

Les pompes

A. Ramadane,

Ph.D. en génie civil

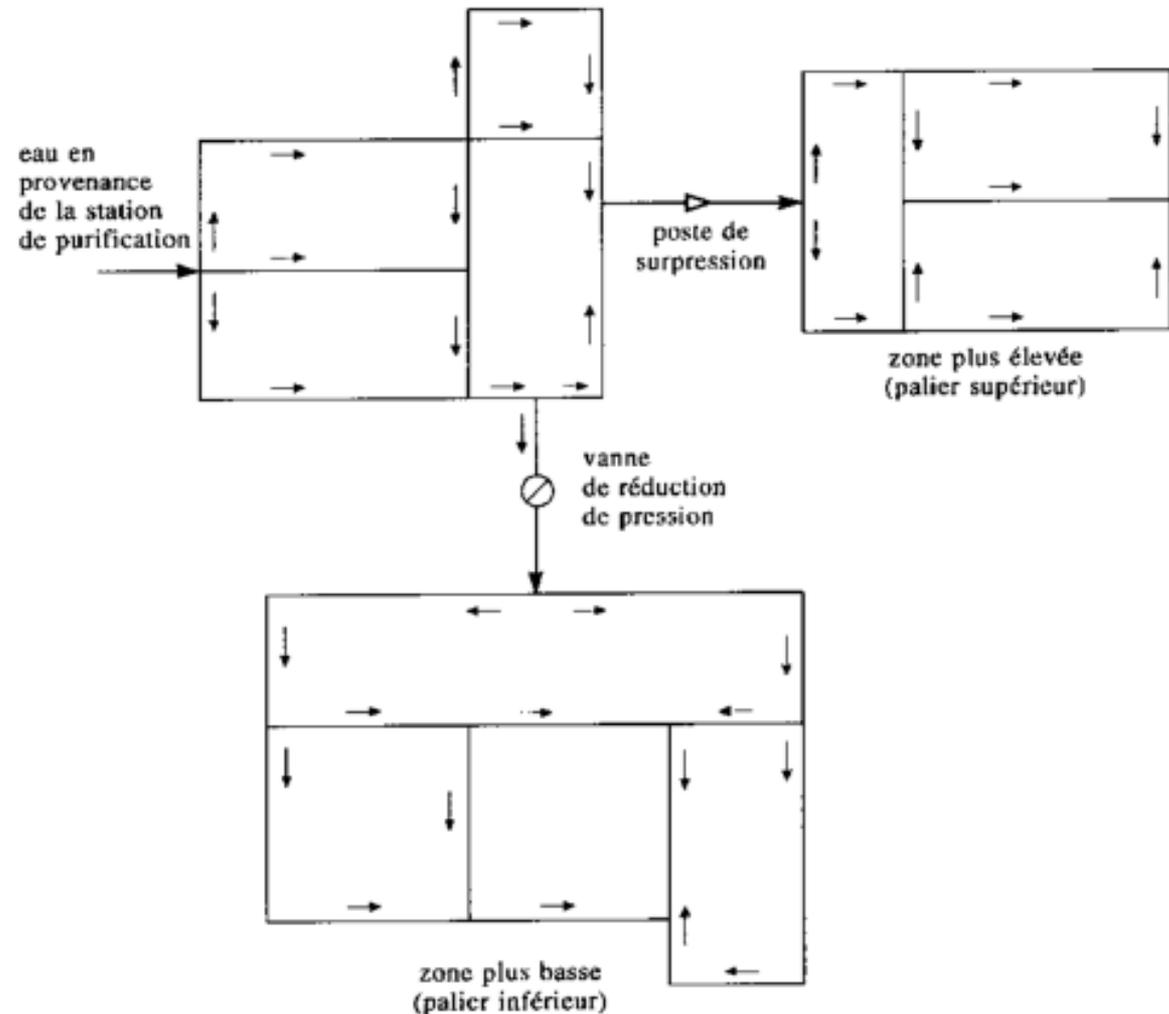
M.Ing. En génie de la construction

Quand doit-on utiliser une pompe?

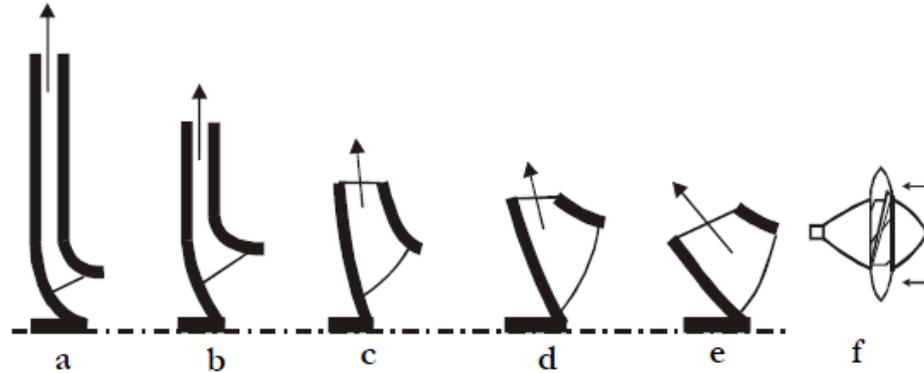
- La gravité est défavorable.
- La gravité est favorable mais insuffisante pour fournir le débit nécessaire avec un diamètre économique ou raisonnable.
- La pression locale est insuffisante.



PALIERS DE PRESSION



Description d'une pompe centrifuge

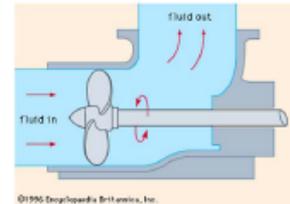
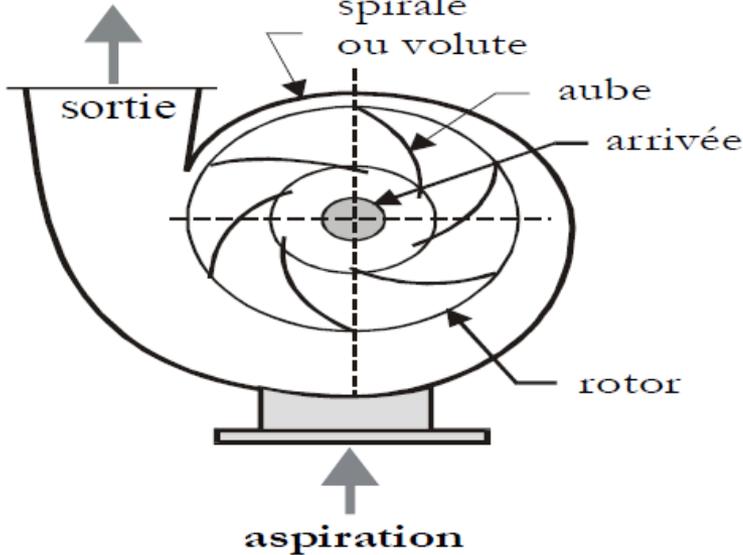


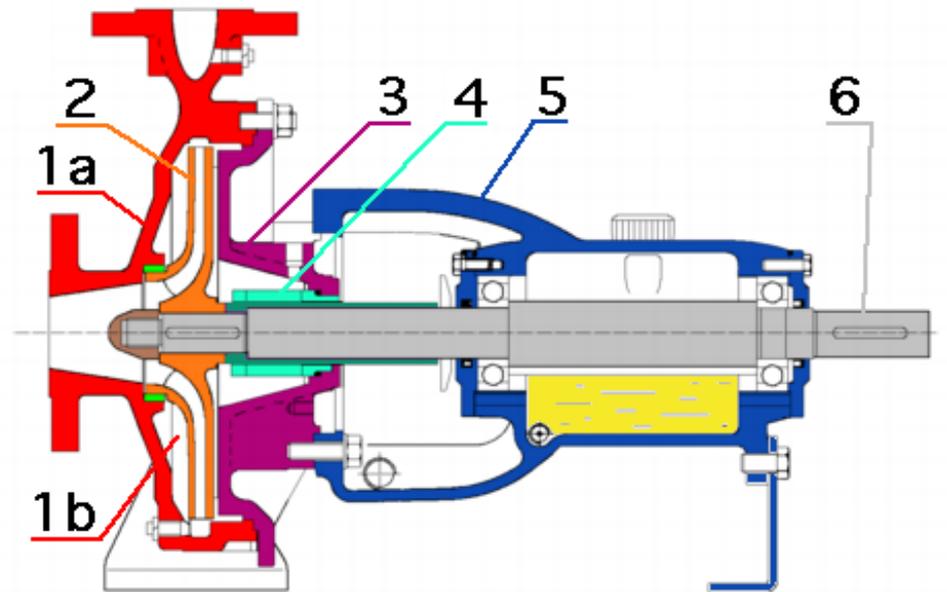
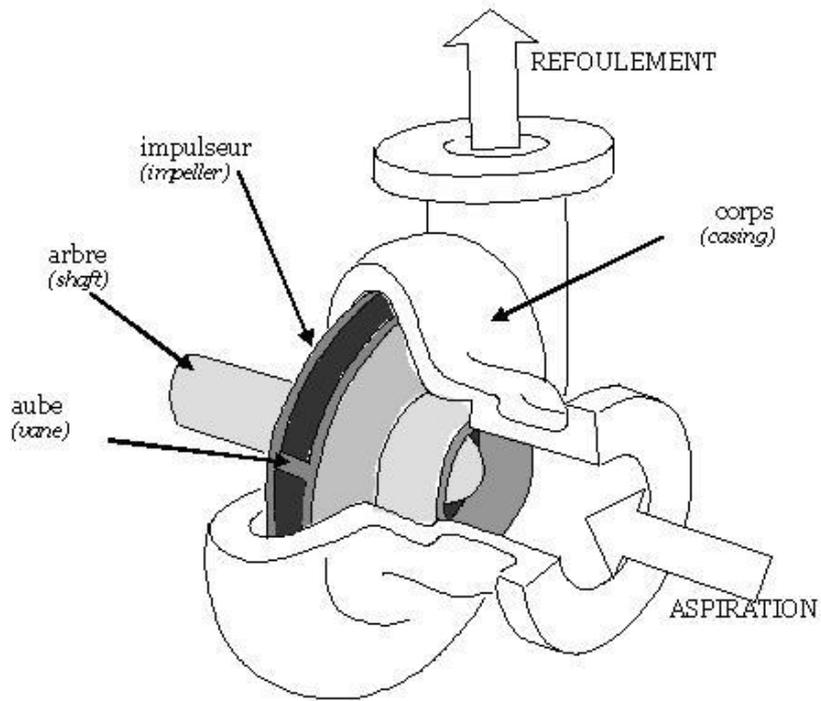
écoulement radial
pompe centrifuge

écoulement mixte
pompe hélico-centrifuge

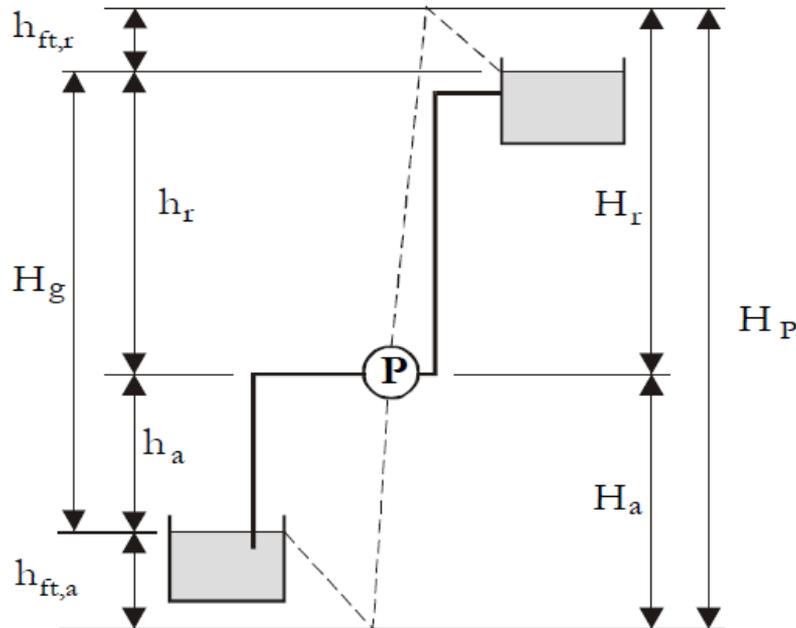
écoulement axial
pompe à hélice

refoulement





Nomenclature



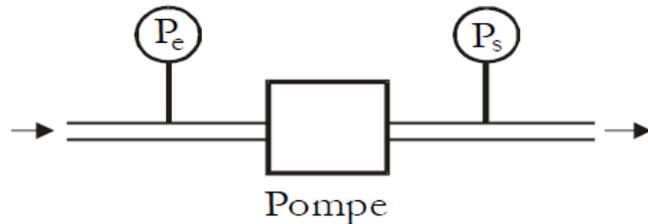
- H_g : la hauteur géométrique totale d'élevation,
- h_a : la hauteur géométrique d'aspiration,
- h_r : la hauteur géométrique de refoulement,
- $h_{ft,a}$: la perte de charge dans la conduite d'aspiration,
- $h_{ft,r}$: la perte de charge dans la conduite de refoulement,
- H_a : la hauteur totale à l'aspiration,
- H_r : la hauteur totale au refoulement,
- H_p : la hauteur manométrique développée par la pompe.

La perte de charge totale $h_{fT} = h_{ft,a} + h_{ft,r}$

La hauteur géométrique totale $H_g = h_a + h_r$

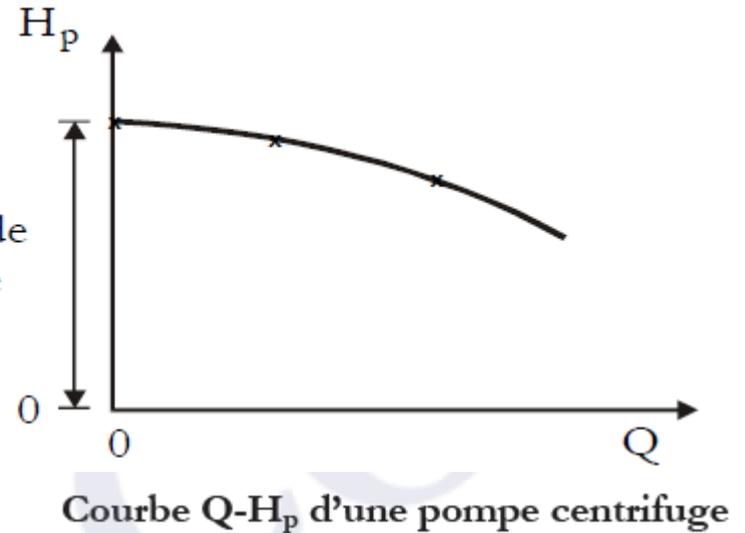
La hauteur manométrique $H_p = H_g + h_{fT}$

Courbes caractéristiques d'une pompe



$$H_p = \frac{P_s - P_e}{\rho g}$$

Hauteur de fermeture



Un débitmètre, de type Venturi par exemple, mesure le débit qui correspond à une valeur donnée de H_p

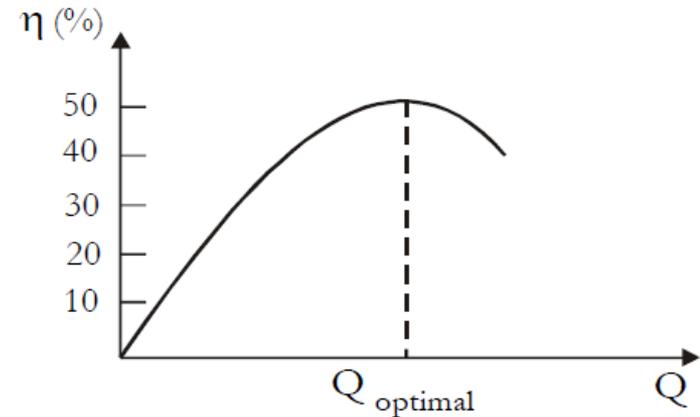
débit de fonctionnement la vanne de contrôle du débit est complètement ouverte

$$Q_{\text{fonctionnement}}/3, 2(Q_{\text{fonctionnement}}/3) \text{ et } Q_{\text{fonctionnement}}$$

Courbe de rendement

$$\eta = \frac{\rho g Q H_p}{P_{\text{absorbée}}}$$

$$\eta = (\text{puissance hydraulique fournie}) / (\text{puissance absorbée})$$



s'assurer que le débit d'opération soit le plus proche possible du débit optimal

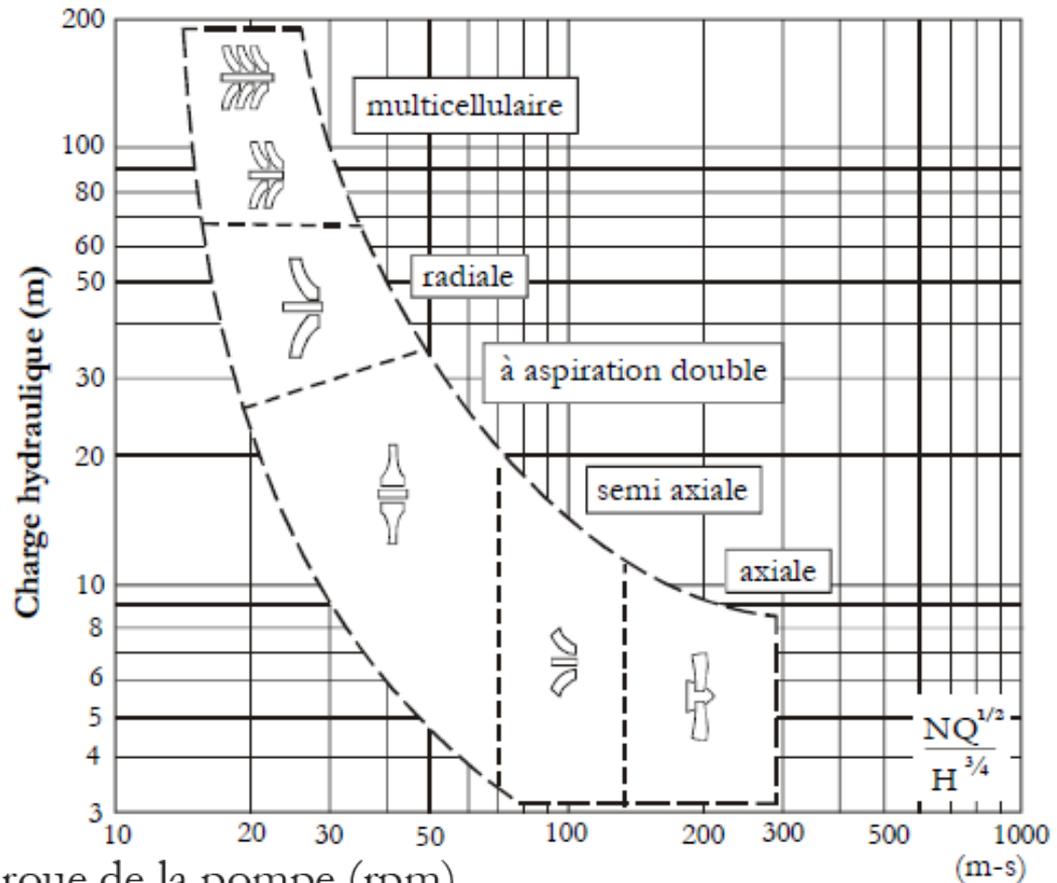
Les pompes à haute pression ou à fort débit 90%

Les pompes à basse pression ou à faible débit 40%

Vitesse spécifique

La vitesse spécifique n_s (nombre de Brauer)

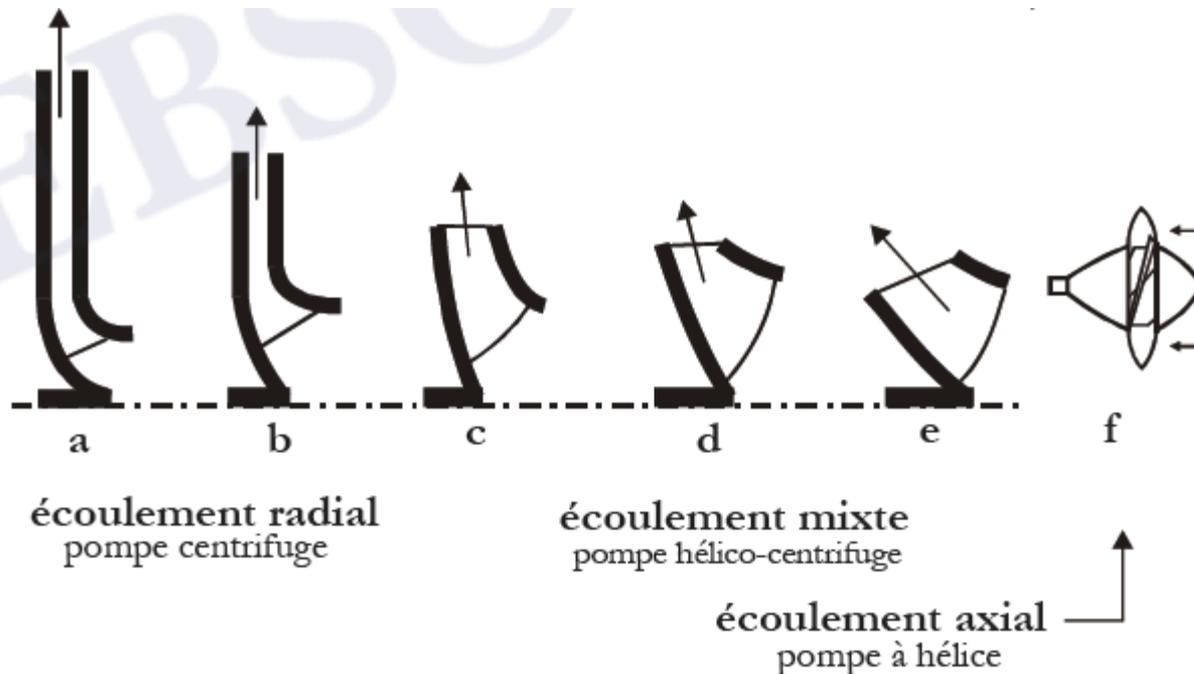
$$n_s = \frac{NQ^{1/2}}{H^{3/4}}$$

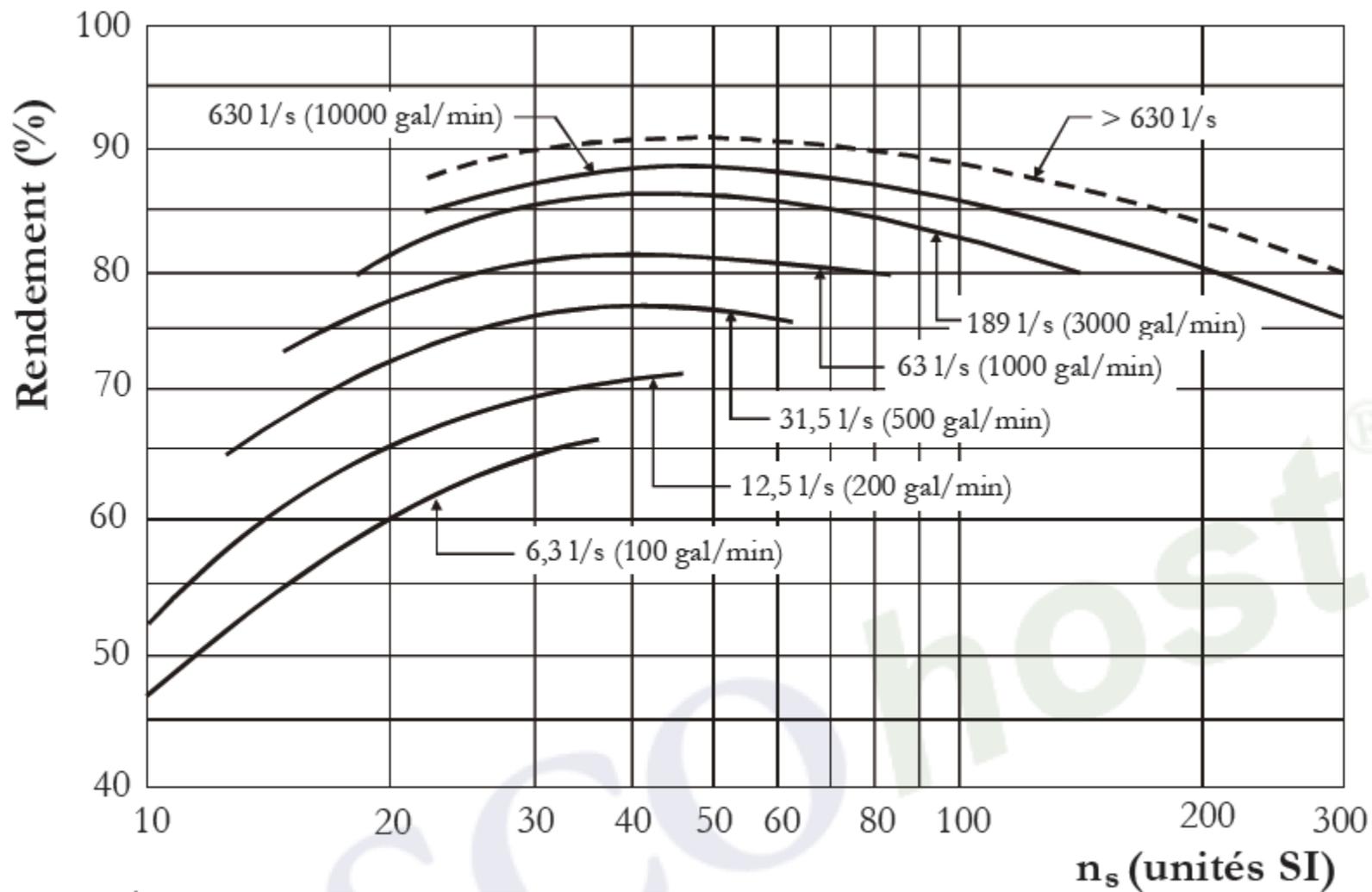


N est la vitesse de rotation de la roue de la pompe (rpm),
Q est le débit optimal de la pompe (m^3/s),
H est la hauteur manométrique correspondant au débit optimal (m).

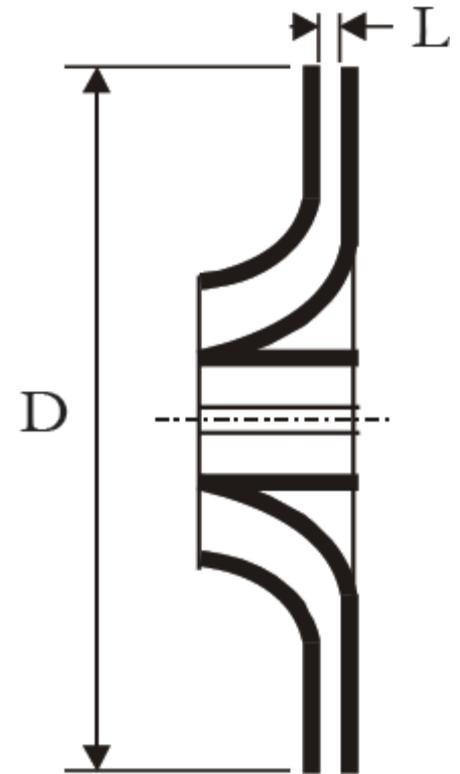
n_s est indépendante de la vitesse réelle de rotation

pompes de grande vitesse spécifique ($n_s > 170$) fonctionnent avec une hauteur d'élevation faible Ces pompes sont généralement à écoulement axial





Les pompes semblables possèdent un comportement hydraulique similaire résultant de leur forme géométrique. Les propriétés géométriques prises en considération sont le diamètre D de la roue et la largeur L de la sortie, tel que montré sur la figure



(Dupont, 1988).

Deux pompes semblables d'un même groupe voient leurs propriétés géométriques obéir à un facteur d'homothétie λ tel que :

$$\lambda = \frac{D_1}{D_2} = \frac{L_1}{L_2}$$

Application 3.1

On désire pomper un débit de 15 litres par seconde à une hauteur d'élévation de 20,0m incluant les pertes de charge. La vitesse de rotation du moteur qui entraîne la pompe est de 1460 tours par minute. Quel type de pompe devrait-on utiliser?

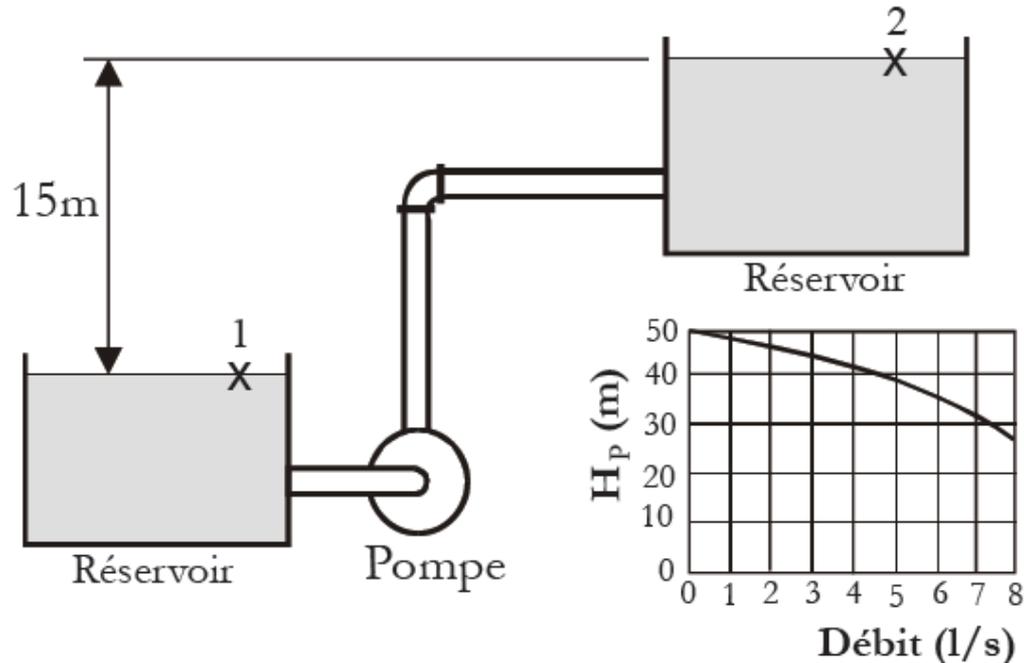
Application 3.1

On désire pomper un débit de 15 litres par seconde à une hauteur d'élévation de 20,0m incluant les pertes de charge. La vitesse de rotation du moteur qui entraîne la pompe est de 1460 tours par minute. Quel type de pompe devrait-on utiliser?

la vitesse spécifique $n_s = 18$. La figure montre qu'une pompe radiale doit être utilisée

confirme ce choix en précisant le rendement de 70%

Point de fonctionnement



La conduite a une longueur totale de 1000m et un diamètre de 75mm possède un coefficient de Hazen-Williams de 130 en acier

Il faut déterminer le débit que va délivrer cette pompe.

Le point de fonctionnement de la pompe est donné par le couple (Q, H_p)

auquel la pompe va opérer une fois insérée dans le système

perte de temps due au montage

l'équation de Bernoulli

$$H_p = H_g + 10,675 L \left(\frac{Q}{C_{HW}} \right)^{1,852} \frac{1}{D^{4,87}}$$

(En négligeant les pertes singulières. On ne retenant que
Les frottements données par la formule de Hazen-Williams)

$H_p = 15m + 390,66 \cdot 10^3 \cdot Q^{1,852}$ deux inconnues Q et H_p

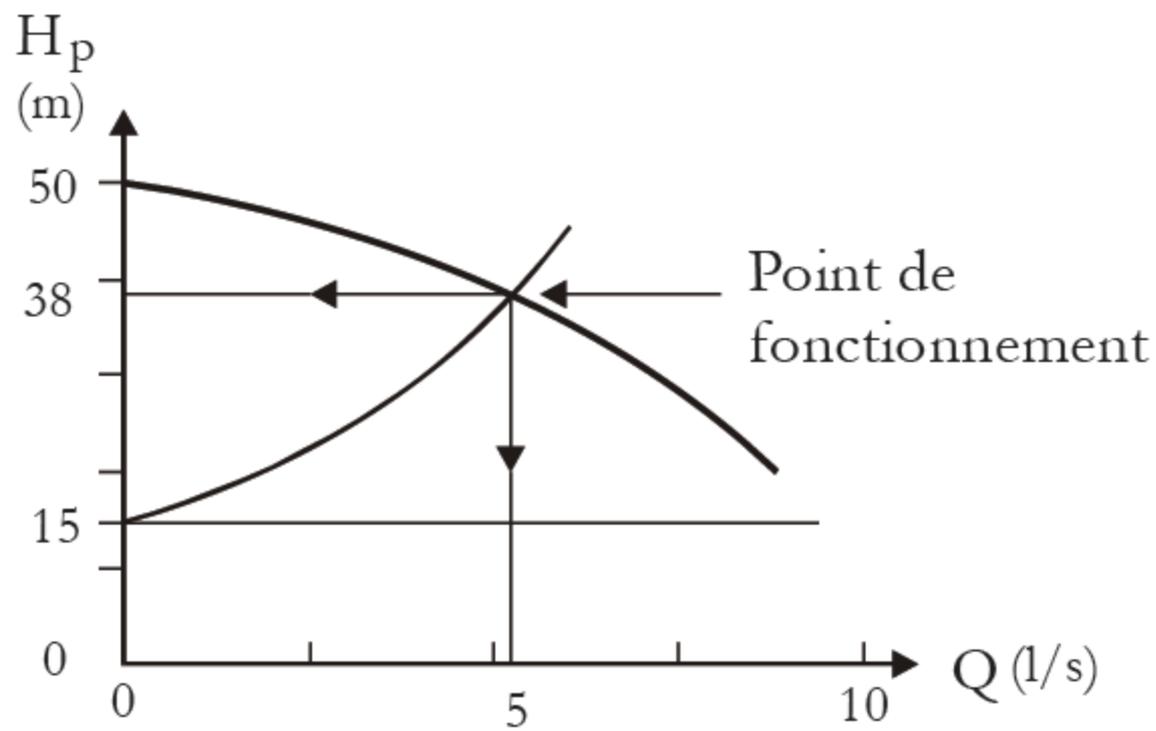
peut être résolue graphiquement ou numériquement

Solution graphique

$$f(Q) = 15 + 390,66 \cdot 10^3 Q^{1,852}. \quad H_p = H_p(Q)$$

fonctions sont superposées sur le graphe

Le point de fonctionnement est donc $Q = 5,25$ l/s et $H_p = 38m$.



Application 3.4

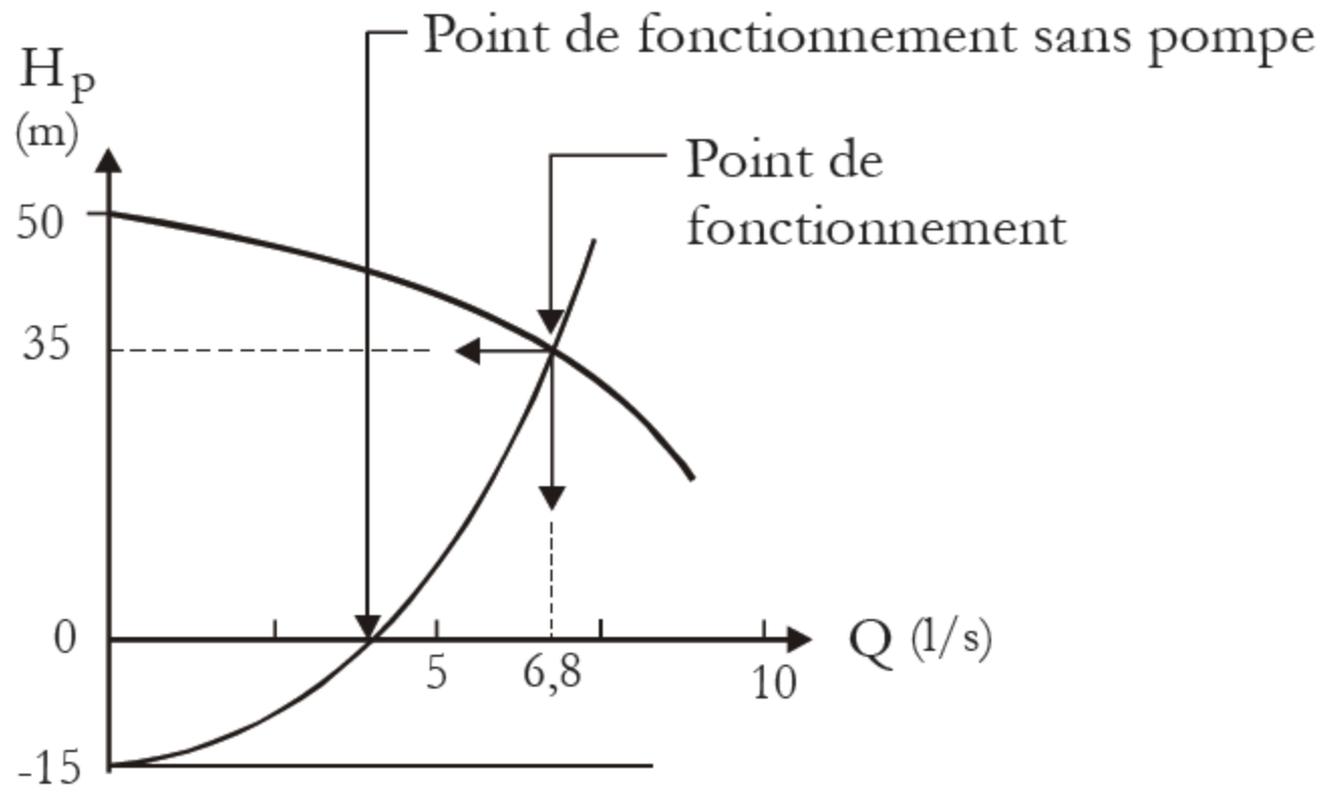
Il s'agit de refaire le problème précédent en supposant que l'écoulement doit se faire dans le sens inverse, soit du réservoir 2 vers le réservoir 1

Application 3.4

Il s'agit de refaire le problème précédent en supposant que l'écoulement doit se faire dans le sens inverse, soit du réservoir 2 vers le réservoir 1. Dans ce cas, l'équation de Bernoulli s'écrit :

$$H_p + H_g = h_f \text{ ou } H_p = h_f - H_g.$$

La figure 3.14 illustre la dernière équation. L'énergie de la pompe et de la gravité s'additionnent pour équilibrer le frottement.



Solution numérique

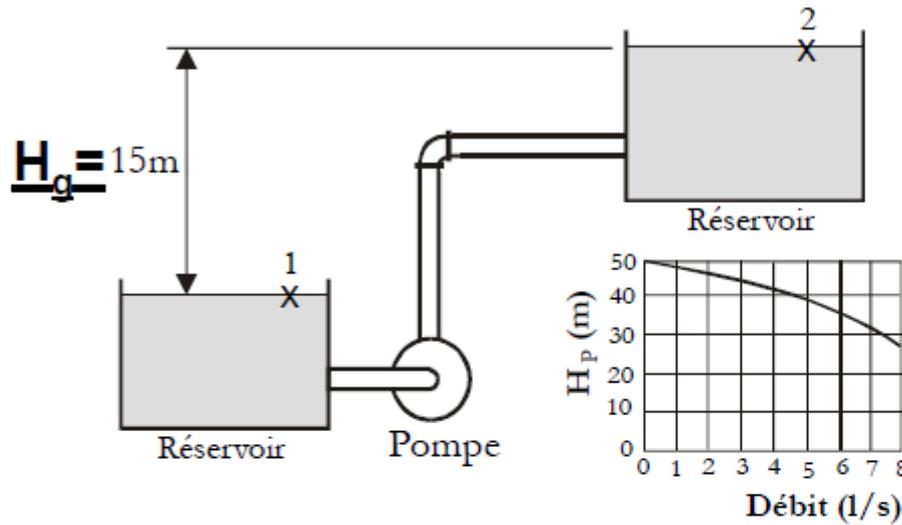
Une telle solution consiste à relever au moins trois couples (Q, H) sur la courbe caractéristique de la pompe : $(Q = 0, H = H_{\text{fermeture}})$ et deux autres points assez distancés. Ces trois couples sont ensuite utilisés pour trouver les coefficients a , b et n de la fonction suivante :

$$H_p = a + bQ^n \quad (3.16)$$

En l'occurrence, $a = 50$, $b = -1,0$ et $n = -0,5150$.

On peut maintenant résoudre (3.15) numériquement en remplaçant H_p par $15 + 390,66 \cdot 10^3 \cdot Q^{1,852}$ dans (3.16).

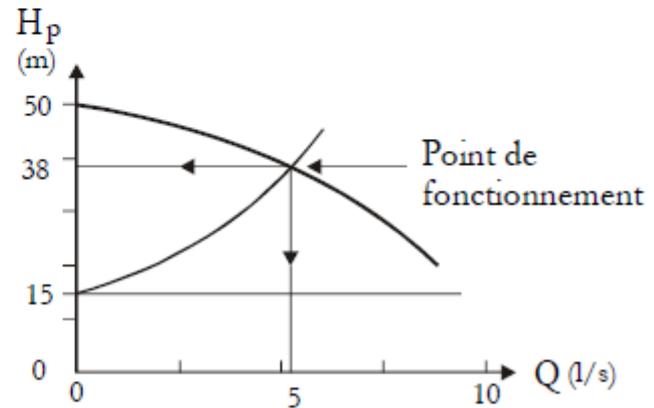
Point de fonctionnement



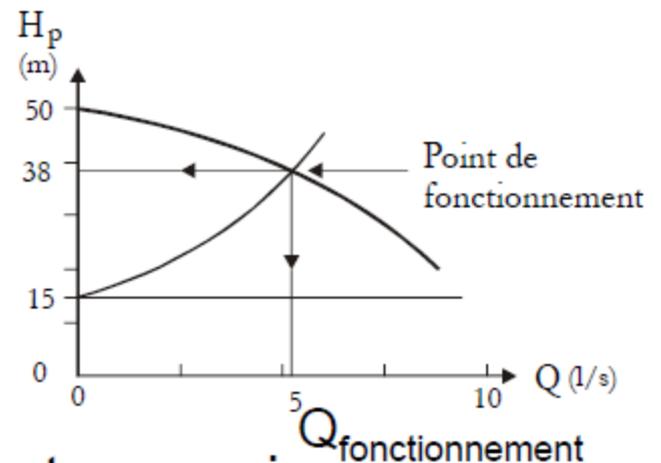
$$H_p = H_g + 10,675 L \left(\frac{Q}{C_{HW}} \right)^{1,852} \frac{1}{D^{4,87}}$$

$$H_p = 15\text{m} + 390,66 \cdot 10^3 \cdot Q^{1,852}$$

$$Q = 5,25 \text{ l/s et } H_p = 38\text{m}$$



Ajustement du point de fonctionnement:



Les 3 possibilités suivantes peuvent survenir:

Cas 1 : $Q_{\text{recherché}} = 5,25 \text{ l/s} = Q_{\text{fonctionnement}} (5,25 \text{ l/s})$

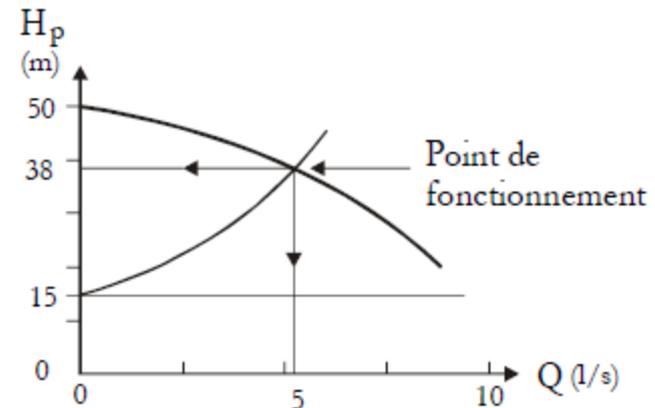
Cas 2 : $Q_{\text{recherché}} = 7 \text{ l/s} > Q_{\text{fonctionnement}} (5,25 \text{ l/s})$

Cas 3 : $Q_{\text{recherché}} = 4 \text{ l/s} < Q_{\text{fonctionnement}} (5,25 \text{ l/s})$

Ajustement du point de fonctionnement:

Cas 1 : $Q_{\text{fonctionnement}} (5,25 \text{ l/s}) = Q_{\text{recherché}} (5,25 \text{ l/s})$

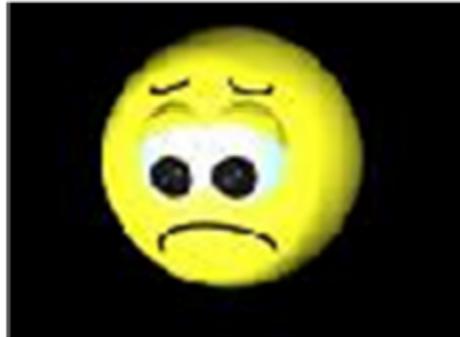
C'est la situation idéale, on s'assure d'avoir un rendement suffisant et qu'il y a absence de cavitation



Ajustement du point de fonctionnement:

Cas 2 : $Q_{\text{fonctionnement}} (5,25 \text{ l/s}) < Q_{\text{recherché}} (7 \text{ l/s})$

Si la durée de pompage est à son maximum il faut réviser le choix initial de la pompe et en choisir une de plus grande capacité.



Ajustement du point de fonctionnement:

Cas 3 : $Q_{\text{fonctionnement}} (5,25\text{l/s}) > Q_{\text{recherché}} (4 \text{ l/s})$

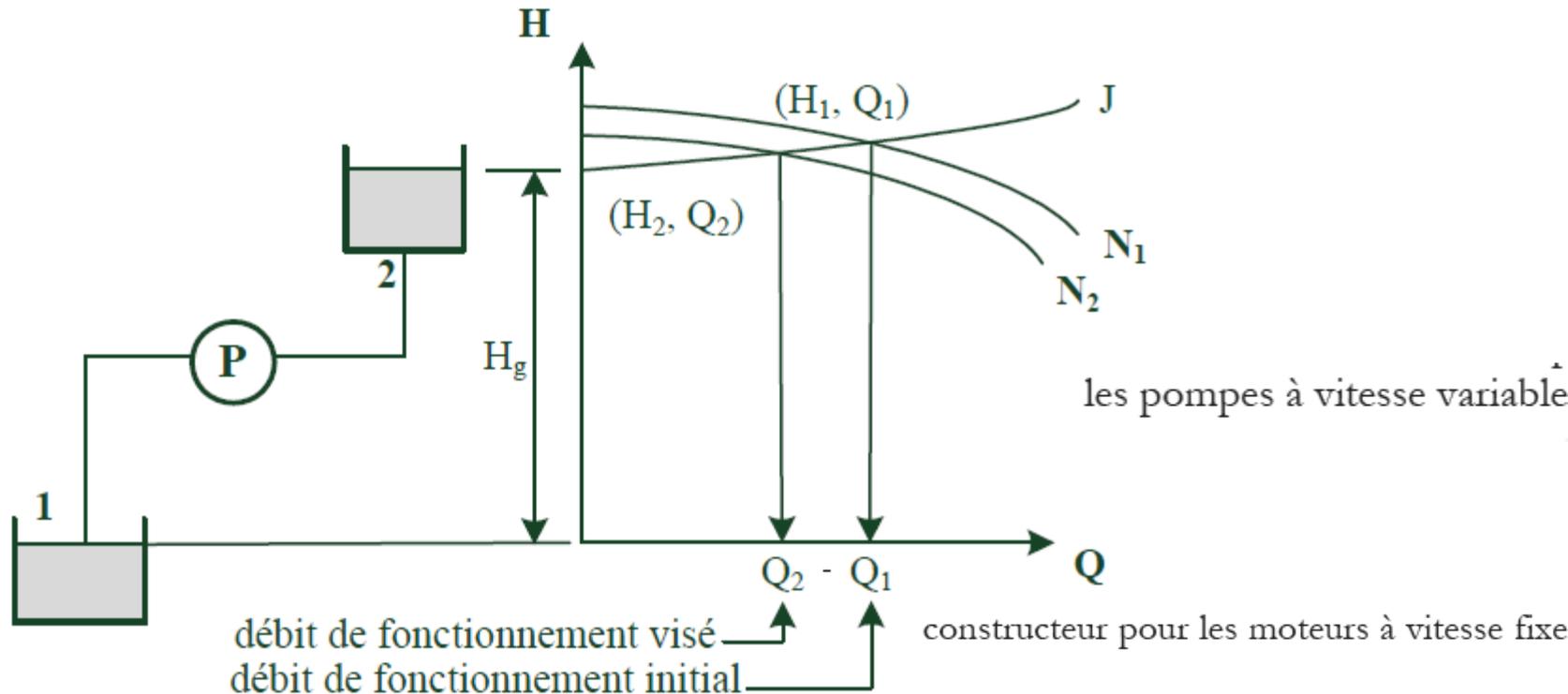
On peut modifier la **courbe caractéristique de la pompe**:

par **changement de la vitesse de rotation**

par **rognage**

ou modifier la **courbe caractéristique de la conduite** par vannage.

Réduction du débit par diminution de la vitesse de rotation



Affecte le moins le rendement de la pompe

Règles de similitude pour les vitesses de rotation

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2$$

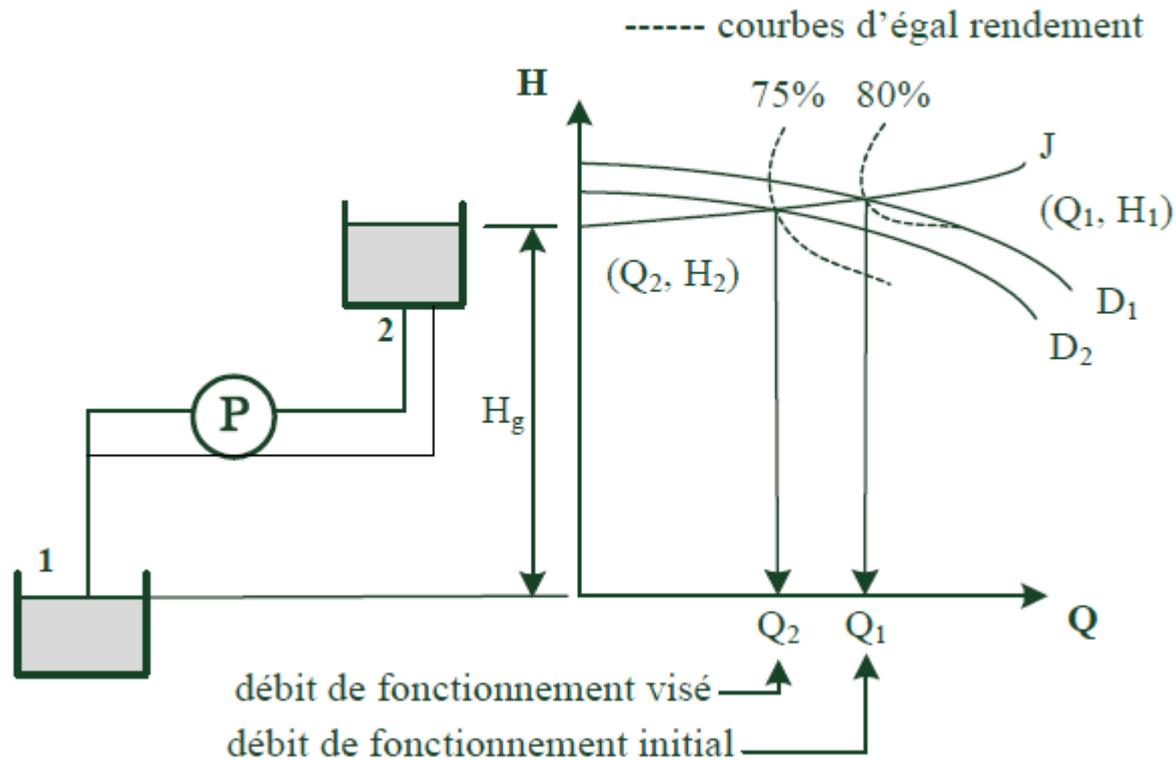
$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^3$$

Comment modifier la vitesse de rotation pour atteindre le débit visé?

- Le débit de fonctionnement est $Q_1 = 5,25$ l/s
- La vitesse de rotation du moteur est $N_1 = 1400$ RPM
- Le débit visé est $Q_2 = 4$ l/s
- Quelle est la vitesse N_2 qu'on devrait utiliser pour obtenir le débit visé?

- $N_2 = N_1 \cdot Q_2 / Q_1 = 1400 \cdot 4 / 5,25 = 1066,66 \text{ RPM}$
- $H_2 = (N_2/N_1)^2 * H_1 = (1066,66/1400)^2 * 38 = 22,6 \text{ m}$

Réduction du débit par diminution du diamètre du rotor



au deuxième rang

la diminution du rendement de la pompe.

Règles de similitude pour rognage d'une pompe

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2$$

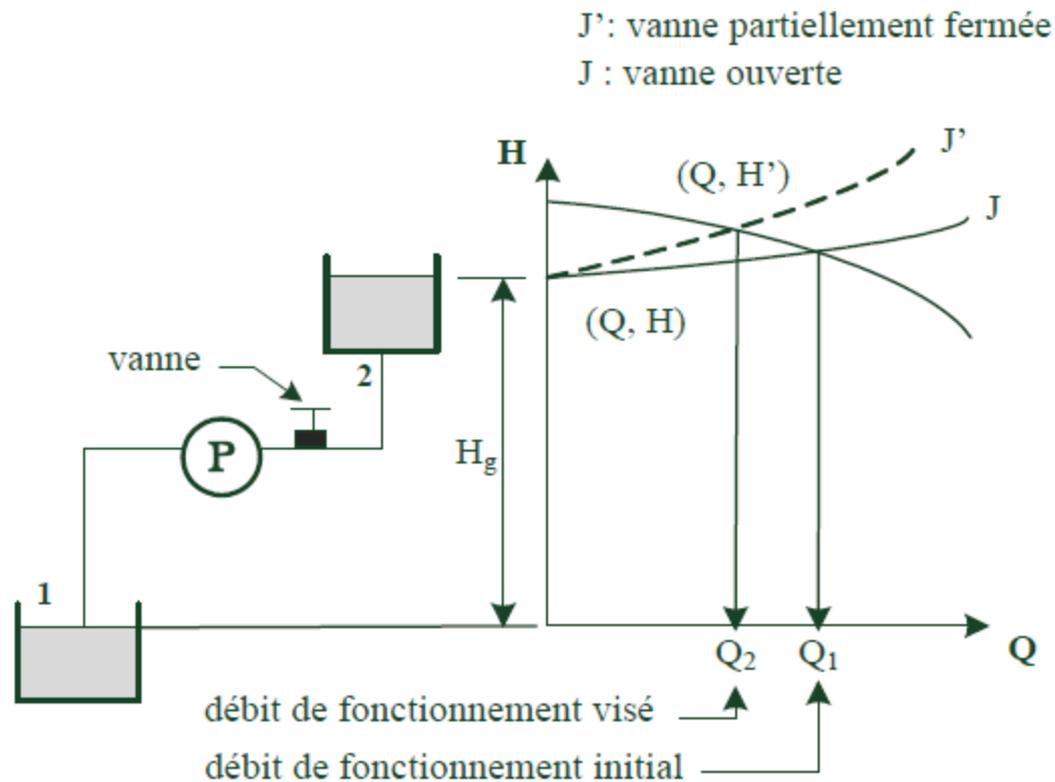
$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^4$$

Comment réduire le diamètre du rotor pour atteindre le débit visé?

- Le débit de fonctionnement est $Q_1 = 5,25 \text{ l/s}$
- Le diamètre du rotor actuel est $D_1 = 13 \text{ cm}$
- Le débit visé est $Q_2 = 4 \text{ l/s}$
- Quel est le diamètre du rotor D_2 qu'on devrait utiliser pour obtenir le débit visé?

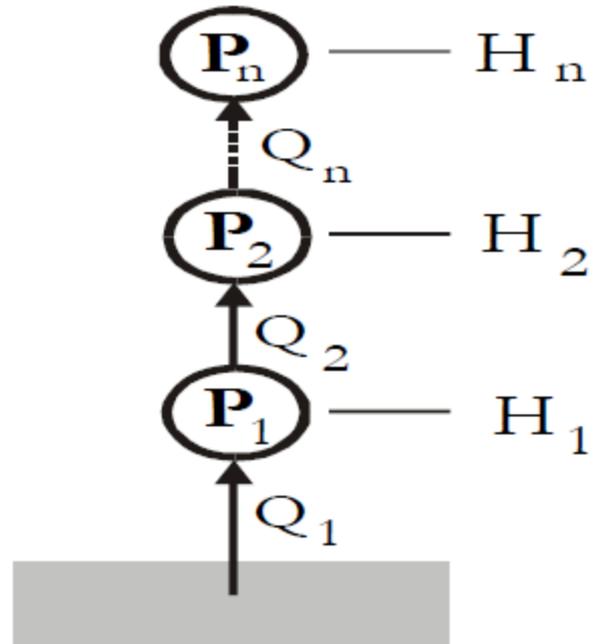
- $D_2 = D_1 \cdot (Q_2 / Q_1)^{0,5} = 13 * (4 / 5,25)^{0,5} = 11,35 \text{ cm}$
- $H_2 = (D_2 / D_1)^2 * H_1 = (11,35 / 13)^2 * 38 = 28,95 \text{ m}$

Réduction du débit par vannage



la plus défavorable du point de vue rendement

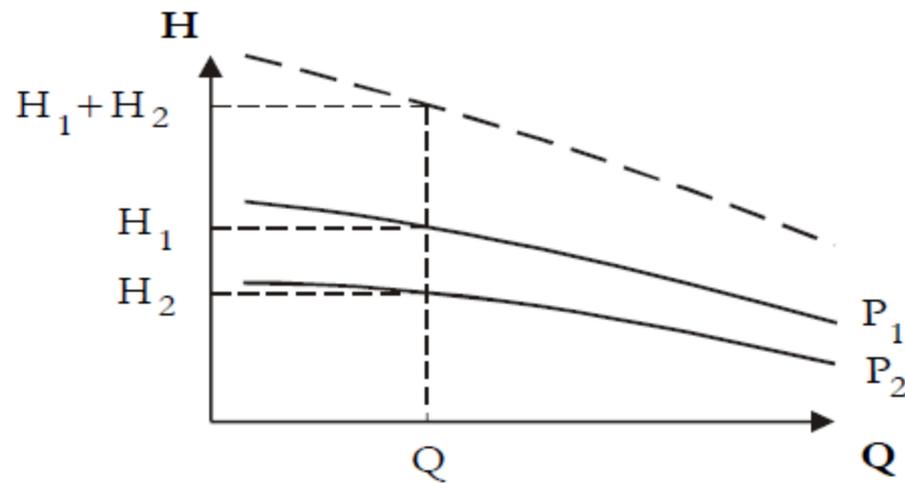
Pompes en série



$$Q_1 = Q_2 \dots = Q_n$$

$$H_T = H_1 + H_2 + \dots + H_n$$

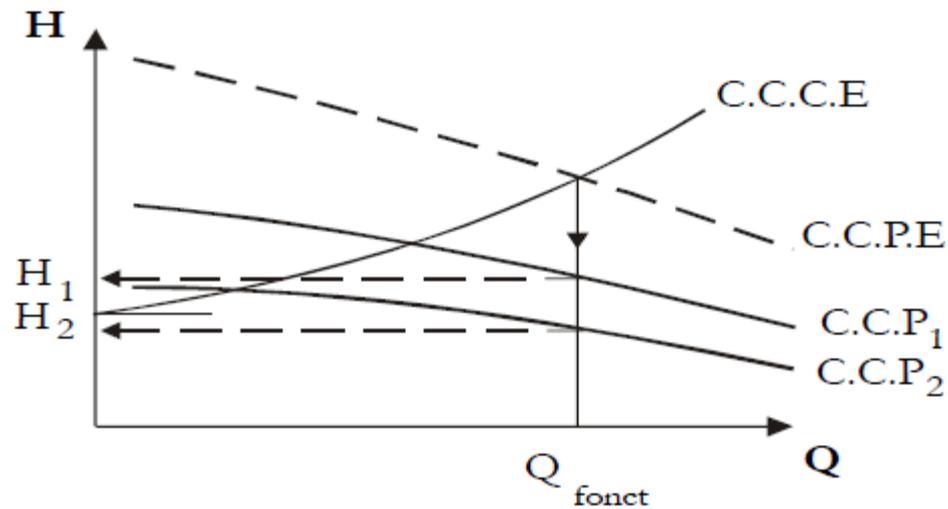
C.C.E des pompes en série



$$Q_1 = Q_2 \dots = Q_n$$

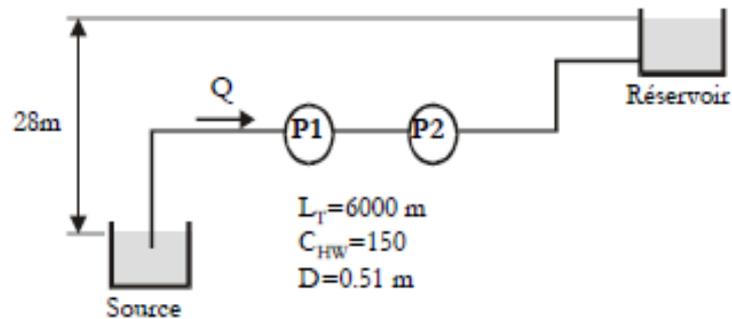
$$H_T = H_1 + H_2 + \dots + H_n$$

Point de fonctionnement pour des pompes en série



$$P_T = \rho g Q_{\text{fonct}} \left(\frac{H_1}{\eta_1} + \frac{H_2}{\eta_2} + \dots + \frac{H_n}{\eta_n} \right)$$

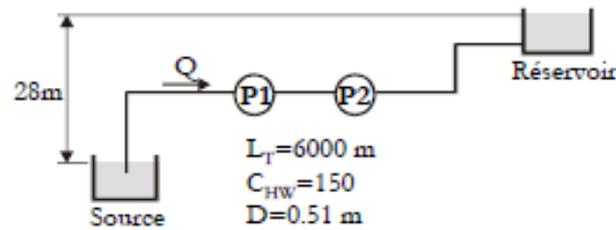
Pompes en série



Débit (l/s)	0	10	20	30	40	50	60	70	80
H_p (m)	22	21,75	20	19	17,5	16	14	11	8
η (%)	0	25	50	70	80	82	80	70	65

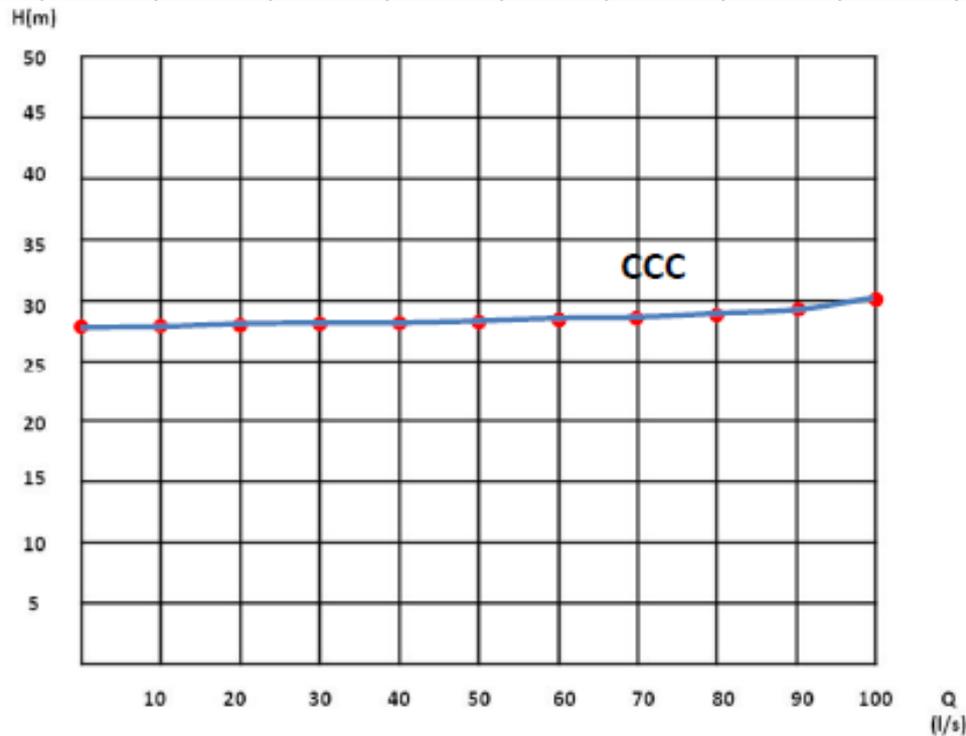
1. Trouver le débit de fonctionnement et la hauteur manométrique pour chaque pompe.

Pompes en série

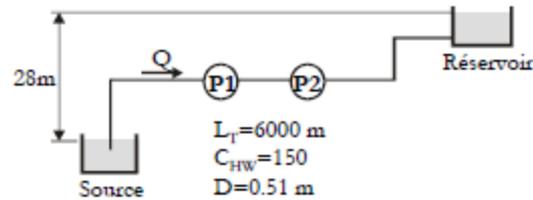


Négligeant les pertes singulières :
$$h_f = 6000 \cdot \left(\frac{3,59}{150} \right)^{1,852} \cdot \frac{Q^{1,852}}{0,51^{4,87}} = 158,57 \cdot Q^{1,852}$$

Q(l/s)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$H_g + h_f$ (m)	28	28,03	28,11	28,24	28,41	28,62	28,87	29,15	29,14	29,83	30,23



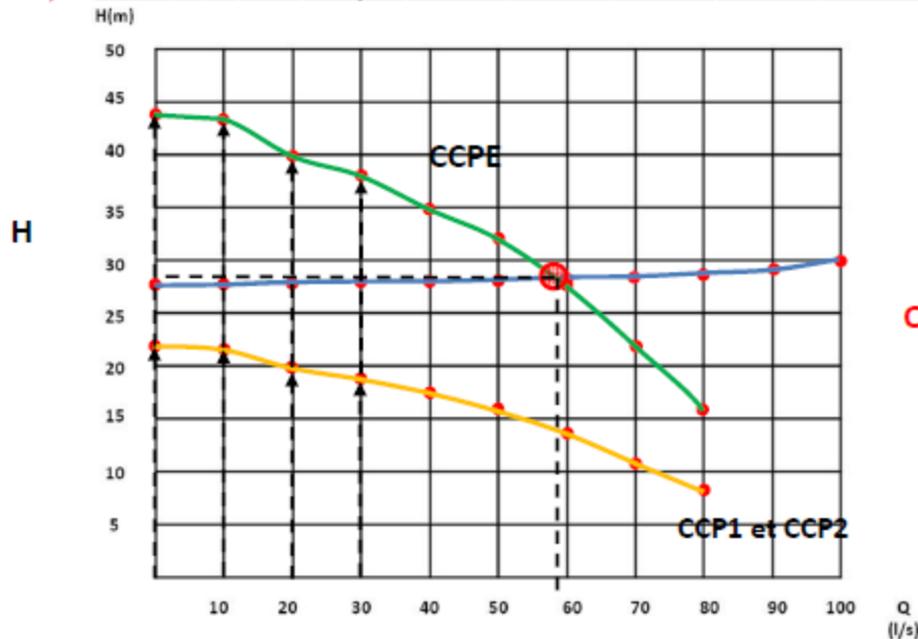
Pompes en série



Q (l/s)	0	10	20	30	40	50	60	70	80
H_{P_1} (m)	22	21,75	20	19	17,5	16	14	11	8

Pompes en série : $H_p = H_{P_1} + H_{P_2}$ et $Q = Q_1 = Q_2$

Q (l/s)	0	10	20	30	40	50	60	70	80
H_p (m)	44	43,4	40	38	35	32	28	22	16



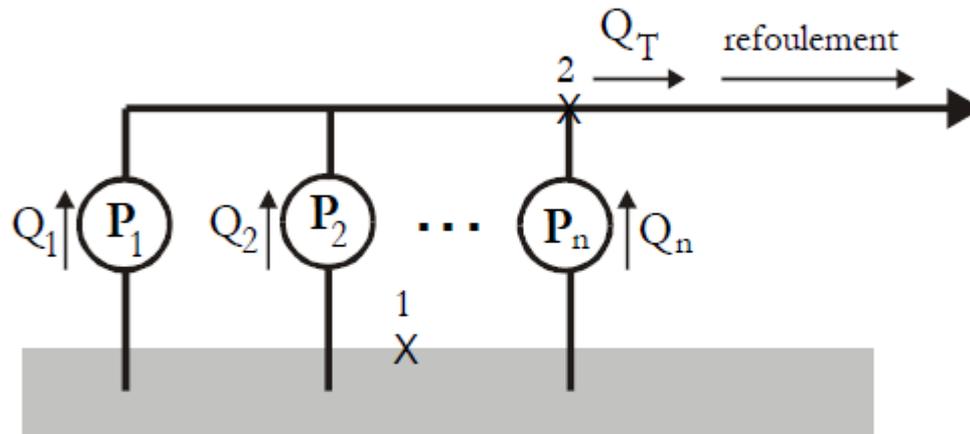
Point de fonctionnement :

$$Q_p = 58 \text{ l/s} ; H_p = 28.5 \text{ m}$$

Point de fonctionnement de
chaque pompe:

$$Q_{p_i} = Q_p = 58 \text{ l/s} ; H_{p_i} = H_p / 2 = 14.25 \text{ m}$$

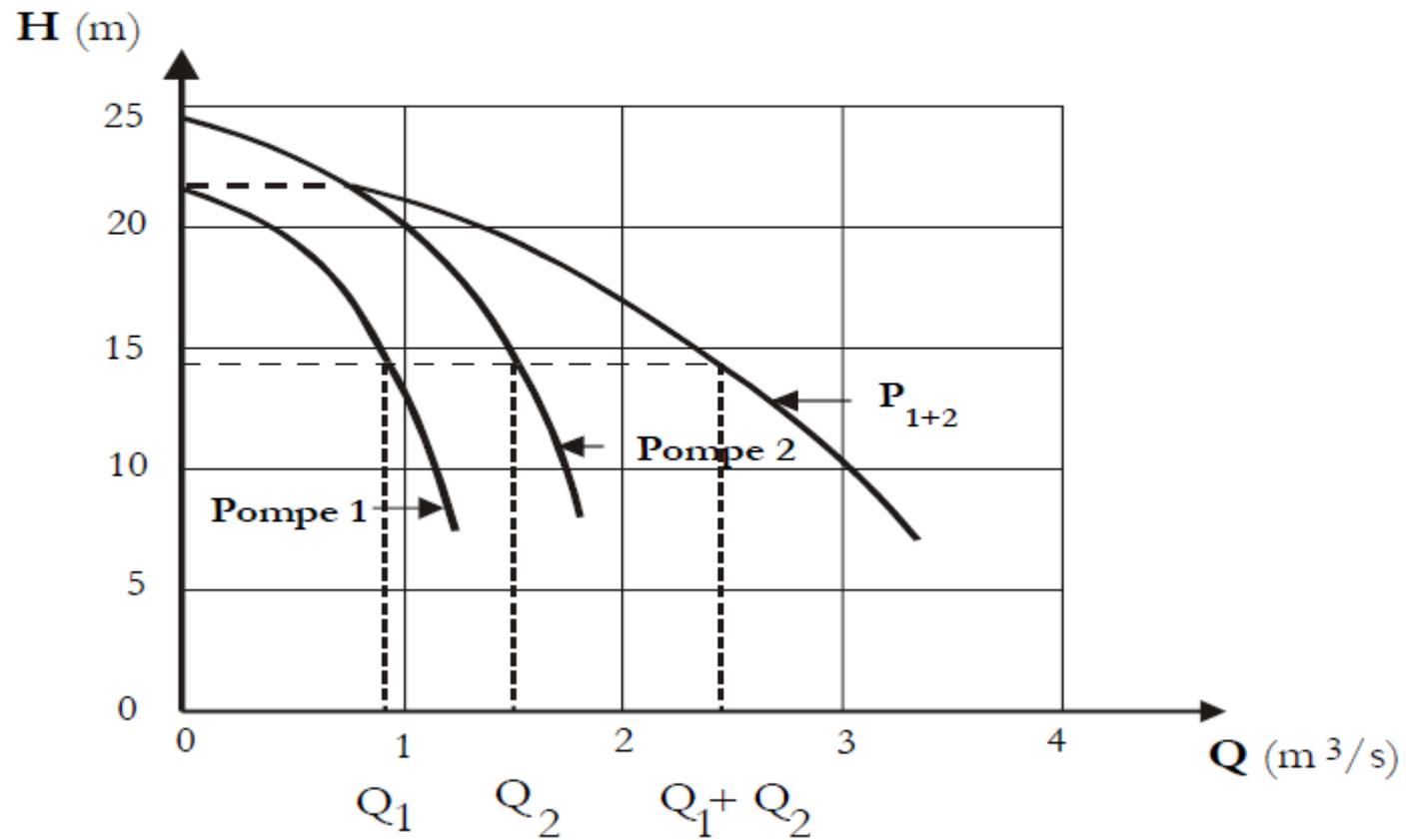
fonctionnement des pompes en parallèle



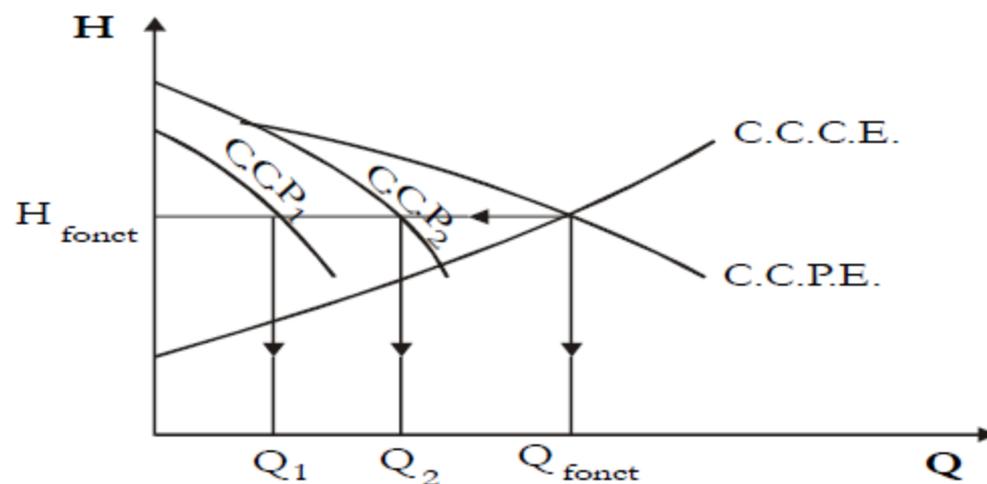
$$Q_T = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n$$

$$H_1 = H_2 = \dots = H_n$$

Courbe caractéristique des pompes en parallèle

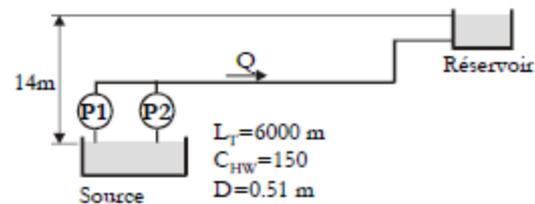


Point de fonctionnement des pompes en parallèle



$$P_T = \rho g H_{fonct} \left(\frac{Q_1}{\eta_1} + \frac{Q_2}{\eta_2} + \dots + \frac{Q_n}{\eta_n} \right)$$

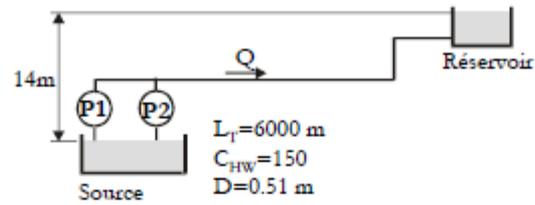
Pompes en parallèle



Débit (l/s)	0	10	20	30	40	50	60	70	80
H_p (m)	22	21,75	20	19	17,5	16	14	11	8
η (%)	0	25	50	70	80	82	80	70	65

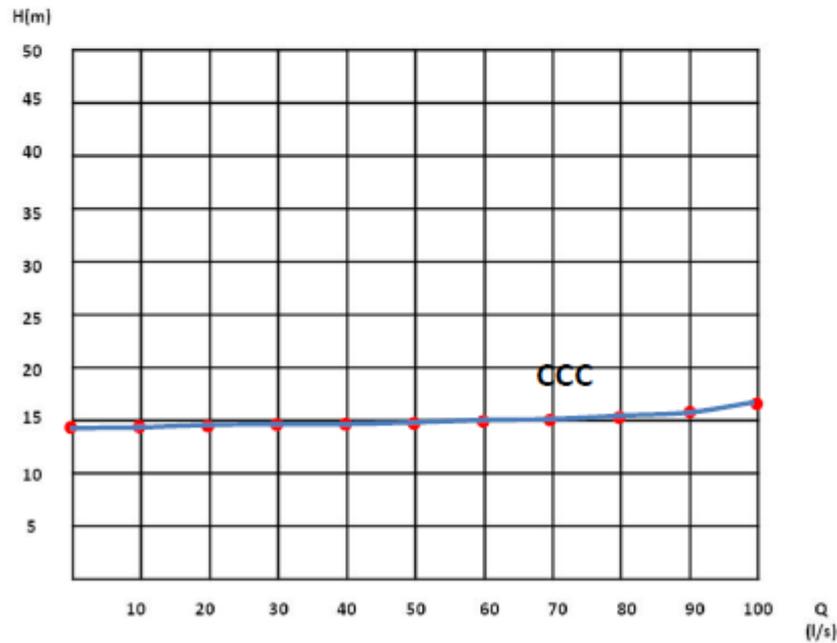
1. Trouver le débit de fonctionnement et la hauteur manométrique pour chaque pompe.

Pompes en parallèle

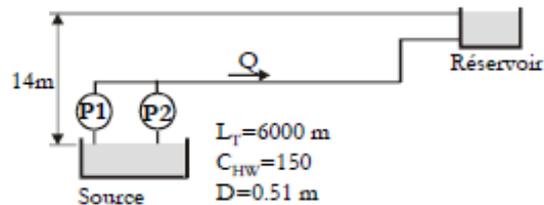


Négligeant les pertes singulières :
$$h_f = 6000 \cdot \left(\frac{3,59}{150} \right)^{1,852} \cdot \frac{Q^{1,852}}{0,51^{4,87}} = 158,57 \cdot Q^{1,852}$$

Q(l/s)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$H_g + h_f$ (m)	14	14,03	14,11	14,24	14,41	14,62	14,87	15,15	15,14	15,83	16,23



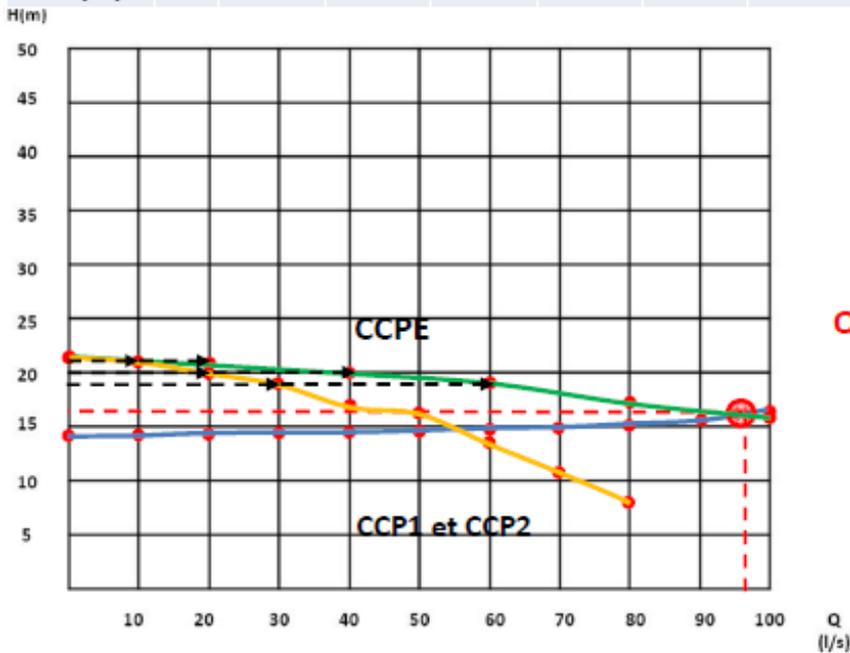
Pompes en parallèle



Q (l/s)	0	10	20	30	40	50	60	70	80
H_{p_1} (m)	22	21,75	20	19	17,5	16	14	11	8

Pompes en parallèle : $H_P = H_{P_1} = H_{P_2}$ et $Q = Q_1 + Q_2$

Q (l/s)	0	20	40	60	80	100	120	140	160
H_p (m)	22	21,75	20	19	17,5	16	14	11	8



Point de fonctionnement :

$$Q_p = 97 \text{ l/s} ; H_p = 16.1 \text{ m}$$

Point de fonctionnement de
chaque pompe:

$$Q_{p_i} = Q_p / 2 = 48.5 \text{ l/s} ; H_{p_i} = H_p = 16.1 \text{ m}$$

Choix des Pompes

- ❑ Une station de pompage comprend plusieurs pompes placées en série et en parallèle.
 - ✓ - Variation du débit maximal dépendamment de la variation horaire et saisonnière. (Pompes placées en parallèle)
 - ✓ - Hauteur de relèvement est très importante (dépasse 100 mètres), le pompes multicellulaires s'imposent

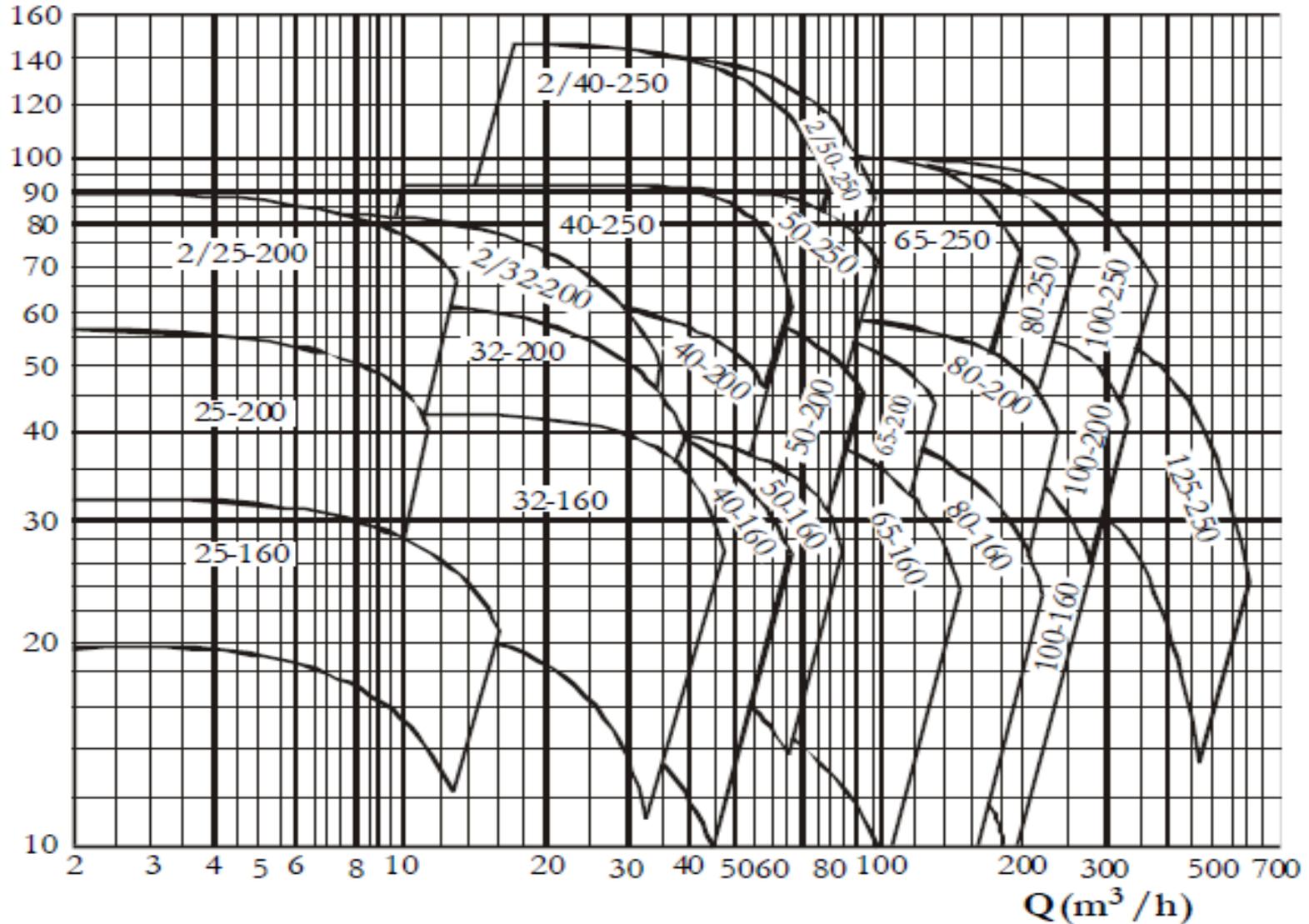
- ❑ Le constructeur offre sur le marché une grande gamme de types de pompes.
 - ✓ Différentes débits et hauteur manométriques.

Le choix de la combinaison des pompes avec le meilleur rendement se fait à l'aide d'abaques (hauteur manométrique (où le rendement est admissible))

Les chiffres utilisés pour désigner le type de pompe, exemple 2/32-200

2 Nombre d'étages, 32 diamètre nominal de la tubulure de refoulement,
200 diamètre nominal de la roue

H (m)



Cavitation dans les pompes

Problème de cavitation:

La cavitation peut varier de très légère à très forte : dans le premier cas le seul effet est une baisse de l'efficacité ; dans le deuxième cas une forte cavitation peut briser l'impulseur de la pompe ou d'autres parties (voir photos) .

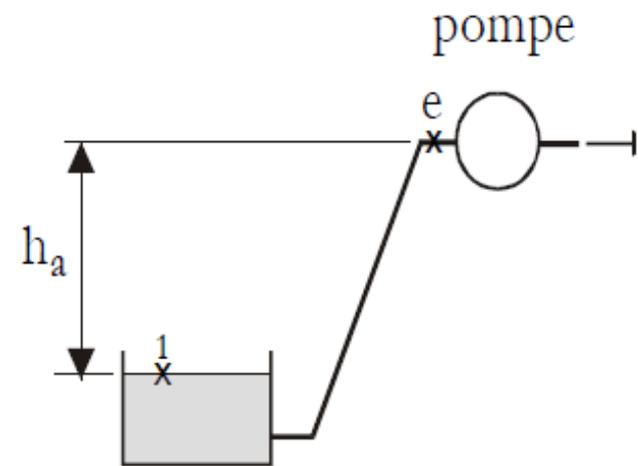


Pompages en dépression

- 1) l'eau à pomper se trouve à un point plus bas que le niveau de la pompe (puits, lac, rivière...) comme sur la figure 3.18 (1); on dit alors que le pompage se fait en dépression,

$$\left(\frac{P_{\text{atm}}}{\rho g}\right)_{\text{abs}} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} = \left(\frac{P_e}{\rho g}\right)_{\text{abs}} + z_e + \frac{V_e^2}{2g} + h_{\text{ft,a}}$$

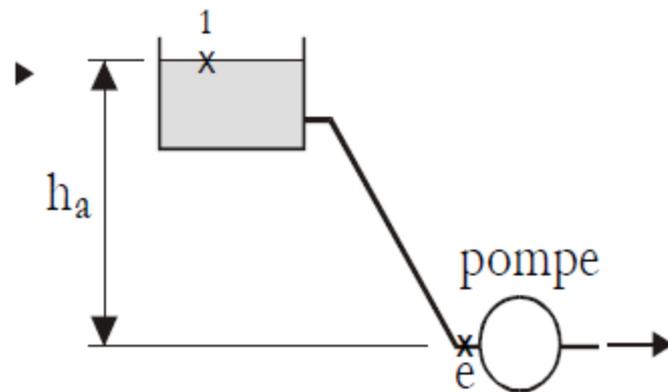
où P_e , z_e et V_e désignent respectivement la pression, l'énergie potentielle et la vitesse à l'entrée de la pompe, $h_{\text{ft,a}}$ désigne la charge totale perdue par frottement et dans les singularités du côté aspiration.



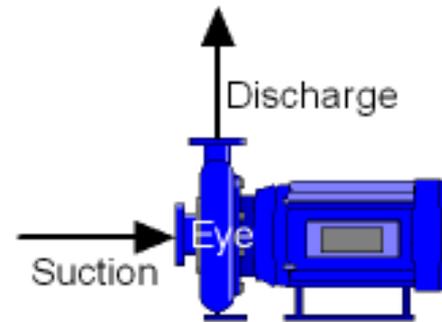
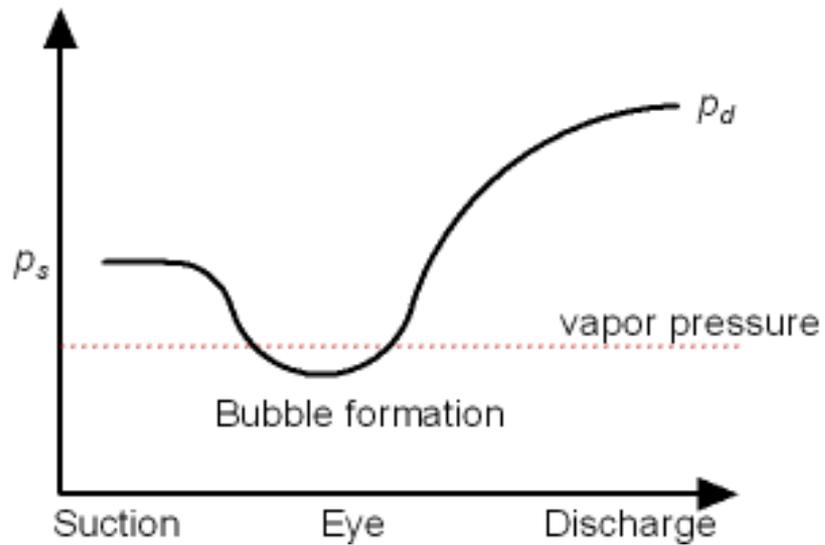
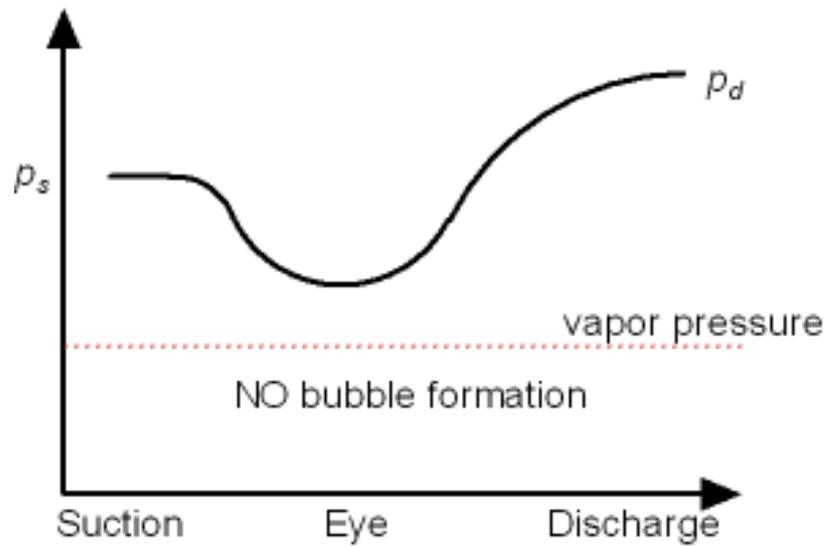
(1) pompage en dépression

Pompages en surpression

l'eau à pomper se trouve à un point plus haut que le niveau de la pompe, comme sur la figure 3.18 (2); on dit dans ce cas que le pompage se fait en surpression.



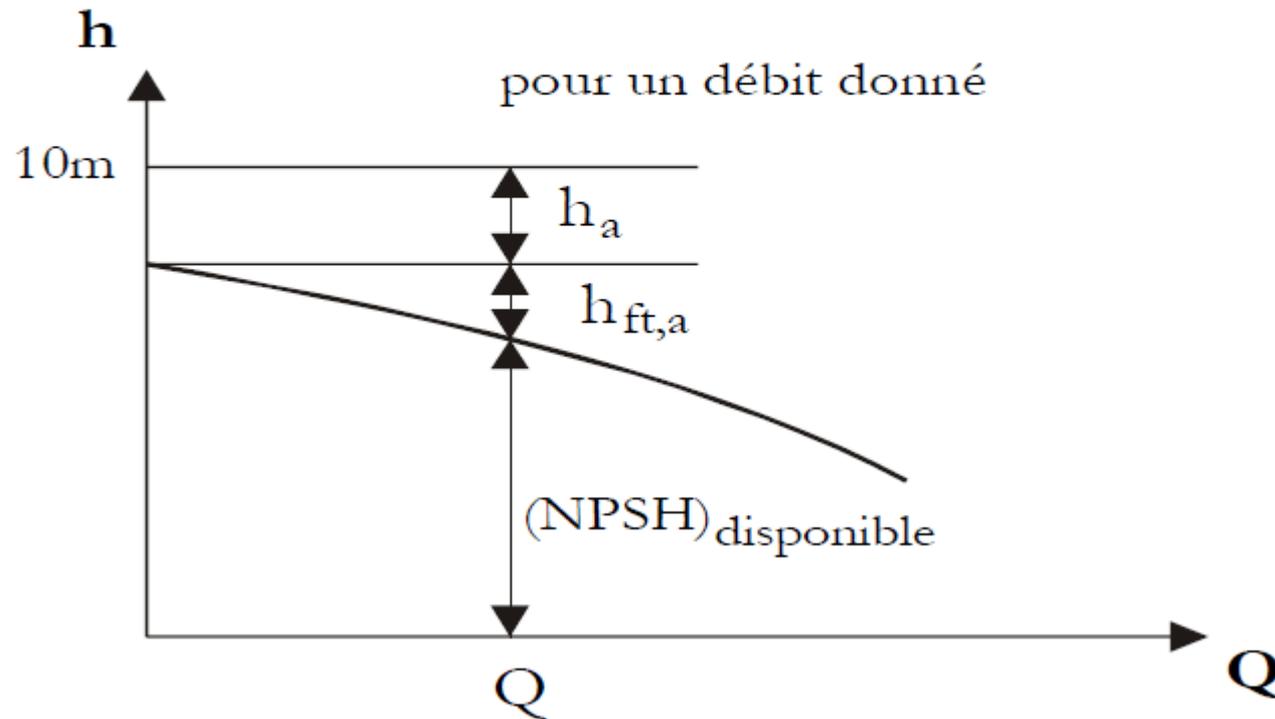
(2) pompage en surpression



Variation de la pression de vapeur avec la température de l'eau

Température °C	Pression de vapeur kN/m ² , abs
0	0.61
5	0.87
10	1.23
15	1.70
20	2.34
25	3.17
30	4.24
40	7.38
50	12.33
60	19.92
70	31.16
80	47.34
90	70.10
100	101.33

Cavitation: NPSH pour pompage en dépression



NPSH (Net Positive Suction Head)

Calcul du NPSH_{disponible}

$$\left(\frac{P_{atm}}{\rho g}\right)_{abs} + Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} = \left(\frac{P_e}{\rho g}\right)_{abs} + Z_e + \frac{V_e^2}{2g} + h_{ft,a}$$

$$\left(\frac{P_e}{\rho g}\right)_{abs} = \left(\frac{P_{atm}}{\rho g}\right)_{abs} - h_a - \frac{V_e^2}{2g} - h_{ft,a}$$

$$(NPSH)_{disponible} = \left(\frac{P_e}{\rho g}\right)_{abs} - \frac{P_v}{\rho g} = \left(\frac{P_{atm}}{\rho g}\right)_{abs} - h_a - \frac{V_e^2}{2g} - h_{ft,a} - \frac{P_v}{\rho g}$$

$$\frac{P_{atm}}{\rho g} = 10,33 \text{ m (eau)}$$

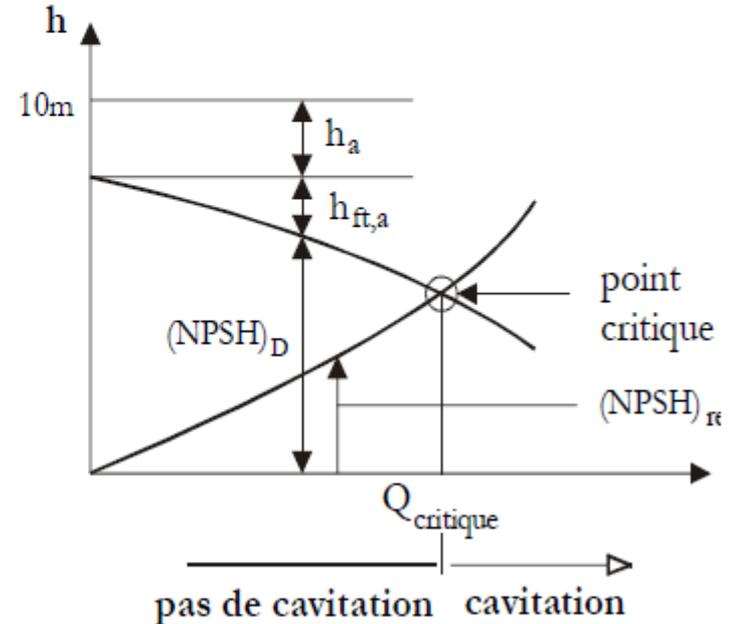
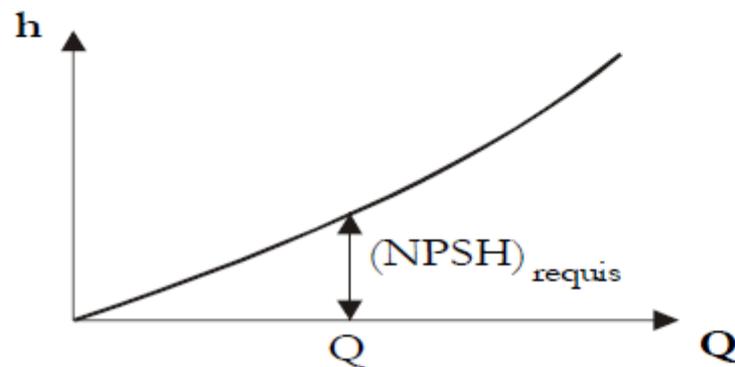
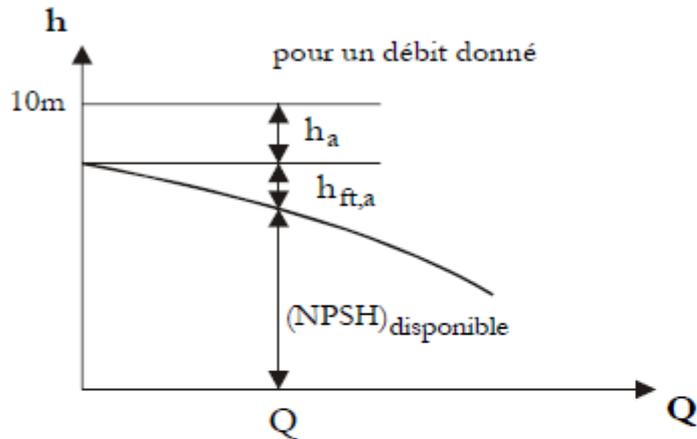
$$\frac{P_v}{\rho g} = 0,24 \text{ m (eau)}$$

$$(NPSH)_{disponible} = 10,09 \text{ m} - \frac{V_e^2}{2g} - h_a - h_{ft,a}$$

$$(NPSH)_{disponible} = 10 \text{ m} - h_a - h_{ft,a}$$

Température = 20°

NPSH disponible et NPSH requis



Formule générale pour le calcul du NPSH DISPONIBLE

$$(\text{NPSH})_{\text{disponible}} = 10\text{m} - h_a - h_{\text{ft},a}$$

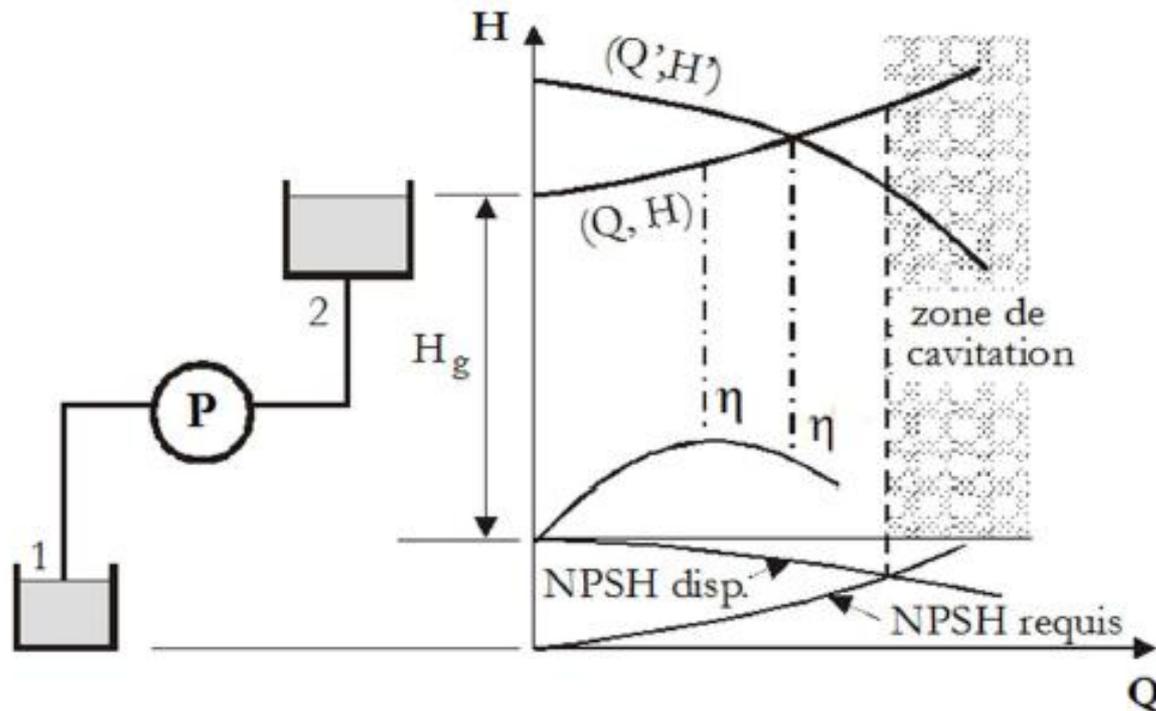
$$\text{NPSH} = 10\text{m} + h_a - h_{\text{ft},a}$$

$$\text{NPSH} = 10\text{m} \pm h_a - h_{\text{ft},a}$$

Acceptation du point de fonctionnement

2 critères à vérifier:

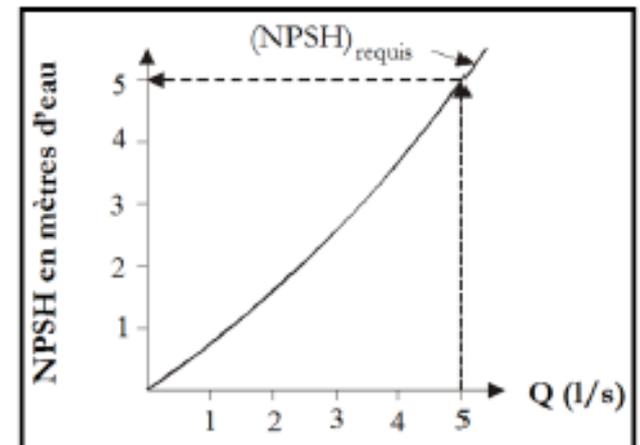
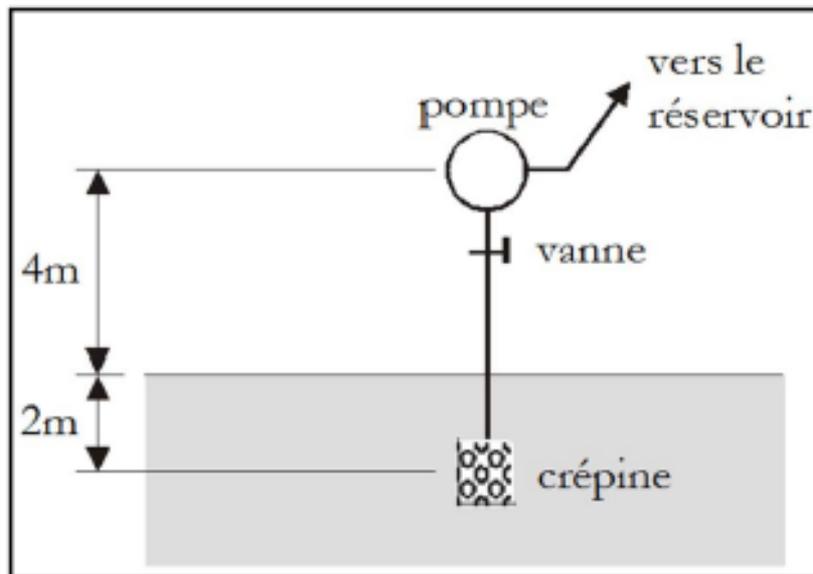
- Avoir un rendement le plus près possible du rendement optimal (\$\$\$)
- Vérifier le problème de cavitation (superposition des courbes)



Cavitation – Application 3.5

Vérifions s'il y a risque de cavitation selon les données suivantes:

- eau à 20°C ,
- pertes de charge singulières : crépine (K=10), vanne (K=3),
- diamètre de la conduite d'aspiration = 0,075m,
- pression atmosphérique standard = 101kPa,
- $C_{HW} = 130$, débit pompé $Q = 5,0$ l/s.



Donnée du manufacturier

$$(\text{NPSH})_{\text{disponible}} = 10\text{m} - h_a - h_{\text{ft,a}}$$

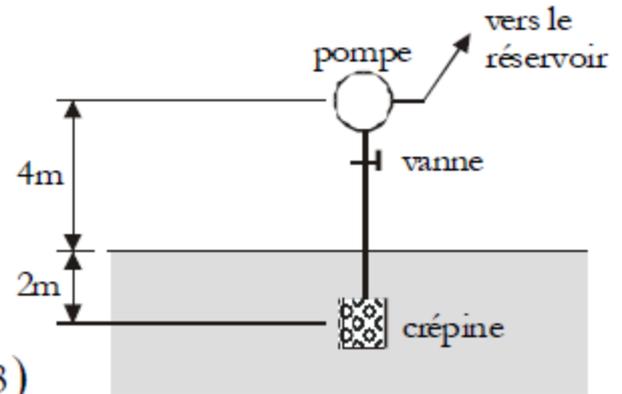
$$h_a = 4\text{m}$$

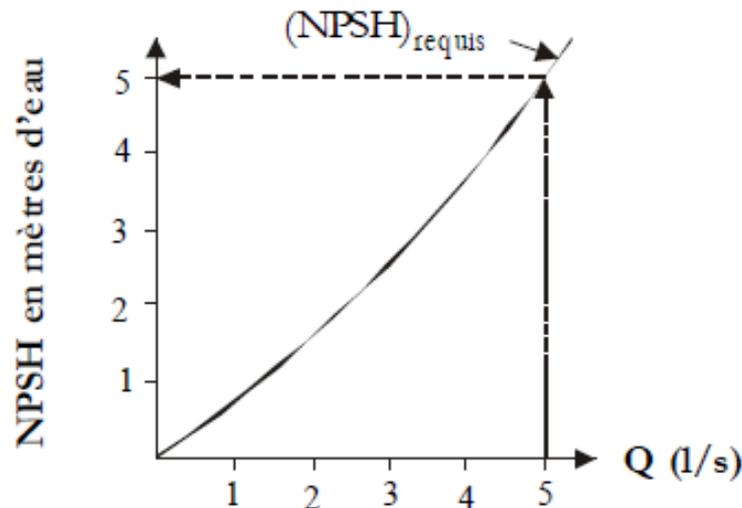
$$h_{\text{ft,a}} = L \left(\frac{3,59}{C_{\text{HW}}} \right)^{1,852} \frac{Q^{1,852}}{D^{4,87}} + 0,0826 \frac{Q^2}{D^4} \sum K_i$$

$$h_{\text{ft,a}} = 6 \left(\frac{3,59}{130} \right)^{1,852} \left(\frac{0,005^{1,852}}{0,075^{4,87}} \right) + 0,0826 \frac{0,005^2}{0,075^4} (10 + 3)$$

$$f_{\text{ft,a}} = 0,128\text{m} + 0,848\text{m} = 0,976\text{m}$$

Le $(\text{NPSH})_{\text{disponible}}$ est donc $(10\text{m} - 4\text{m} - 0,976\text{m})$, soit $5,024\text{m}$



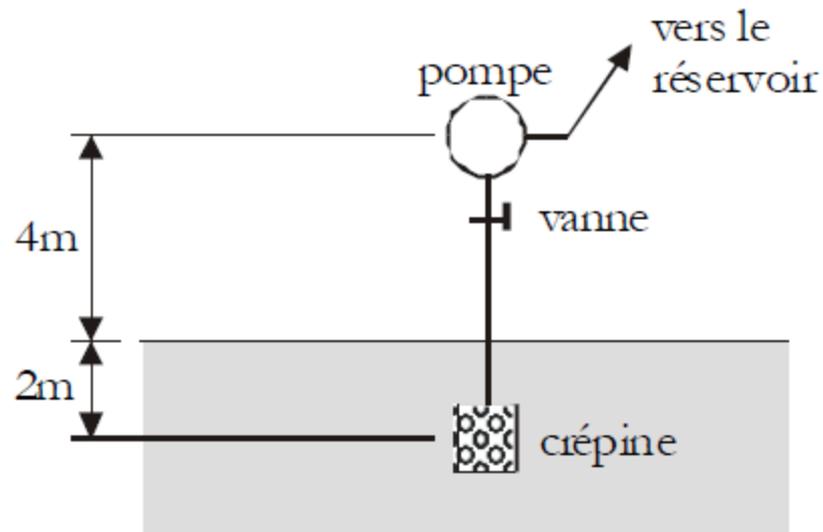


D'après la figure 3.23, le $(\text{NPSH})_{\text{requis}}$ est de 5m pour le débit de fonctionnement de 5 l/s.

Le $(\text{NPSH})_{\text{disponible}}$ étant supérieur au $(\text{NPSH})_{\text{requis}}$, il n'y a pas de danger de cavitation.

Effet de la baisse du niveau du lac

Supposons qu'à la suite d'une période sèche soutenue, le niveau du réservoir considéré dans l'exemple précédent ait baissé de 1 mètre. Est-ce qu'il y a danger de cavitation?



Le $(NPSH)_{\text{disponible}}$ devient $10\text{m} - 5\text{m} - 0,976\text{m} = 4,024\text{m}$.

Effet de l'augmentation de la température de l'eau sur le NPSH

Rappelons que la formule (3.21) du NPSH a été établie pour une température de l'eau de 20°C. Comme la température est maintenant de 30°C, la pression de vapeur se trouve modifiée de 0,24m à 0,43m. En utilisant la formule initiale :

$$\left(\text{NPSH}\right)_{\text{disponible}} = 10,33\text{m} - h_a - \frac{V_e^2}{2g} - h_{\text{ft,a}} - \frac{P_v}{\rho g}$$

$$= 10,33\text{m} - 4,00\text{m} - 0,05\text{m} - 0,098\text{m} - 0,43\text{m} = 4,87\text{m} < 5\text{m}$$

Effet de la corrosion sur le NPSH

- Tous les paramètres sont identiques aux conditions initiales, sauf que quelques années après l'installation, la conduite d'aspiration s'est corrodée de telle sorte que le coefficient de Hazen-Williams est devenu $C_{HW} = 40$. Quel est l'effet sur la cavitation?

La perte de charge dans la conduite d'aspiration devient maintenant $h_{ft,a} = 1,98\text{m}$ et le $(NPSH)_{disponible}$ devient $10,00\text{m} - h_{ft,a} - h_a = 4,02\text{m}$.

Effet de l'altitude sur le NPSH

- Considérons maintenant le cas où le système de l'exemple doit être installé dans une région montagneuse située à une altitude de 1000m, avec les mêmes paramètres de départ. Y a-t-il danger de cavitation?
- $P_{atm}/\rho g = 10.33 - 0.0012 \cdot z \text{ (m)}$

À une altitude de 1000m, $\frac{P_{atm}}{\rho g}$ n'est pas 10,33m (eau) mais seulement 9,12m (eau). Le

(NPSH)_{disponible} est donc diminué de 1,21m et devient 3,90m.

on peut éliminer la cavitation par

- augmenter le diamètre de la conduite d'aspiration,
- abaisser le niveau de la pompe,
- rehausser le niveau du réservoir d'aspiration,
- réduire le frottement dans la conduite d'aspiration,
- réduire le nombre de singularités sur la conduite d'aspiration,
- réduire la vitesse de rotation,
- réduire le diamètre de la roue de pompe,
- diminuer le débit pompé,
- utiliser des pompes plus petites en parallèle,
- utiliser des pompes verticales ou submersibles.