, la hauteur manométrique est :

La hauteur géométrique H_G est la différence $H_m = H_G + \Delta H$ verticale entre le niveau d'aspiration et le niveau supérieur où l'on propose de refouler le fluide.

$$\underline{H_G = H \text{ aspiration} + H \text{ refoulement}}$$

Avec ΔH ; la somme des pertes de charge régulières et singulières dans le circuit (aspiration et refoulement):

$$\Delta H = \left[\left(\lambda \frac{L}{D} + k \right) \cdot \frac{v^2}{2g} \right]_{asp} + \left[\left(\lambda \frac{L}{D} + k \right) \cdot \frac{v^2}{2g} \right]_{ref}$$

$$\Delta H = \left(\lambda_a \frac{L_a}{D_a} + k_a \right) \cdot \frac{v_a^2}{2g} + \left(\lambda_r \frac{L_r}{D_r} + k_r \right) \cdot \frac{v_r^2}{2g}$$

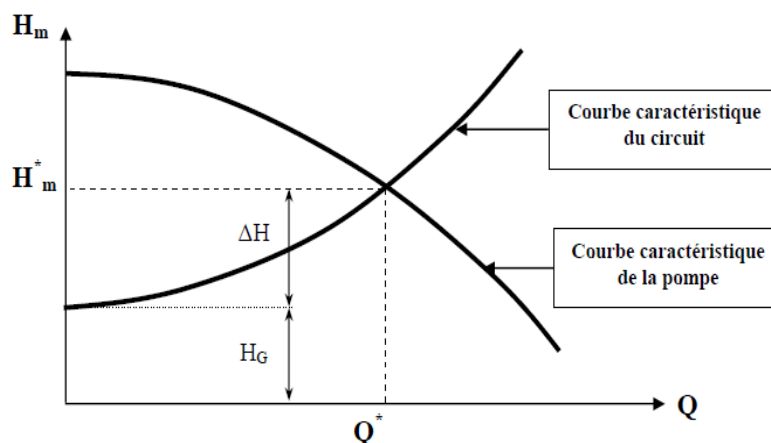
$$\text{Or : } Q = v_a \cdot S_a = v_r \cdot S_r \text{ et } S = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

$$\Delta H = \frac{8}{\pi^2 \cdot g} \left[\left(\lambda_a \frac{L_a}{D_a} + k_a \right) \cdot \frac{1}{D_a^4} + \left(\lambda_r \frac{L_r}{D_r} + k_r \right) \cdot \frac{1}{D_r^4} \right] \cdot Q^2$$

$$A = \frac{8}{\pi^2 \cdot g} \left[\left(\lambda_a \frac{L_a}{D_a} + k_a \right) \cdot \frac{1}{D_a^4} + \left(\lambda_r \frac{L_r}{D_r} + k_r \right) \cdot \frac{1}{D_r^4} \right]$$

$$H_m = H_G + A \cdot Q^2$$

Avec A est une constante pour un circuit donné (caractéristique d'un circuit). Le point de fonctionnement est l'intersection de la courbe caractéristique du circuit avec la courbe caractéristique de la pompe



III.8 Cavitation (NSPH) (Net Positive Suction Head) ou Hauteur de charge nette absolue

Formations de cavités remplies de vapeur ou gaz dans un liquide en mouvement. Ce mot décrit un phénomène complexe pouvant exister dans une installation de pompage. quand un liquide coule dans un tuyau d'aspiration et qu'il entre dans l'oeil de l'impulseur, sa vitesse augmente ce qui amène une réduction de pression. Si cette pression descend en dessous de la tension de vapeur correspondant à la température du liquide, celui-ci va se vaporiser et le courant qui s'écoule consistera à la fois de liquides et de poches de vapeur.

La cavitation est un phénomène à éviter absolument, car il entraîne de graves conséquences :

- ✓ Chute brutale du rendement ;
- ✓ Des vibrations violentes dues à la résorption des bulles, accompagnées d'un bruit intense ;
- ✓ Une érosion des surfaces solides due à la fois aux vibrations et, sans doute, à une attaque chimique par l'oxygène qui existe dans les bulles.



Figure: Dégâts par cavitation

La hauteur nette positive d'aspiration (NPSH), qui est la Hauteur requise à l'entrée de la pompe pour empêcher le liquide de bouillir (caviter).

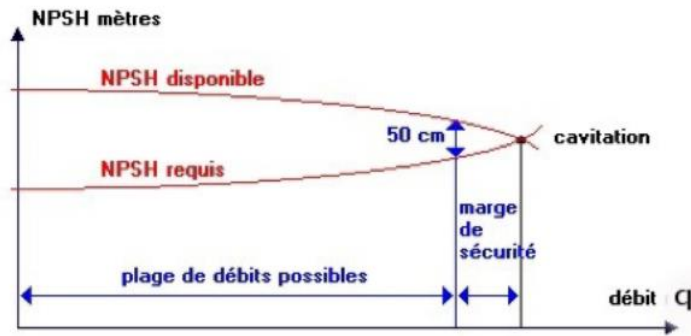
Le phénomène de cavitation peut se produire avant que la pression à l'aspiration arrive à la pression de vapeur du liquide. Pour cela le fabricant des pompes propose une autre caractéristique appelée NPSH exprimée en mètre et qui est donnée aussi en fonction de débit. NPSH : Net Positive Suction Head ; (charge nette à l'aspiration) (NPSH) requis : fournit par le fabricant

$$(NPSH)_{disp} = \frac{P_{entrée} - P_v}{\rho \cdot g}$$

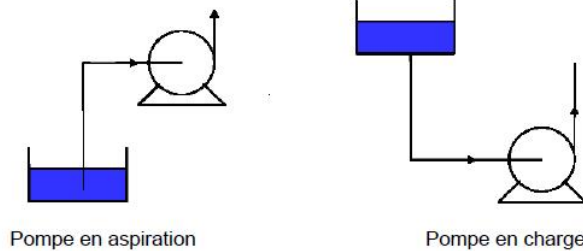
P_v : la pression de vapeur d'eau

Pour un bon fonctionnement d'une pompe à l'aspiration, il faut que :

$$(NPSH)_{disp} > (NPSH)_{requis}$$



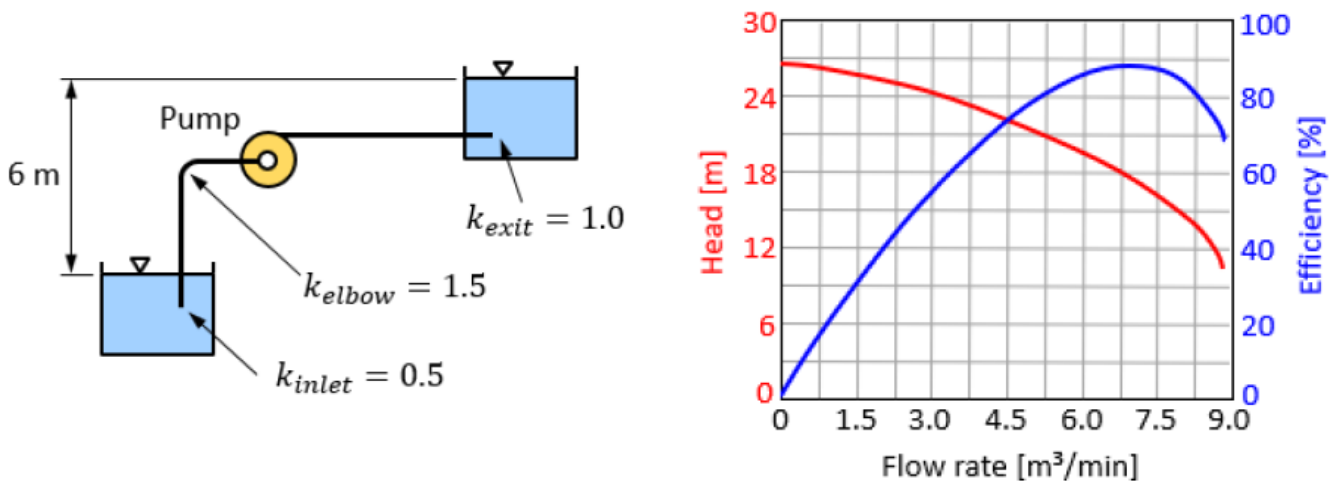
Pour éviter la cavitation, si possible, préférer les montages de pompes en charge, diminuer les pertes de charge du circuit d'aspiration.



III.9 Applications

Application 1

Une pompe centrifuge pompe de l'eau d'un réservoir à un autre. Le diamètre de la conduite et sa longueur totale sont 15 cm et 60 m respectivement. Les coefficients de perte de charge singulière sont montrés sur la figure et le coefficient de perte de charge linéaire est égal à 0.02. La courbe caractéristique de la pompe est montrée sur la figure.



1. Déterminer l'expression de l'équation caractéristique de circuit qui s'écrit sous la forme : $HMT = H_g + A Q^2$ en déterminant H_g et A avec Q en m^3/min
2. Tracer les deux courbes du HMT du circuit et de la pompe sur le même graphique
3. Déterminer :
 - le point de fonctionnement et le débit optimal pompé
 - La HMT de la pompe
4. Déterminer la puissance électrique fournie par le moteur, si son rendement est de 91 %.

Application 2

Une pompe centrifuge aspire de l'eau à une hauteur géométrique d'aspiration H_{ga} et le refoule dans un réservoir à une hauteur géométrique de refoulement H_{gr} , comme l'indique le schéma ci-dessous.

La conduite d'aspiration de longueur L_a et celle de refoulement de longueur L_r ont le même diamètre D . Leur coefficient des pertes de charge régulières est λ et le coefficient des pertes de charge singulières à l'aspiration K_a est et celui au refoulement est K_r .

Les surfaces libres des réservoirs sont à la pression atmosphérique : $P_{atm} = 1 \text{ atm}$. La pompe réalisée par le constructeur, possède les caractéristiques définie par la hauteur manométrique: $HMT = -400000 Q^2 + 60$

On donne la masse volumique de l'eau $\rho = 10^3 \text{ kg/m}^3$ et l'accélération de pesanteur $g = 10 \text{ m/s}^2$.

- Déterminer l'expression de l'équation caractéristique de circuit qui s'écrit sous la forme: $HMT = H_g + A Q^2$.
- On prendra pour la suite $A = 225000$. Calculer les hauteurs manométriques du circuit et de la pompe pour les différents débits du tableau suivant :

Q (l/s)	0	2	4	6	7	8	9	10	11
HMT (mCE) circuit									
HMT (mCE) Pompe du constructeur									

- Tracer les deux courbes du HMT du circuit et de la pompe, déterminer :

- le point de fonctionnement et le débit optimal pompé
- La HMT de la pompe

- Sachant que la pression absolue de vapeur de l'eau est $p_v = 0,024 \text{ bar}$, vérifier la condition de non cavitation pour ce circuit. On donne : $L_a = 20 \text{ m}$, $H_{ga} = 4 \text{ m}$, $H_{gr} = 16 \text{ m}$, $D = 80 \text{ mm}$, $K_a = 3,25$, $\lambda = 0,021$, $NPSH_{requis} = 2.5 \text{ m}$

