

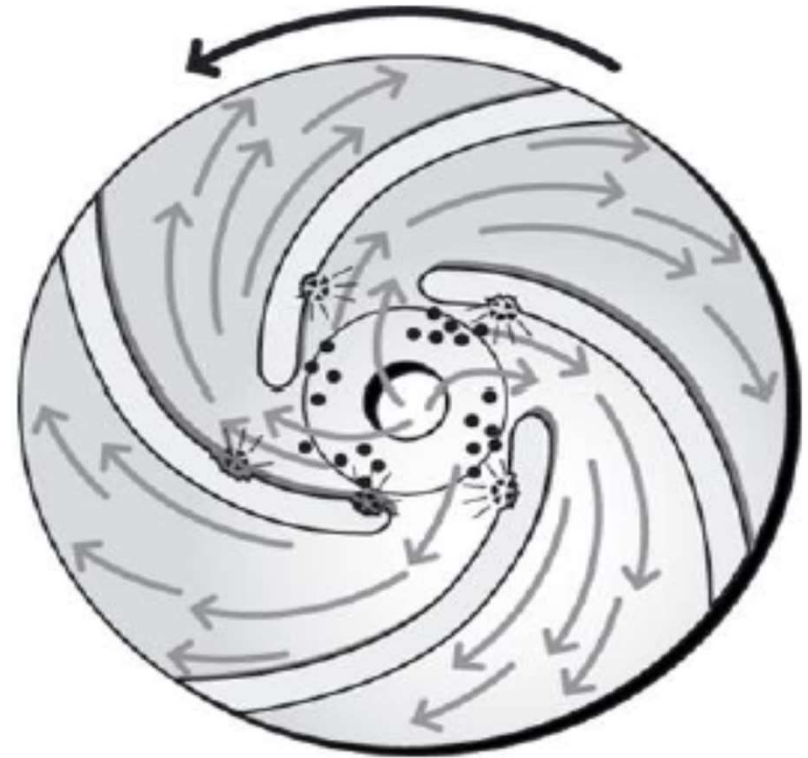
CHAPITRE IV

LA CAVITATION

Description du phénomène de cavitation

La cavitation est le phénomène de production de vapeur d'eau et de décondensation sous l'effet de variation de la pression autour de la tension de la vapeur d'eau. Elle produit des chocs très violent entraînant des corrosions mécaniques rapides et spectaculaires de la roue et du diffuseur de la pompe. Elle ne désamorce pas directement la pompe.

La cavitation est un problème important qui doit être surveillé lorsque l'on travaille avec des pompes. Cela peut être dévastateur pour les pompes.



La cavitation est causée par la vaporisation locale du fluide, lorsque la pression statique locale d'un liquide tombe en dessous de la pression de vapeur du liquide. De petites bulles ou cavités remplies de vapeur se forment, qui s'effondrent soudainement lorsqu'elles avancent avec le flux dans des régions de haute pression. Ces bulles s'effondrent avec une force énorme, donnant lieu à une pression pouvant atteindre 3 500 atm. Dans une pompe centrifuge, ces zones basse pression se trouvent généralement à l'entrée de la roue, où le fluide est localement accéléré sur les surfaces des aubes. Dans les turbines, la cavitation est plus susceptible de se produire à l'extrémité de sortie aval d'une aube sur la face avant basse pression. Lorsque la cavitation se produit, elle provoque les effets indésirables suivants :

Lorsque la cavitation se produit, elle provoque les effets indésirables suivants :

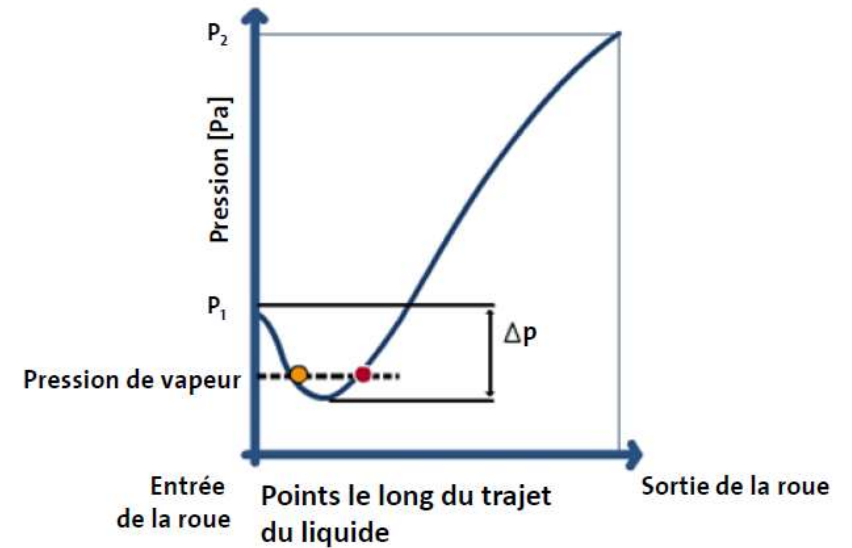
1. Piqûres locales de la roue et érosion de la surface métallique.
2. Une érosion prolongée par cavitation peut entraîner de graves dommages.
3. Vibrations de la machine ; du bruit est également généré sous la forme de craquements aigus lors de la cavitation.
4. Une baisse d'efficacité due à la formation de vapeur, qui réduit les zones d'écoulement efficaces.

La prévention de la cavitation dans les machines de conception conventionnelle peut être considérée comme l'une des tâches essentielles des concepteurs de pompes et de turbines. Cette cavitation impose des limitations sur le débit et la vitesse de rotation de la pompe.

Température (°C)	Pression de vapeur saturante (mbar)
-60	0,001
-40	0,13
-20	1,03
-10	2,6
0	6,10
5	8,72
10	12,3
15	17,0
20	23,4
25	31,7
30	42,4
40	73,8
50	123
60	199
100	1013

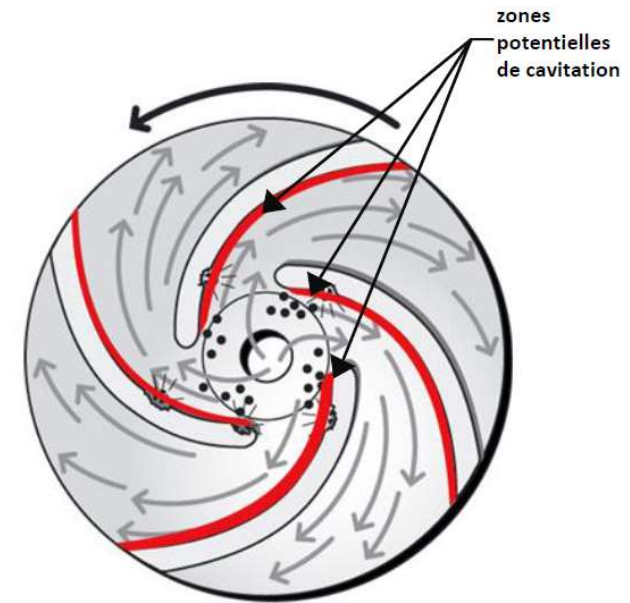
Causes de la cavitation

L'eau peut bouillir à la suite d'une chute de pression locale. Cette chute de pression est liée à la conception de la roue de la pompe. L'eau bout à 100 °C lorsque la pression atmosphérique est normale. Lorsque la pression descend en dessous de la pression atmosphérique normale, l'eau commence à bouillir à une température inférieure. Par exemple, si la pression chute à 0.1 bar, l'eau commence à bouillir à 45 °C.



Effets de la cavitation sur les pompes

On reconnaît la cavitation par un bruit fort et des vibrations. Les bulles de vapeur dans l'eau implosent bruyamment et cela est suivi par un impact mécanique lourd qui peut détruire la pompe si le phénomène persiste. La cavitation provoque des piqûres de corrosion sur la roue et le corps de pompe. Cela peut fortement dégrader la performance de la pompe.



Les effets de la cavitation peuvent être classés en trois catégories générales :

1. Effets qui modifient l'hydrodynamique de l'écoulement du liquide
2. Effets qui produisent des dommages sur les surfaces limites solides de l'écoulement
3. Effets parasites pouvant ou non être accompagnés de modifications significatives de l'écoulement hydrodynamique ou de dommages aux frontières solides

Les pompes centrifuges et à flux axial, elles souffrent de ses effets et même les différents types de pompes volumétriques peuvent en être perturbées. Bien que la cavitation puisse être aggravée par une mauvaise conception, elle peut se produire même dans les équipements les mieux conçus lorsque ces derniers fonctionnent dans des conditions défavorables.

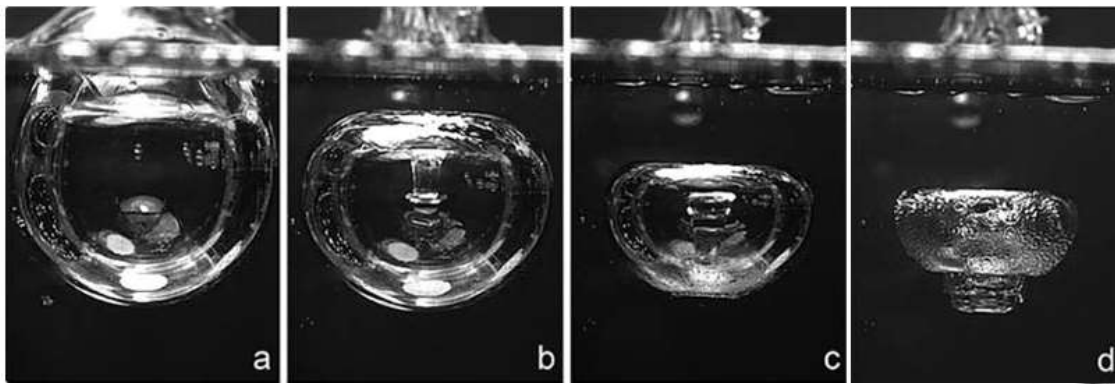
La cavitation est indésirable en raison des effets nocifs suivants:

1. Un grand nombre de bulles de vapeur formées s'effondrent soudainement dans une région à haute pression, ce qui provoque un afflux de liquide environnant et entraîne des chocs, du bruit et des vibrations. Ce phénomène est appelé coup de bélier.
2. L'action continue du coup de bélier provoquée par l'effondrement des bulles provoque des piqûres et une érosion de la surface.
3. Le coup de bélier provoque une fatigue des pièces métalliques et réduit leur durée de vie.
4. La cavitation provoque une chute soudaine de la tête et de l'efficacité.

Eviter la cavitation (suite)

En cas de risque de cavitation, il existe plusieurs approches pratiques pour l'éviter :

1. Réduire l'aspiration de la pompe et augmenter la pression d'aspiration.
2. Réduire la vitesse dans le tuyau d'aspiration
3. Réduire la perte de charge dans la tuyauterie d'aspiration.
4. Réduire le débit de la pompe.
5. En réduisant la hauteur d'aspiration, ce qui augmente la valeur et garantit une disponibilité suffisante du NPSH.
6. Si le phénomène persiste, choisissez une autre pompe.



Les critères d'apparition de la cavitation sont principalement le nombre de cavitation et la hauteur d'aspiration nette requise.

Le **nombre de cavitation** sans dimension σ indique l'apparition de cavitation dans le fluide.

$$\sigma = \frac{p - p_v}{\frac{\rho}{2} \cdot v^2}$$

ρ densité, p pression, p_v pression de vapeur,
 v vitesse d'écoulement



Comment éviter la cavitation

Pour éviter l'apparition de la cavitation, il faut maintenir le **nombre de cavitation** σ aussi élevé que possible. En plus, un nombre de cavitation bas induit une consommation importante d'énergie et de faibles dimensions de la turbomachine.

Les mesures suivantes réduisent la tendance à la cavitation:

- éviter les pressions basses
- éviter les températures proches du point d'ébullition du fluide
- utiliser des profils d'aube minces
- choisir de petits angles d'ajustage des aubes
- éviter tout changement de direction brusque de l'écoulement
- arrondir le bord d'attaque



Roue de pompe détruite par l'érosion de cavitation



Hélice de bateau détruite par l'érosion

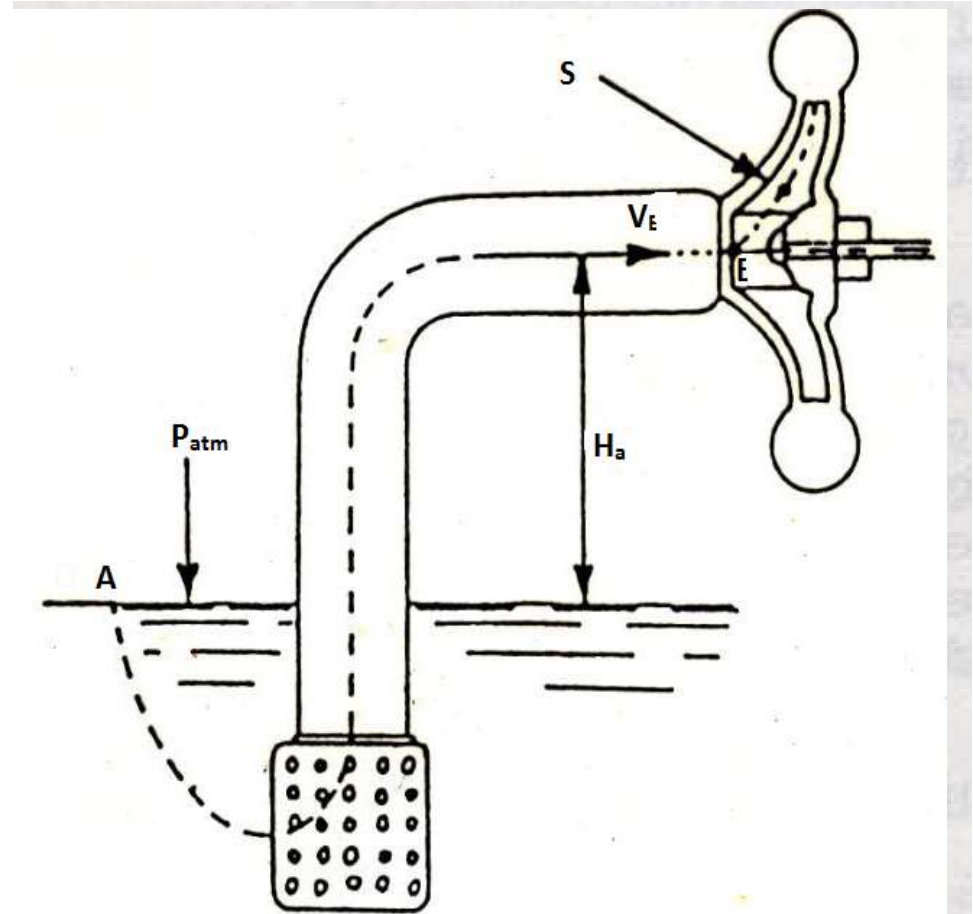
3- Hauteur maximale d'aspiration

Théoriquement il est bien admis qu'en faisant le vide dans un tube il est impossible de faire monter l'eau à une hauteur supérieure à la pression atmosphérique (en mce) pour l'altitude considérée.

Pour l'altitude zéro, cette hauteur est de 10,33m ; pour une altitude Z cette hauteur devient $10,33 - 0,0012 \cdot Z$.

En réalité, cette hauteur est notablement moins élevée car une partie de la pression disponible est nécessaire, d'une part pour vaincre les pertes de charge dans le tube d'aspiration, et d'autre part, pour communiquer au liquide la vitesse désirable.

Par ailleurs, la pression absolue à l'entrée de la pompe ne doit pas descendre au-dessous d'une valeur déterminée, puisque la tension de vapeur correspondant à la température du liquide à pomper ne doit en aucune circonstance être atteinte.



Appliquons Bernoulli entre A et E

$$Z_A + \frac{P_A}{\rho g} + \frac{V_A^2}{2g} = Z_E + \frac{P_E}{\rho g} + \frac{V_E^2}{2g} + J_{AE}$$

$$\frac{P_A}{\rho g} = 0 \text{ en pression relative}$$

$$\frac{P_A}{\rho g} = \frac{P_{atm}}{\rho g} = 10,33 \text{ mce en pression absolue}$$

- Si le plan de référence passe par A, $Z_A = 0$ et $Z_E = H_a$
- $V_A = 0$ car fluide au repos

$$\frac{P_E}{\rho g} = \frac{P_A}{\rho g} - H_a - \frac{V_E^2}{2g} - J_{AE}$$

$$\frac{P_E}{\rho g} = \frac{P_{atm}}{\rho g} - H_a - \frac{V_E^2}{2g} - J_{AE} \text{ (en pression absolue)}$$

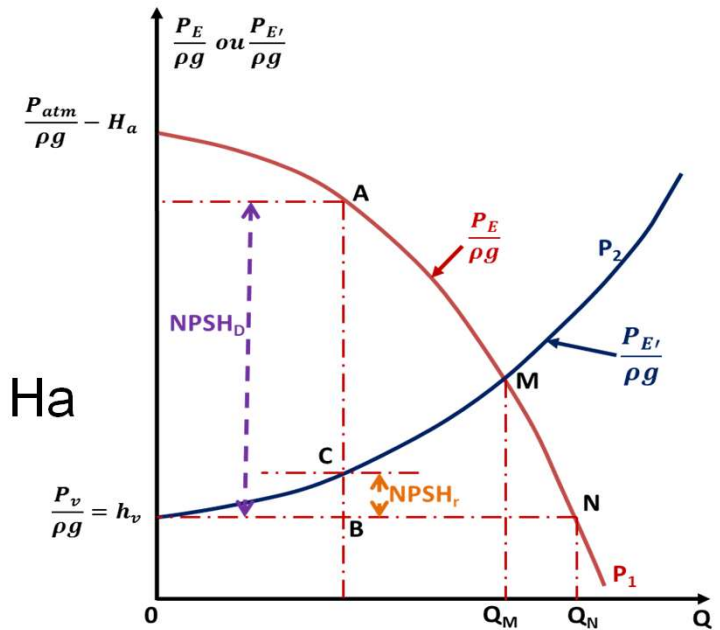
$$\text{Ou } \frac{P_E}{\rho g} = 0 - H_a - \frac{V_E^2}{2g} - J_{AE} \text{ (en pression relative)}$$

V_E^2 varie comme Q^2 et J varie comme Q^2 on peut donc écrire $\frac{V_E^2}{2g} + J_{AE} = KQ^2$

La hauteur représentative de la pression absolue à l'ouïe de la roue s'écrit :

$$\frac{P_E}{\rho g} = \frac{P_{atm}}{\rho g} - H_a - KQ^2$$

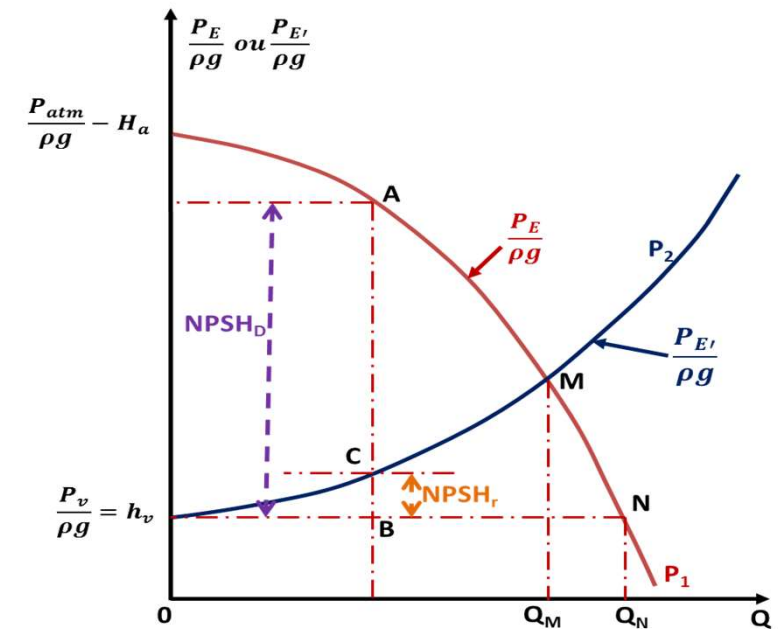
On en conclut que pour une installation donnée (P_{atm} et H_a donnés), la courbe $\frac{P_E}{\rho g} = f(Q)$ est une parabole (P_1)



On peut écrire: $\frac{P_{atm}}{\rho g} = \frac{P_E}{\rho g} + H_a + \frac{V_E^2}{2g} + J_{AE}$

On voit que l'énergie de pression atmosphérique est,

- ✓ dépensée pour vaincre la hauteur géométrique d'aspiration et les pertes de charges ;
- ✓ transformée en énergie de pression PE à l'entrée de la pompe et en énergie cinétique.



On peut alors dire que la pompe ne fournit pas l'énergie nécessaire à l'aspiration, elle crée un vide qui permet d'utiliser l'énergie dont on dispose, la pression atmosphérique: *L'aspiration d'un fluide est produite en général par une dépression générée par une pompe.*

$H_a = \frac{P_{atm}}{\rho g} - \frac{P_E}{\rho g} - J_{AE}$ (le terme $\frac{V_E^2}{2g}$ ici est négligé) = **hauteur théorique maximale d'aspiration**

Pour une pompe installée à cette hauteur maximale, la pression à l'entrée de la pompe serait:

$\frac{P_E}{\rho g} = \frac{P_{atm}}{\rho g} - H_a + \frac{V_E^2}{2g} - J_{AE}$

$\frac{P_E}{\rho g}$ ne doit pas descendre sous une certaine valeur au risque de cavitation

□ Le N.P.S.H. (Net Positive Suction Head) ou charge nette absolue à l'aspiration:

L'énergie que possède le liquide au point E est: $\frac{P_E}{\rho g} + \frac{V_E^2}{2g} = \frac{P_{atm}}{\rho g} - H_a + \frac{V_A^2}{2g} - J_{AE}$

En négligeant le terme $\frac{V^2}{2g}$ Nous aurons : $\frac{P_E}{\rho g} = \frac{P_{atm}}{\rho g} - H_a - J_{AE}$

Cette pression absolue P_E à l'entrée de la pompe ne doit pas descendre sous la pression de vapeur saturante P_v du fluide (l'eau) c à d : $\left[\frac{P_E}{\rho g} - \frac{P_v}{\rho g} \geq 0 \right]$

➤ Le N.P.S.H. disponible à l'entrée de la pompe est :

$\frac{P_E}{\rho g} - \frac{P_v}{\rho g}$ avec $\frac{P_E}{\rho g}$ pression absolue à l'entrée de roue au point E

La charge disponible, N.P.S.H. disponible à l'entrée d'une pompe :

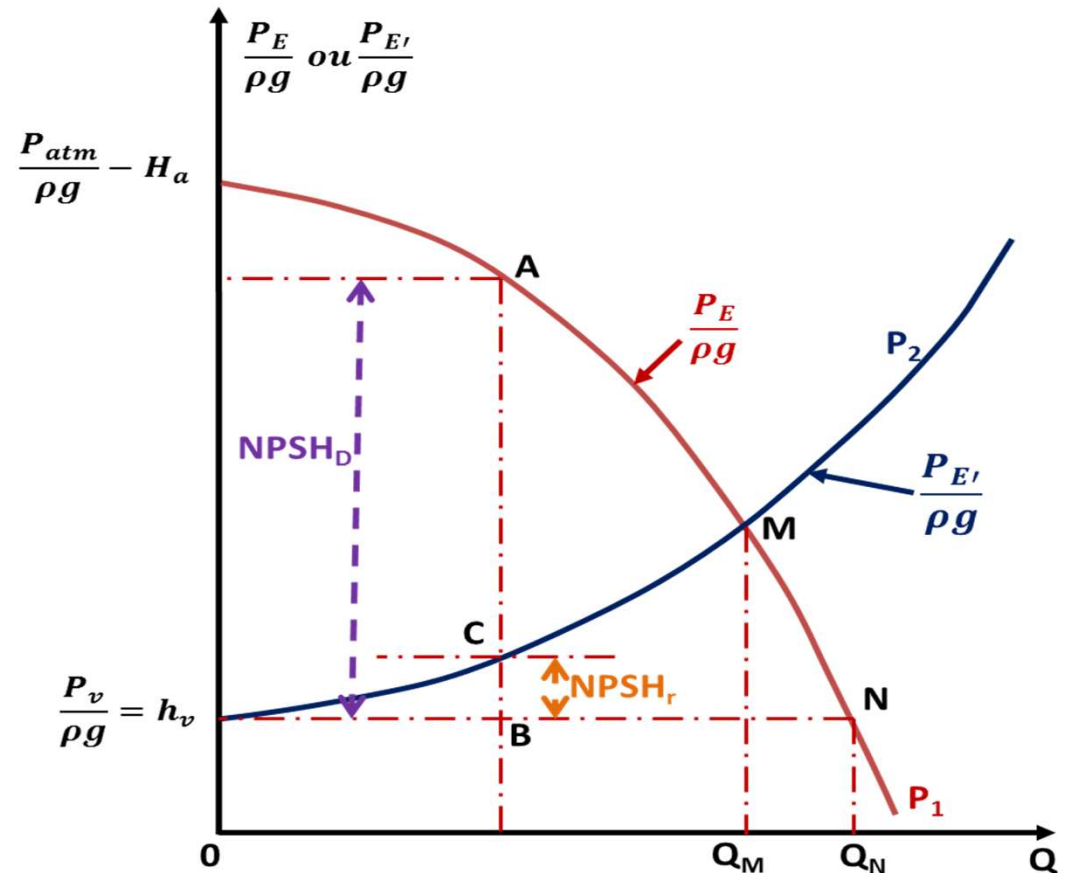
Pour une installation donnée on doit avoir toujours

$$\frac{P_E}{\rho g} = \frac{P_{atm}}{\rho g} - H_a - J_{AE} \geq 0 \text{ (en pression relative)}$$

Le N.P.S.H. disponible est indépendant de la pompe utilisée. Il ne dépend que de l'installation (longueur et diamètre de la canalisation, des pièces de raccord et robinetterie à l'aspiration : pertes de charge, hauteur géométrique d'aspiration, du lieu et du fluide (pression de vapeur saturante).

Le N.P.S.H disponible est généralement calculé par le concepteur de la station de pompage.

Sur le graphique N.P.S.H. disponible est représenté par la distance verticale AB de la parabole P1 à l'horizontale d'ordonnée h_v .



N.P.S.H. requis

Le point E n'est pas le point où la pression est la plus faible le long du filet liquide considéré qui traverse la roue après E. Le minimum de pression sera normalement

atteint au point S. Soit

- P_S la pression absolue en S,
- H_s la distance verticale de S à la surface libre à l'aspiration,
- V_S la vitesse absolue en S (on a $V_S > V_E$)
- J_{ES} la perte de charge de E à S

L'application du théorème de Bernoulli entre E et S donne l'expression ci-après

$$H_a + \frac{P_E}{\rho g} + \frac{V_E^2}{2g} = H_S + \frac{P_S}{\rho g} + \frac{V_S^2}{2g} + J_{ES} \quad \text{avec } H_a = H_s \text{ et en supposant que la pression en S}$$

atteigne la tension de vapeur c à d $\frac{P_S}{\rho g} = h_v$; La pression en E prend alors la valeur

particulière P'_E et l'équation de Bernoulli s'écrit:

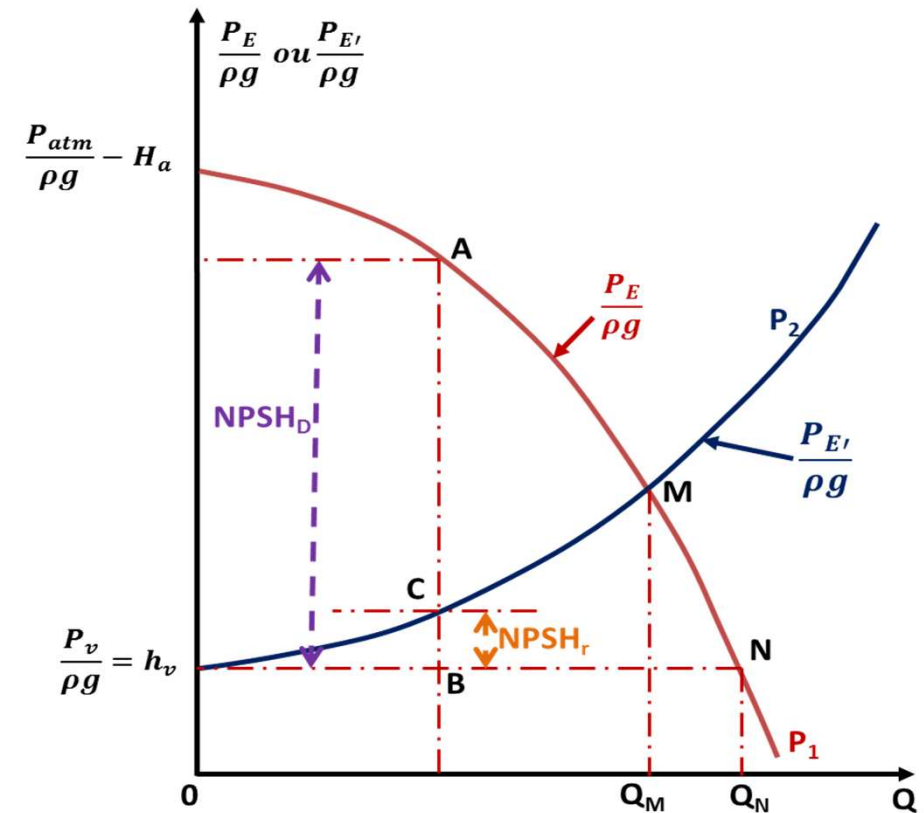
$$\frac{P_{E'}}{\rho g} = h_v + \frac{V_S^2 - V_E^2}{2g} + J_{ES} \quad \text{on peut poser } \frac{V_E^2}{\rho g} = K_1 Q^2 \text{ et } \frac{V_S^2}{\rho g} = K_2 Q^2 \text{ et } J_{ES} = K_3 Q^2$$

$$\text{D'où } \frac{P'_{E'}}{\rho g} = h_v + (K_1 - K_2 + K_3) Q^2 \quad \text{ou } \frac{P'_{E'}}{\rho g} = h_v + K' Q^2$$

La courbe $\frac{P'_{E'}}{\rho g} = f(Q)$ est une parabole P_1 en M

Par définition Le **NPSH requis** est $\frac{P'_E}{\rho g} - h_v = K'Q^2$; il est représenté par la distance verticale BC de la parabole P_2 à l'horizontale d'ordonnée h_v .

Le N.P.S.H. requis ne dépend pas de l'installation de la pompe ; il ne dépend que de ce qui se passe entre les points E et S, c'est-à-dire de la pompe elle-même. C'est une donnée fournie par le constructeur. Le N.P.S.H. requis est pratiquement indépendant du fluide véhiculé.



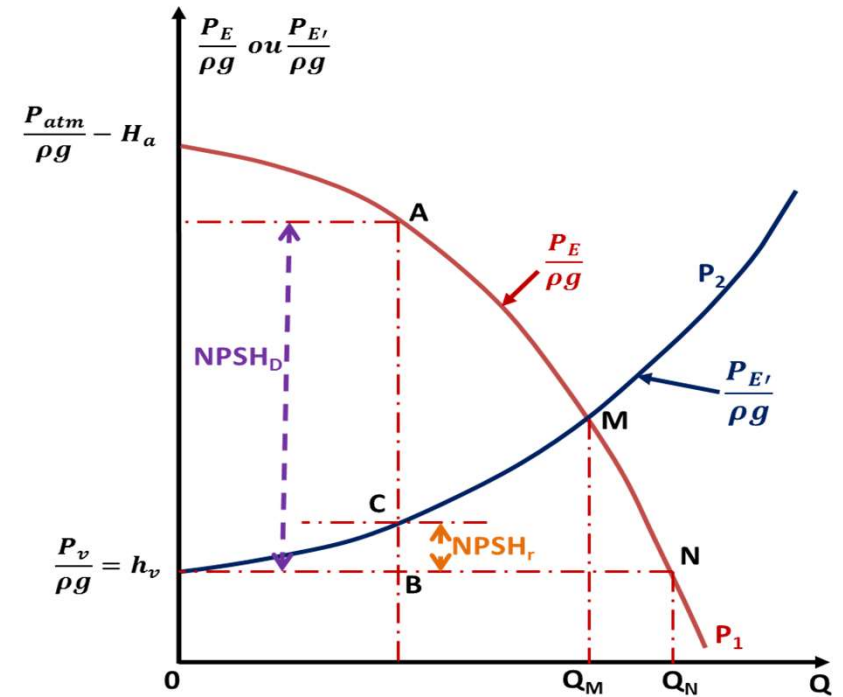
Le N.P.S.H. requis se détermine en laboratoire et est donné par le constructeur.

Le constructeur de pompes donne pour chaque type de pompe et pour une vitesse de rotation déterminée, une courbe donnant la valeur du N.P.S.H. requis en fonction du débit de la pompe.

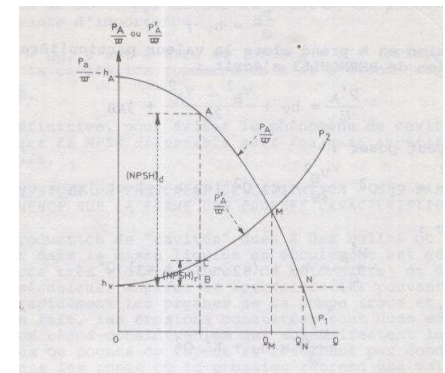
Afin que les conditions d'aspiration définies par le concepteur (N.P.S.H. disponible) soient toujours satisfaites par la pompe, il faut que le N.P.S.H. disponible soit toujours supérieur au N.P.S.H. requis

Pour l'utilisateur ou le concepteur, la hauteur maximale pratique d'aspiration est:

$$\underbrace{\left[\frac{P_{atm}}{\rho g} - H_a - J_{AE} - \frac{P_v}{\rho g} \right]}_{\text{NPSH disponible}} - NPSH_{requis}$$



La hauteur de sécurité H_s Pour une pompe installé à la hauteur H_a au dessus du plan d'eau est la hauteur d'aspiration pratique diminuée de H_a



La maîtrise de la cavitation

- ❑ Aucune pompe ne peut aspirer dans un plan d'eau situé en dessous de 8 m;
- ❑ Disposition pour la protection contre la cavitation
- ❑ Notion de Hauteur Nette Positive d'Aspiration
- ❑ NPSH disponible (Net Positive Suction Head)
- ❑ NPSH requis

Mise en équation: Application de l'équation de Bernoulli entre le plan d'eau et la pompe

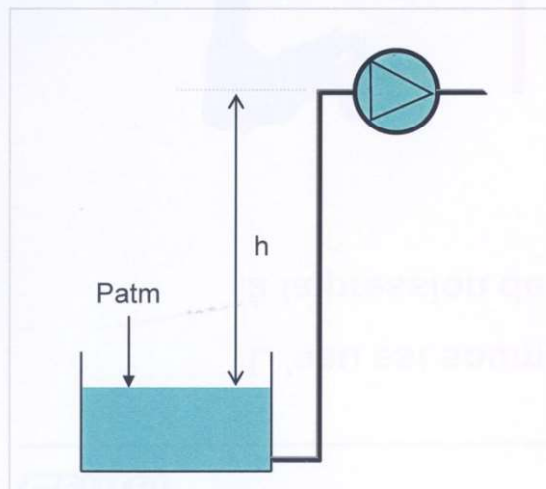
NPSH

Net Positive Suction Head / charge nette absolue à l'aspiration

Le NPSH disponible > NPSH requis (+ 0,5 à 1 m)

L'installation

La pompe



$$NPSH_{dispo} = \frac{P_{atm}}{\varpi} - h - J_a - \frac{T_v}{\varpi}$$

ϖ = poids volumique (N/m^3)

Il est donc impossible d'aspirer de l'eau à une profondeur théorique supérieure ou égale à 10,33 m. En pratique, avec les pertes de charge dans la canalisation d'aspiration, il est difficile d'aspirer au delà de 9 m.

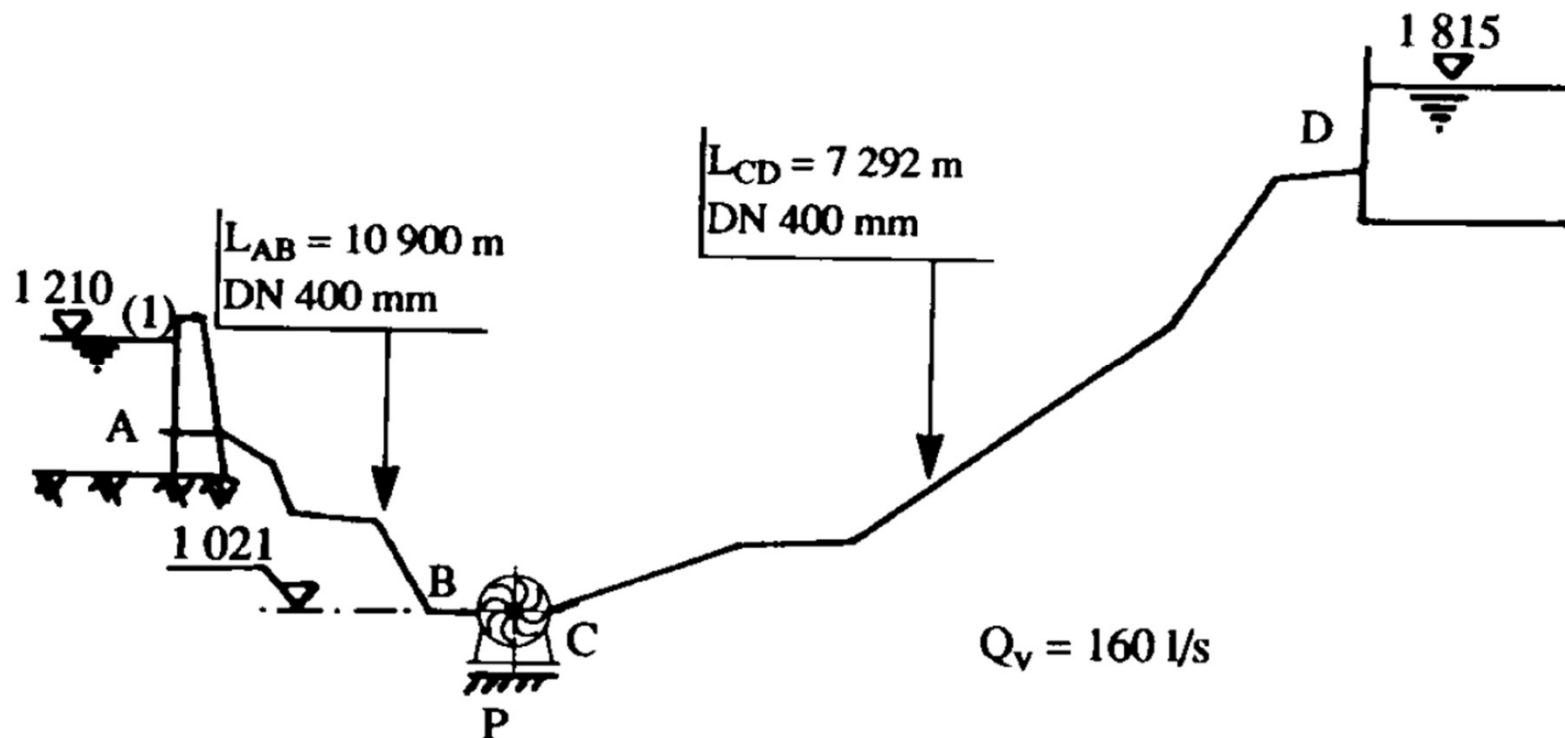
Problèmes de fonctionnement

Problème	Causes éventuelles
Pompe bloquée	Il peut arriver après certaines périodes d'inactivité à cause de l'oxydation interne. Il faut donc procéder au déblocage ; pour les petites électropompes monobloc utiliser un tournevis sur la rainure qui se trouve sur l'extrémité de l'arbre coté ventilation. Pour les électropompes plus grandes, il faut agir sur l'arbre ou sur l'accouplement élastique
Pompe qui ne s'amorce pas	Pompe et tuyau d'aspiration avec de l'air Amorçage incomplet ou pompe totalement pas amorcé. Possible infiltration d'air à travers de robinets, bouchons de vidange ou de remplissage, joints toriques ou presse-étoupe. Clapet de pie pas complètement immergé dans le liquide ou clapet obturé par de boue ou de débris. Hauteur d'aspiration excessive par rapport à la capacité de la pompe. Sens de rotation incorrect. Nombre de tours incorrect
Débit insuffisant	Tuyaux et accessoires avec diamètre trop petit qui causent des pertes de charges excessives. Roue obturée par de corps étrangers dans les canaux internes. Roue corrodée ou cassée, Bagues d'usure de la roue et corps de pompe usés par abrasion. Présence de gaz dans l'eau ou viscosité excessive du liquide (pour liquides différents de l'eau)
Bruit et vibrations dans la pompe	Partie tournante déséquilibrée, coussinets usés. Pompe et tuyaux pas fixés fermement. Débit trop réduit pour le modèle de pompe choisi. Fonctionnement en cavitation
Moteur surchargé	Caractéristiques de la pompe excessives par rapport à celles de l'installation Parties fixes et parties tournantes qui frottent entre eux et tendent à gripper pour manque de lubrification. Vitesse de rotation trop élevée. Voltage d'alimentation incorrect. Alignement du groupe incorrect. Liquide avec densité trop élevée et supérieure à celle de projet.

Exercice 3

Soit le système hydraulique en bas. La fonte Pont à Mousson et la fonte Bonna ont une rugosité de $\varepsilon=0,1\text{mm}$

Calculer la puissance que la pompe P doit fournir au fluide. Tracer la ligne piézométrique et la ligne de charge



(1.047MW)

Exercice 1

Une pompe centrifuge est placée au dessus d'un grand réservoir et débite $0,014 \text{ m}^3/\text{s}$. Pour ce débit le $NPSH_r$ de la pompe est $4,6 \text{ m}$; La conduite d'aspiration a un diamètre de 100 mm

Déterminer la hauteur d'aspiration maximale, si la température de l'eau est de 30°C et la pression de vapeur est $p_v = 4,24 \text{ kPa}$ ($p_{atm} = 1,013 \text{ bar}$). La seule perte de charge à considérer est celle du filtre d'aspiration $k_{filtre} = 20$.

Exercice 2

Une pompe centrifuge auto-amorçante est utilisée pour transvaser de l'eau à 25°C à partir d'un réservoir dont le plan d'eau est situé à la cote $z_1=2,2\text{m}$ au dessous de l'axe de la pompe (z_2). Le tuyau d'aspiration a une longueur de $2,8\text{m}$ et un diamètre de 80 mm . On admet un coefficient de perte de charge linéaire de $0,022$.

Les coefficients de pertes de charge singulières sont :

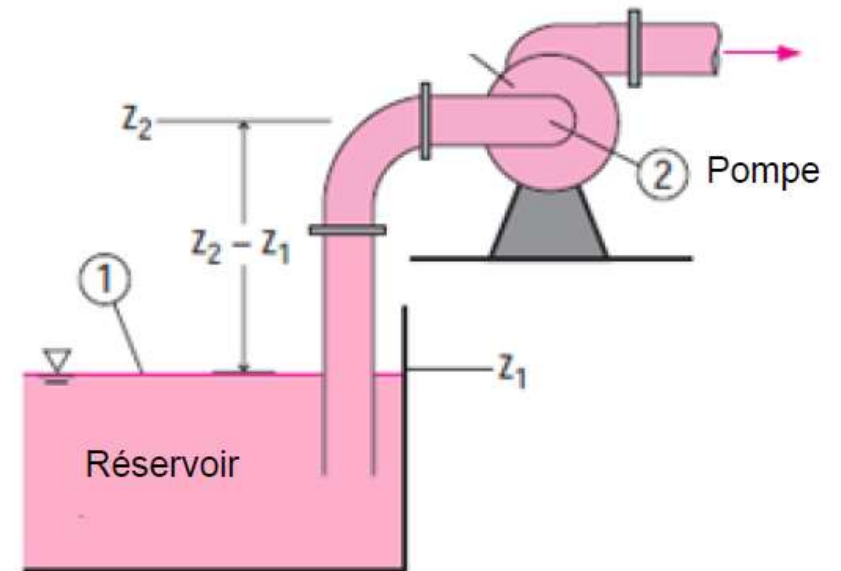
- L'entrée du tuyau d'aspiration : $K_{asp}=0,85$
- Un coude à 90° : $K_{coude}=0,3$

1. Déterminer le débit maximum hors cavitation si $p_v=3,169\text{ kPa}$, sachant que :

$$NPSHr = 2,28 + 1500Qv^2$$

Reprendre la question avec un diamètre de 100 mm .

2. Déterminer le débit maximum hors cavitation pour : $T = 60^{\circ}\text{C}$ et $p_v = 19,9\text{ kPa}$



Exercice 1

Une pompe refoule dans deux conduites en parallèle de même longueur et de même diamètre ; Une est en PVC et l'autre est en Fonte usagée. Donner l'allure des courbes caractéristiques des deux conduites (graphique non à l'échelle) : Les deux conduites refoulent à la même cote.

Exercice 2

Donner la HMT nécessaire pour refouler de l'eau d'un plan d'eau à la pression atmosphérique Cote : 25,0m à un point B de cote 50,0m. La pression exigée en B est 22,0mCE. L'ensemble des pertes de charge (linéaires et singulières) est 5,00m.

N.B. On travaillera en pression relative

