

Chapitre 1:

Les circuits de transport de liquide

1/ Généralités sur l'hydraulique :

1-1/ Définition de l'hydraulique :

Hydraulique a pour racine le mot grec 'hudos' qui signifie l'eau (ou liquide quelconque). L'hydraulique est la science qui étudie le comportement du fluide.

Dans un système industriel, l'hydraulique se traduit par la transmission de l'énergie à distance par l'intermédiaire d'un liquide. Il en résulte un mouvement :

- Rectiligne avec travail dans un seul sens : vérin simple effet.
- Rectiligne avec travail dans les deux sens : vérin double effet.
- Circulaire avec travail dans les deux sens: moteur hydraulique ou vérin rotatif.

1-2/ Les avantages de l'hydraulique :

- La simplicité des installations.
- La souplesse d'exploitation.
- Une très large gamme de vitesses de translation ou de rotation obtenues de façon continue, en contrôlant le débit.
- Une très large gamme de forces et de couples, en contrôlant la pression.
- Etant incompressible, le fluide hydraulique permet :
 - * Une bonne régulation de vitesse.
 - * Une bonne précision d'arrêt.
- Son pouvoir lubrifiant permet une excellente lubrification des appareils.
- Une bonne réduction de l'usure exprimée par une assez longue durée de vie des appareils.
- De très bons rendements.
- Un fonctionnement assez silencieux pour les puissances mises en œuvre.
- La réduction de l'encombrement des appareils.
- La possibilité de stocker de l'énergie qui pourra intervenir dans le cas d'une panne au niveau de la pompe.
- La transmission de l'énergie à des distances assez longues.
- L'utilisation de l'énergie hydraulique dans des engins mobiles.

1-3/ Les inconvénients de l'hydraulique :

- Les risques d'accidents dus à l'utilisation de pressions élevées allant de 50 à 700 bars.
- Les fuites qui entraînent une diminution du rendement.
- Les pertes de charges dues à la circulation de l'huile dans les tuyauteries.
- Les risques d'incendie dus à l'utilisation des huiles minérales inflammables.
- Le haut prix des composants.
- La maintenance des installations hydrauliques est coûteuse comparée à d'autres systèmes.

1-4/ Les domaines d'utilisation :

- **Domaine de l'agriculture :** les tracteurs, les ramasseuses presses à balle ronde...
- **Domaine des travaux publics et de génie civil :** les chenillards, les tractopelles...
- **Domaine de la manutention :** les chariots élévateur...
- **Domaine de l'industrie automobile :** systèmes de freinage, direction assistée...

- **Domaine de l'aéronautique** : commande du train d'atterrissage des avions...
- **Domaine de l'industrie** : les machines-outils, les robots ...

2/-Description générale :

Un circuit de transport de liquide se compose essentiellement (fig.1):

- D'un réservoir source de liquide (puits, fleuve, réservoir, ...).
- D'une pompe (*non volumétrique* ou *hydrodynamique*).
- D'un réservoir de stockage (citerne, installation d'irrigation, château d'eau, ...).
- D'une tuyauterie qui relie les différents constituants.

Il peut comprendre aussi :

- Une vanne de réglage de débit placée sur la conduite de refoulement.
- Une crépine + un clapet de pied placés à l'extrémité basse de la conduite d'aspiration.
- Un clapet de retenu placé à la sortie de la pompe pour empêcher le retour du liquide, il est utilisé pour des grandes hauteurs de refoulement.

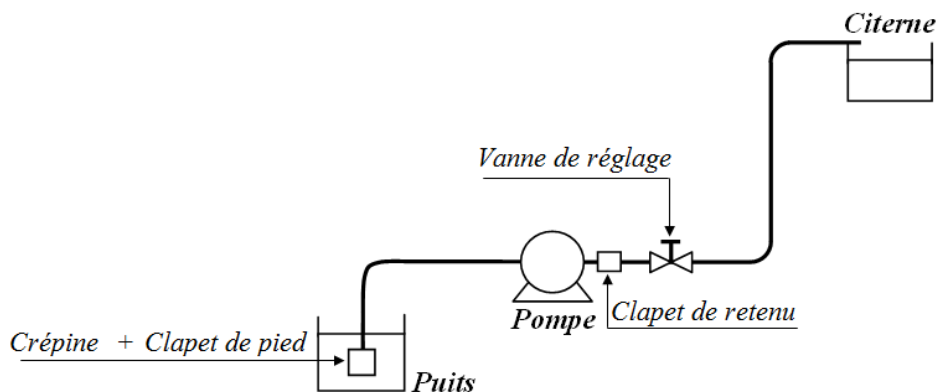
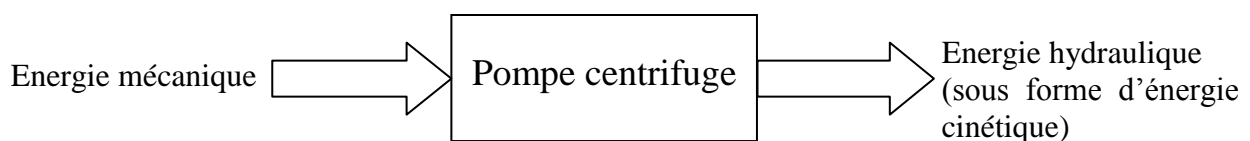


Figure 1: Composition d'un circuit de transport des liquides

3/- Les pompes centrifuges :



Les pompes centrifuges appartiennent à la famille des pompes non volumétriques, elles transforment l'énergie mécanique développée par un moteur en énergie hydraulique (sous forme d'énergie cinétique). Ces pompes permettent de déplacer les liquides d'un lieu à un autre.

Les pompes centrifuges sont utilisées dans plusieurs domaines tels que l'agriculture (les stations de pompage, le matériel de traitement, ...), l'industrie pétrolière (les stations de raffinage, les stations d'alimentation en GPL, ...), la production et l'alimentation en eau potable (les stations de dessalement, les châteaux d'eau), les stations d'épurations, la production de l'énergie électrique (les installations de refroidissement des centrales thermiques, ...), etc...

3-1/ Composition d'une pompe centrifuge :

Une pompe centrifuge est constituée par:

- Une roue à aubes tournante autour de son axe, appelée impulseur.

Elaboré par : Chouchéne Mohamed

- Un distributeur dans l'axe de la roue.
- Un collecteur de section croissante, en forme de spirale appelée volute.

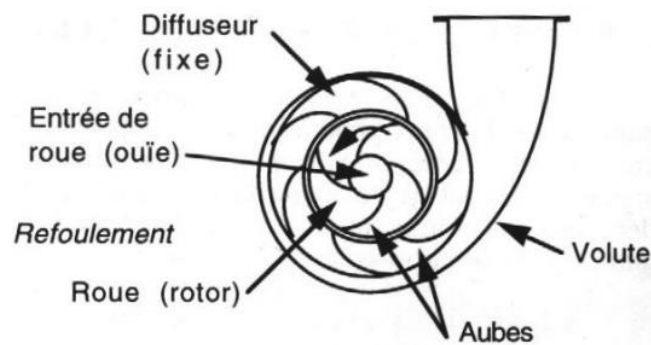


Figure 2: Composition d'une pompe centrifuge

L'étanchéité de la pompe est assurée en générale par un presse-étoupe, ou une garniture mécanique, placé entre la volute et l'arbre d'entraînement.

3-2/ Principe de fonctionnement d'une pompe centrifuge :

Le fluide arrivant par l'ouïe est dirigé vers la roue en rotation qui sous l'effet de la force centrifuge lui communique de l'énergie cinétique. La rotation augmente la vitesse du fluide tandis que la force centrifuge qui le comprime sur la périphérie (la volute) augmente sa pression. Dans l'élargissement en sortie, qui se comporte comme un divergent, le liquide perd de la vitesse au profit de l'accroissement de pression : l'énergie cinétique est convertie en énergie de pression.

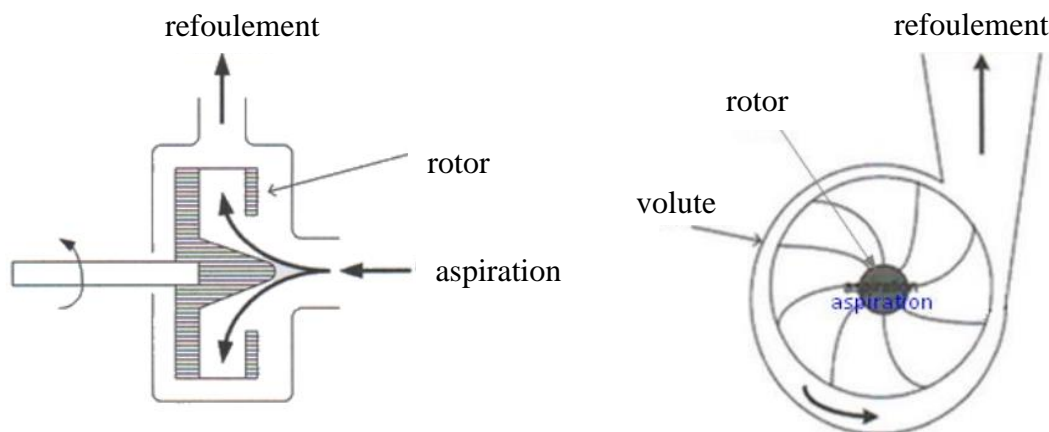


Figure 3: Principe de fonctionnement d'une pompe centrifuge

3-3/ Les différents types des pompes centrifuges :

On distingue deux types de pompes centrifuges :

- Les pompes **monocellulaires** équipées d'une seule roue.
- Les pompes **multicellulaires** équipées de plusieurs roues : pour ce type de pompes, les roues sont montées sur l'arbre d'entraînement et raccordées de sorte que le collecteur de la première cellule conduit le liquide dans l'ouïe de la cellule suivante. En arrivant à la roue suivante, le liquide est chargé avec la pression développée dans la cellule précédente. A la sortie de la dernière roue, la pression du liquide sera égale à la somme des différentes pressions développées au niveau des différentes cellules de la pompe.

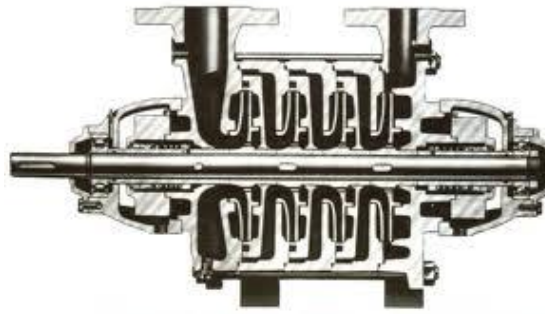


Figure 4: Pompe centrifuge multicellulaire

3-4/ Avantages et inconvénients des pompes centrifuges :

Pour les avantages, ce sont des machines de construction simple, sans clapet ou soupape, d'utilisation facile et peu coûteuses.

- A caractéristiques égales, elles sont plus compactes que les machines volumétriques.
- Leur rendement est souvent meilleur que celui des « volumétriques ».
- Elles sont adaptées à une très large gamme de liquides.
- Leur débit est régulier et le fonctionnement est silencieux.
- 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. La pompe se comporte alors comme un agitateur...

Du côté des inconvénients :

- Impossibilité de pomper des liquides trop visqueux.
- Production d'une pression différentielle peu élevée (de 0,5 à 10 bar).
- Elles ne sont pas auto-amorçantes.
- A l'arrêt ces pompes ne s'opposent pas à l'écoulement du liquide par gravité (donc il faut prévoir des vannes ou des clapets).

3-5/ Amorçage des pompes centrifuges :

Les pompes centrifuges ne peuvent pas s'amorcer seules. L'air contenu nécessite d'être préalablement chassé. On peut utiliser un réservoir annexe placé en charge sur la pompe pour réaliser cet amorçage par gravité.

Pour éviter de désamorcer la pompe à chaque redémarrage il peut être intéressant d'utiliser un clapet anti-retour au pied de la canalisation d'aspiration.

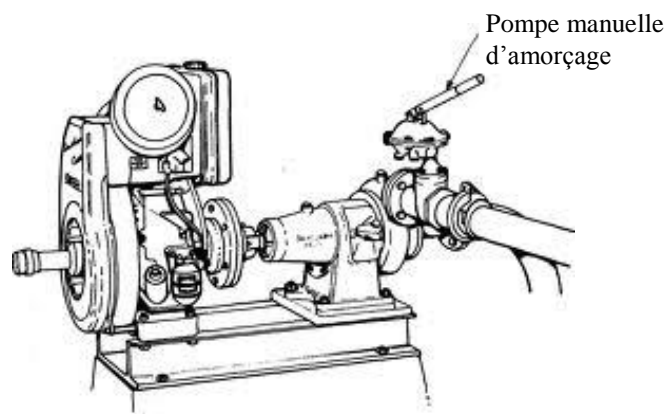


Figure 5: Amorçage d'une pompe centrifuge par une pompe manuelle

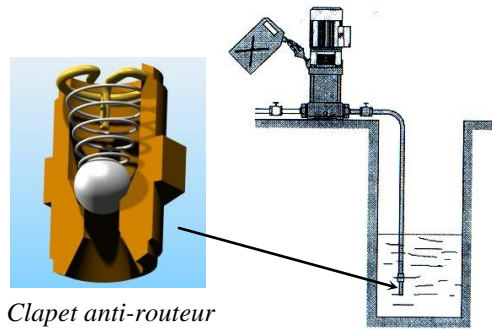


Figure 6: Amorçage manuel d'une pompe centrifuge

3-6/ Installation d'une pompe centrifuge :

a/- Pompe immergée :

Pour ce type de pompes on n'a pas de problème d'amorçage. Les pompes immergées sont de technologie particulière, on distingue de cas :

<p>a- La pompe immergée et le moteur situé au-dessus du niveau de l'eau</p>	<p>b- La pompe et le moteur sont immergés (pour un tel type de montage, il faut faire attention à l'étanchéité du moteur électrique)</p>

Figure 7: Pompe immergée

b/- Pompe en charge : (la pompe est située au-dessous du réservoir)

<p>Pour ce type de pompe on n'a pas de problème d'amorçage mais il faut prévoir une vanne d'isolation pour éviter la vidange du réservoir lors de l'entretien de la pompe.</p> <p>NB : il ne faut pas mettre la pompe en marche à vanne fermée.</p>	
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

Figure 8: Pompe en charge

c/- Pompe en aspiration ou en dépression : (la pompe est située au-dessus du réservoir)

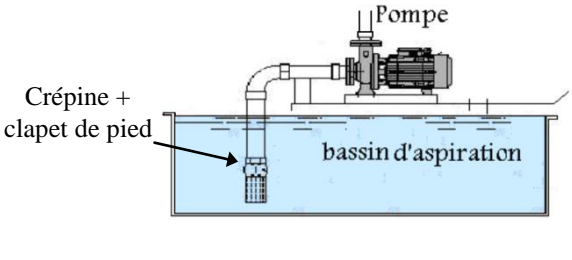
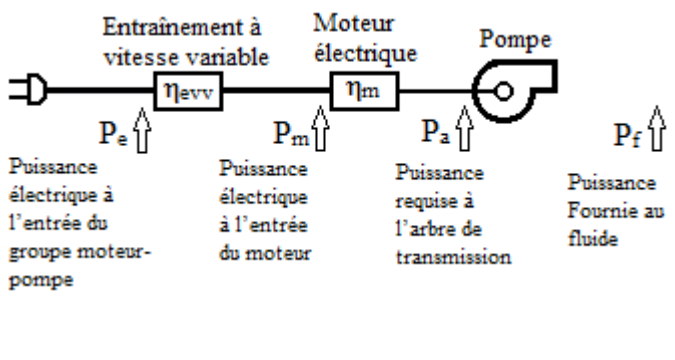
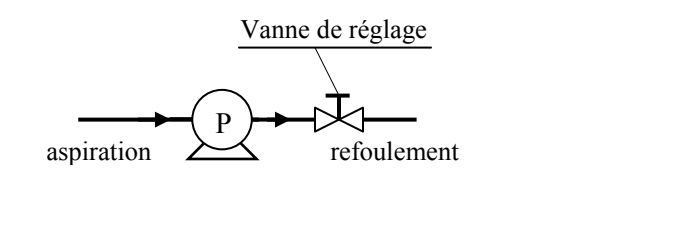
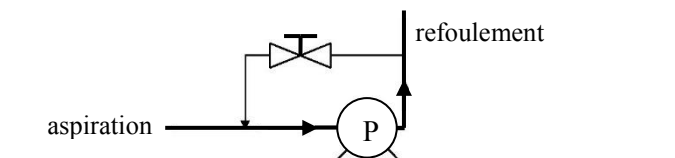
<p>Pour ce type de pompe on doit placer un clapet de pied au niveau de la crépine pour permettre l'amorçage de la pompe lors de la première mise en marche.</p> <p>NB : La hauteur d'aspiration h_a est limitée. En pratique, pour l'eau à pression atmosphérique, $h_{amax} < 8m$.</p>	
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------

Figure 9: Pompe en aspiration

3-7/ Réglage du débit :

- Trois moyens sont possibles :

<p>a- Variation de la vitesse de rotation de la pompe en variant la vitesse de rotation du moteur électrique par un dispositif électronique (variateur de vitesse électrique). C'est la méthode la plus employée. Cependant, la régulation électrique du moteur via un variateur de fréquences engendre une consommation d'énergie supplémentaire dont il faut tenir compte.</p>	
<p>b- Vanne de réglage située sur la canalisation de refoulement de la pompe pour éviter le risque de cavitation : suivant son degré d'ouverture, la perte de charge du réseau va augmenter ou diminuer ce qui va entraîner la variation du point de fonctionnement.</p>	
<p>c- Réglage en « canard » avec renvoi à l'aspiration d'une partie du débit.</p>	

3-8/ Positions de montage :

On peut monter l'électropompe dans n'importe quelle posions, mais jamais avec moteur vers le bas.

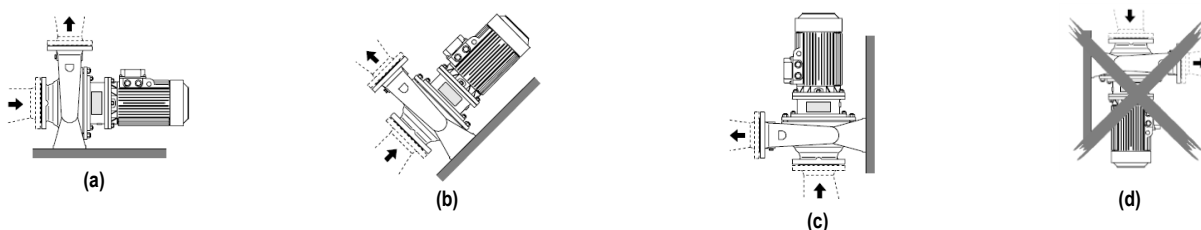


Figure 10: Positions de montage

4/- Les caractéristiques des pompes centrifuges :

4-1/ La hauteur manométrique totale H_{mt} :

La hauteur manométrique permet de choisir la pompe pour une courbe de réseau imposée.

a/- La hauteur géométrique : (H_G)

La hauteur géométrique H_G est la somme verticale de la hauteur de refoulement et la hauteur d'aspiration.

$$H_G = H_{\text{refoulement}} + H_{\text{aspiration}}$$

b/- La pression utile : (p_u)

Elle dépend du type d'utilisation au point de puisage.

On définit alors la hauteur utile H_u exprimée en [mCE]

$$\text{avec : } \begin{cases} H_u = \frac{P_u}{\rho \cdot g} \\ p_u : \text{pression utile exprimée en [Pa].} \end{cases}$$

c/- La pression de charge : (p_c)

Lorsqu'une réserve de fluide fournit une pression de charge, elle correspond tout simplement à la hauteur du niveau de ce fluide dans le réservoir source et le point d'aspiration.

$$H_c = \frac{P_c}{\rho \cdot g}$$

d/- Expression de la hauteur manométrique totale : H_{mt}

La pompe doit vaincre dans le circuit :

- La variation de hauteur H_G .
- La pression utile p_u au point de puisage.
- Les pertes de charge dans la tuyauterie ΔH .

NB : Les deux premiers facteurs sont généralement constants.

On définit la Hauteur *manométrique totale* H_{mt} par :

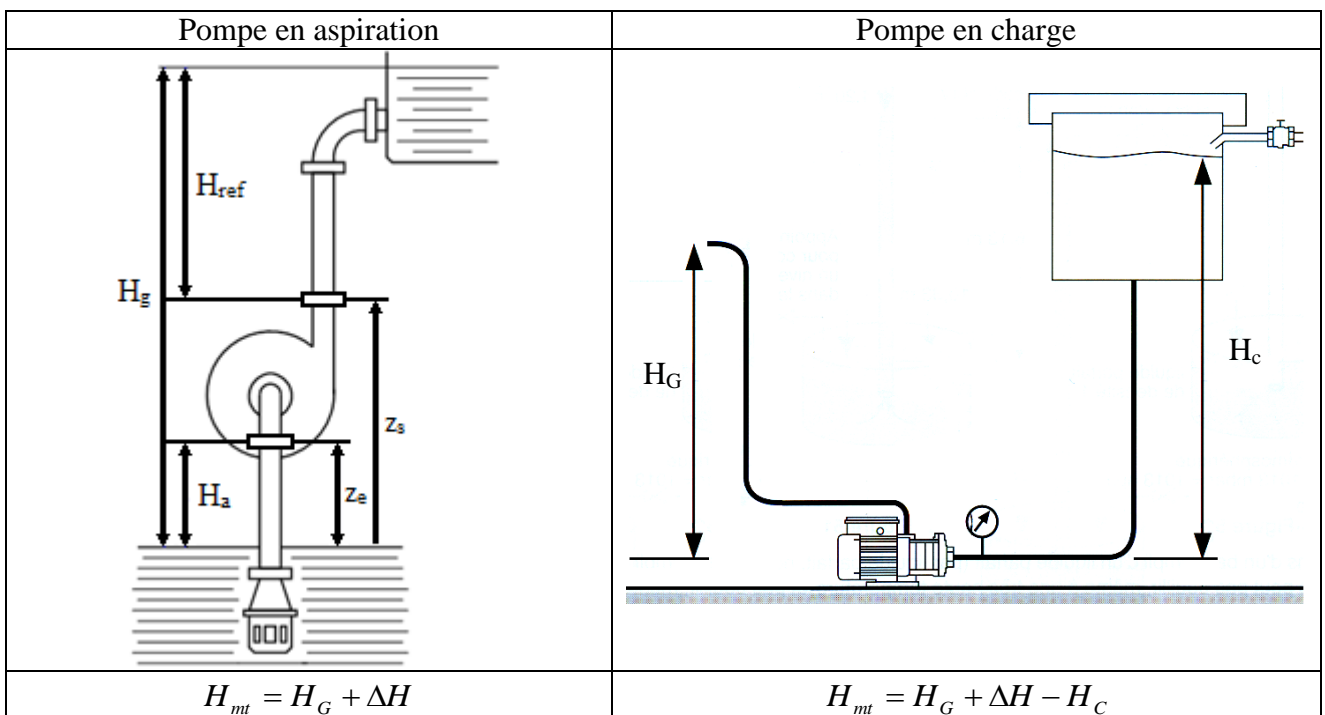


Figure 11: La hauteur manométrique totale

Remarque :

$$H_{mt} = \Delta H_{pompe} = \frac{\Delta p_{pompe}}{\rho \cdot g} \quad , \text{ en mCE (mètres colonne d'eau)}$$

Où Δp_{pompe} est la pression différentielle de la pompe.

4-2/ La puissance consommée par le moteur : [kW]

La puissance consommée pour un débit donné permet de connaître le coût de fonctionnement de la pompe.

$$P_m = C_m \cdot w_m = \frac{P_{hyd}}{\eta_g} \quad \text{Avec : } P_{hyd} = \Delta p_{pompe} \cdot q_v = \rho \cdot g \cdot H_{mt} \cdot q_v = \rho \cdot E \cdot q_v$$

Avec $E = g \cdot H_{mt}$: énergie fournie au fluide par unité de masse.

4-3/ Le rendement de la pompe:

On a : $\eta_g = \frac{P_{hyd}}{P_m}$, en remplaçant P_{hyd} par son expression, on trouve $\eta_g = \frac{\rho \cdot g \cdot H_{mt} \cdot q_v}{P_m}$

4-4/ Le N.P.S.H.: Net Positive Suction Head (hauteur de charge nette d'aspiration)

Le *N.P.S.H.* est une notion qui permet de contrôler par le calcul, la pression à l'entrée d'une pompe et de vérifier qu'elle est suffisante en tenant compte de la chute de pression complémentaire entre la bride d'aspiration et la pompe.

a/- Hauteur maximale d'aspiration : $h_{a \max}$

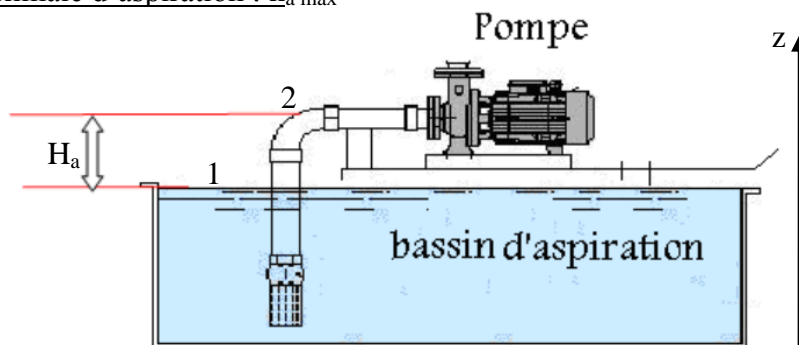


Figure 12: hauteur d'aspiration

Appliquons le théorème de Bernoulli entre (1) et (2) (**Figure 11**) pour déterminer la hauteur maximale d'aspiration :

$$z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho \cdot g} = z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \Delta H_{1,2} \quad \text{Avec : } \begin{cases} z_2 - z_1 = h_a \\ v_1 = 0 \\ p_1 = p_{atm} \\ \Delta H_{1,2} = \Delta H_{asp} \end{cases}$$

$$\Rightarrow h_a = \frac{p_{atm}}{\rho \cdot g} - \left(\frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta H_{asp} \right)$$

- La hauteur d'aspiration est maximale lorsque $\left(\frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta H_{asp} \right) \rightarrow 0 \Rightarrow h_{a \max} = \frac{p_{atm}}{\rho \cdot g}$

* **Exemple :** Pour l'eau on a :

$$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3 \text{ et on a } g = 9.81 \text{ m/s}^2 \text{ et } p_{atm} = 1.013 \text{ bar} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$\Rightarrow h_{a \max} \approx 10.33 \text{ m}$$

- Donc l'aspiration de l'eau par une pompe ne sera possible à 20°C qu'à une profondeur maximale de

10.33 m. Il s'agit d'une *limite physique* qui ne dépend absolument pas de la qualité de la pompe.

*** Remarque :** Dans la pratique le terme $\left(\frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta H_{asp} \right)$ ne peut pas tendre vers 0.

En effet, lorsque la pression d'aspiration se rapproche de la pression du vide absolu ($p_2 / \rho \cdot g \rightarrow 0$), des cavités remplies de vapeur se forment dans le liquide, il se produit un phénomène appelé **CAVITATION**.

b/- Phénomène de cavitation :

Le phénomène de cavitation correspond à une vaporisation du liquide qui se traduit par l'apparition de bulles de gaz au sein du liquide ou contre les parois. La cavitation apparaîtra dans les zones où la pression est minimale. Ces zones se situent à l'entrée de la roue au voisinage du bord d'attaque des aubes.

*** Effets :** - Une baisse des performances de la pompe.

- Une érosion des pièces métalliques.
- Vibrations très élevées qui engendrent la destruction des garnitures d'étanchéité.
- Bruit anormal.

c/- Condition de non cavitation :

La cavitation est caractérisée par le *N.P.S.H.* On distingue :

- *N.P.S.H_{Requis}* : pour un débit, une vitesse de rotation et une pompe données. Il est spécifié par le constructeur.

- *N.P.S.H_{Disponible}* : qui, pour le même débit, résulte de l'installation. Il est obtenu en calculant la pression à l'entrée de la pompe

- La condition de non-cavitation entraîne :

$$N.P.S.H_{Disponible} > N.P.S.H_{Requis} \text{ avec : } N.P.S.H_{disp} = \pm H + \frac{p_r + p_{atm}}{\rho \cdot g} - \frac{p_v}{\rho \cdot g} - \Delta H_{asp}$$

Où :

- **H** [m] : élévation (signe +) ou charge (signe -) depuis le niveau du liquide dans le réservoir d'alimentation jusqu'à l'orifice d'aspiration de la pompe,
- **p_r** [Pa] : pression effective régnant à la surface libre du réservoir d'alimentation ouvert ou fermé, dans lequel la pompe aspire, ($p_r + p_{atm}$ = pression absolu).
- **p_v** [Pa] : pression de vapeur saturante du liquide pompé mesurée par rapport au vide absolu.
- **ΔH_{asp}** [m] : pertes de charge à l'aspiration entre le niveau libre dans le bassin ou le réservoir d'alimentation et la bride d'entrée de la pompe,

4-5/ Courbes caractéristiques d'une pompe centrifuge :

Les caractéristiques d'une pompe centrifuge sont présentées pour une vitesse de rotation constante et en fonction du débit *Q* en [*m³/h* ou *l/s*] et qui sont :

Exemple : Pompe centrifuge de type VLX2-50 dont la vitesse de rotation de l'arbre moteur est : N = 2850 tr/min.

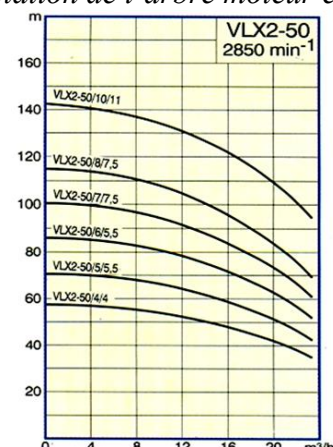


Figure 13: Variation de la Hmt (m) en fonction du débit (m³/h)



Figure 14: Variation du rendement η (%) en fonction du débit (m3/h)

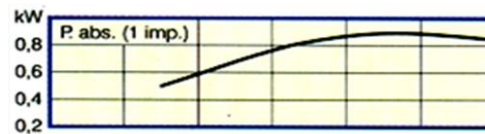


Figure 15: Variation de la puissance (kW) en fonction du débit (m3/h)



Figure 16: Variation de NPSH requis (m) en fonction du débit (m3/h)

4-6/ Point de fonctionnement d'une pompe centrifuge :

a/- Equation caractéristique d'un circuit de transport de liquide :

Pour un circuit donné, la hauteur manométrique est : $H_{mt} = H_G + \Delta H$

Avec :

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

$$\Delta H = \left(\lambda_a \frac{L_a}{D_a} + k_a \right) \cdot \frac{v_a^2}{2g} + \left(\lambda_r \frac{L_r}{D_r} + k_r \right) \cdot \frac{v_r^2}{2g} \quad \text{Or :} \quad Q = v_a \cdot S_a = v_r \cdot S_r \quad \text{et} \quad S = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

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

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

Donc : $H_{mt} = H_G + A \cdot Q^2$, où : 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 $H_{mt} = H_G + A \cdot Q^2$ avec la courbe caractéristique de la pompe $H_m = f(Q)$.

b/- Traçage des courbes caractéristiques :

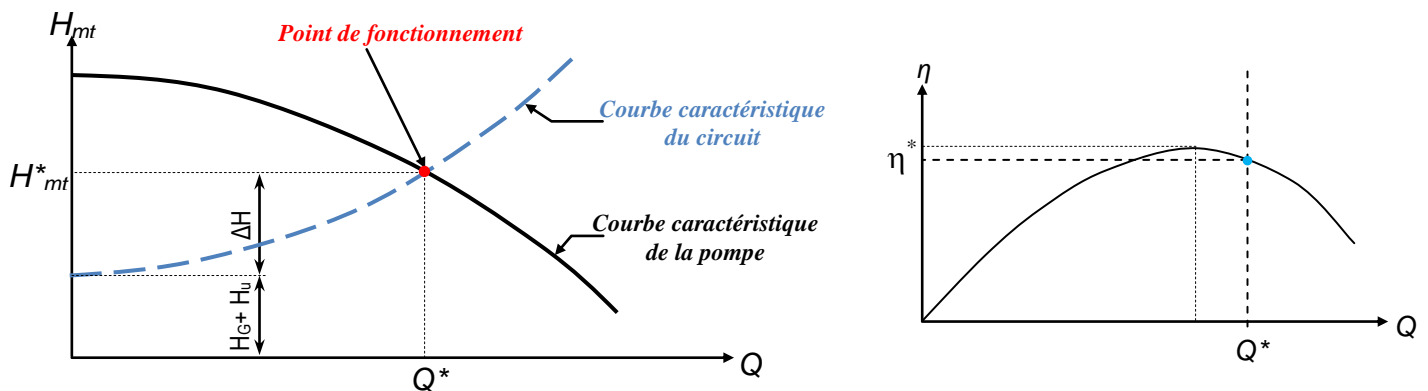
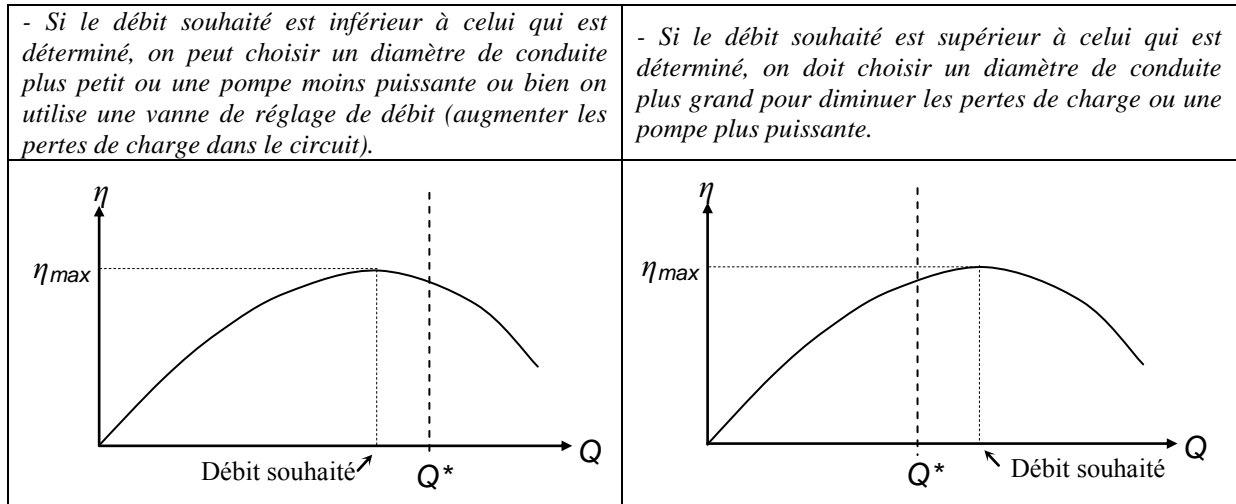


Figure 17: Point de fonctionnement

c/- Interprétation :



* **Remarque :** Le point de fonctionnement doit être *au voisinage et à droite du débit souhaité*. Dans ce cas on peut améliorer le rendement en agissant sur la vanne de réglage du débit.

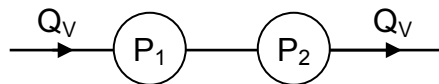
5/- Couplages des pompes centrifuges :

Pour parvenir à obtenir certaines conditions de fonctionnement impossibles à réaliser avec une seule pompe, les utilisateurs associent parfois deux pompes dans des montages en série ou en parallèle.

On considère deux pompes P_1 et P_2 ayant des caractéristiques identiques.

5-1/ Couplage en série :

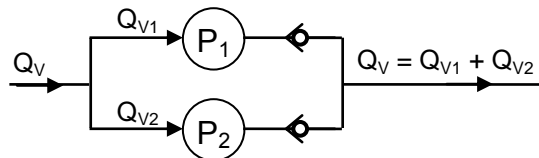
Il convient bien pour un réseau présentant des pertes de charge importantes.



Pour ce cas de couplage on a : $H_{mt\ série} = H_{mt1} + H_{mt2}$ et $Q_v = Q_{v1} = Q_{v2}$

5-2/ Couplage en parallèle :

Le couplage en parallèle permet d'augmenter le débit dans le réseau, il convient lorsque le besoin de débit plus important s'avère nécessaire.



Pour ce cas de couplage on a : $H_{mt1} = H_{mt2} = H_{mt\ parallèle}$ et $Q_v = Q_{v1} + Q_{v2}$

6/- Critères de choix des pompes centrifuges :

Une pompe centrifuge doit être choisie en fonction de l'installation dans laquelle elle sera placée et en tenant compte des éléments suivants :

- Les propriétés du liquide.
- Le débit souhaité Q_s .
- Les caractéristiques spécifiques du circuit, H_G et H_{mt} .

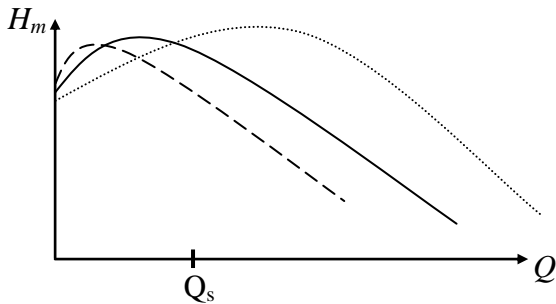
* **Remarque :** Lors du choix d'une pompe centrifuge, on doit disposer de son catalogue.

6-1/ Les propriétés du liquide : (critère n°1)

Ces propriétés sont indispensables pour le bon choix des matériaux utilisés pour la fabrication des pièces de la pompe qui sont en contact avec le liquide.

6-2/ Le débit souhaité : (critère n°2)

La pompe doit être capable d'assurer le débit souhaité Q_s .

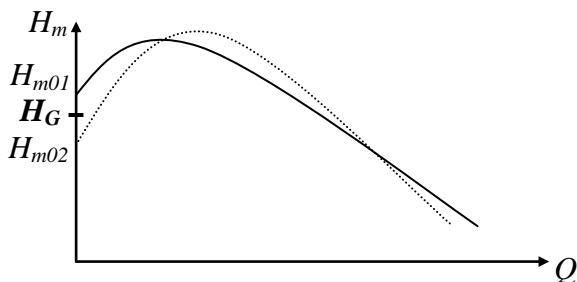


- Pompe 1
- Pompe 2
- - - Pompe 3

Dans ce cas, la pompe convenable est la pompe 1.

6-3/ $H_G < H_{m0}$: (critère n°3)

Avec H_{m0} est la hauteur manométrique de la pompe correspondant à un débit nul.

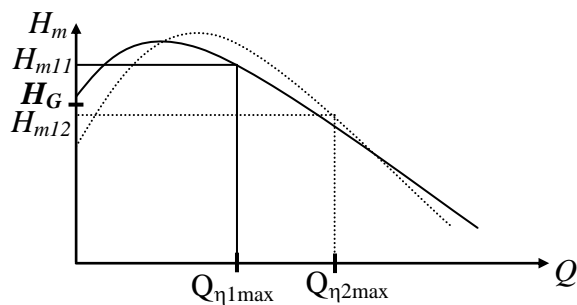


- Pompe 1
- Pompe 2

Dans ce cas, la pompe convenable est la pompe 1.

6-4/ $H_G < H_1$: (critère n°4)

Avec H_{m1} est la hauteur manométrique de la pompe correspondant à un rendement maximal.

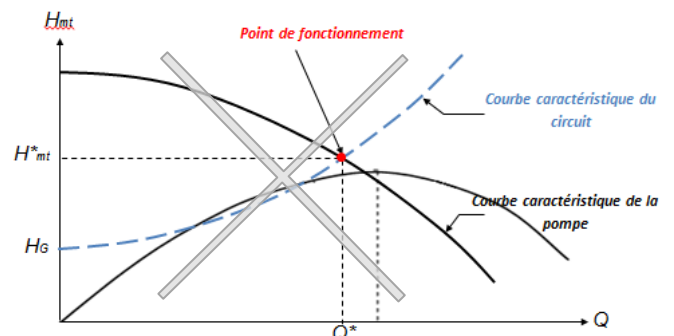
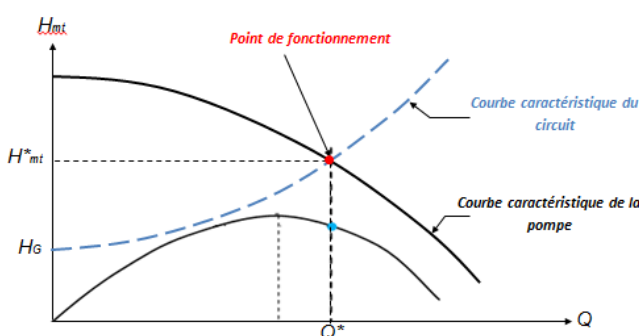


- Pompe 1
- Pompe 2

Dans ce cas, la pompe convenable est la pompe 1.

6-5/ Le point de fonctionnement : (critère n°5)

Le point de fonctionnement doit être *au voisinage et à droite du débit souhaité*.



6-6/ NPSH : (critère n°6)

On doit vérifier que la cavitation est évitée pour le débit de fonctionnement Q^* . Il faut que :

$$N.P.S.H_{Disponible}(Q^*) > N.P.S.H_{Requis}(Q^*)$$

* **Remarque :** Si on ne connaît pas $N.P.S.H_{Requis}$, on doit vérifier que la pression absolue d'aspiration de la pompe, équivalente à Q^* , est supérieure à la pression absolue de vaporisation du liquide.

$$p_{asp}(Q^*) > p_v$$