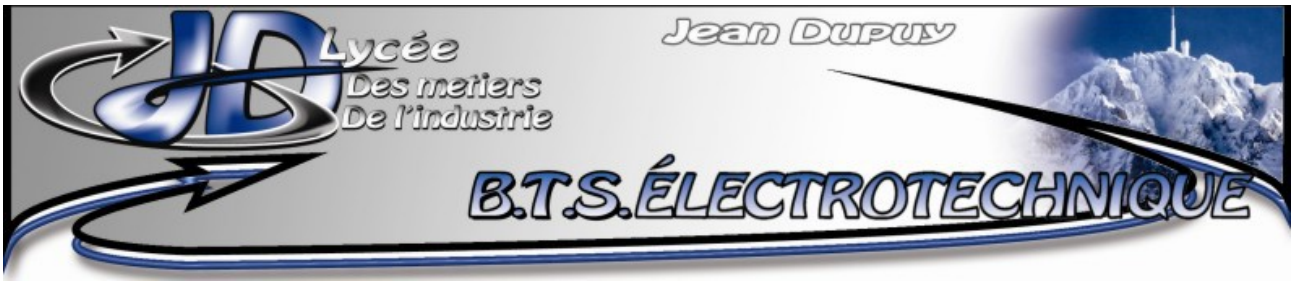


Mécanique des fluides

Table des matières

1.Définition :.....2
1.1.Propriétés des fluides.$.....2
2.Statique des fluides.....2
2.1.La grandeur PRESSION :.....2
2.2.Principe Fondamental de la Statique des Fluides ou Principe de l'hydrostatique..3
2.3.Théorème de Pascal.....3
3.DYNAMIQUE DES FLUIDES INCOMPRESSIBLES.....4
3.1.DEFINITIONS :.....4
a)Débit masse :.....4
b)Débit volume :.....4
c)Écoulements PERMANENTS OU STATIONNAIRES :.....4
3.2.EQUATION DE CONSERVATION DE LA MASSE ou EQUATION DE CONTINUITE.....4
a)définitions :.....4
b)conservation du débit :.....5
3.3.EQUATION DE CONSERVATION DE L'ENERGIE :THEOREME DE BERNOULLI.....5
a)écoulement (1) vers (2) sans échange de travail.....5
b)relation de BERNOULLI généralisée.....6
c)Pertes de charge.....6
4.DYNAMIQUE DES FLUIDES VISQUEUX INCOMPRESSIBLES.....7
4.1.Visualisation de l'écoulement.....7
4.2.Type d'écoulement : nombre de Reynolds et pertes en charge.....7
4.3.Calcul des Pertes de Charge.....8
a)PERTES DE CHARGE ACCIDENTELLES.....8
b)PERTES DE CHARGE RÉGULIÈRES.....8
c)Diminution des pertes.....9
5.Choisir une pompe.....9
5.1.Critères de choix d'une pompe :.....9
5.2.Phénomène de cavitation : Limitation de la hauteur d'aspiration - NPSH.....10
6.Choisir une turbine.....11

1. Définition :

Un fluide peut être considéré comme étant formé d'un grand nombre de particules, très petites et libres de se déplacer les unes par rapport aux autres. Un fluide est donc un milieu matériel continu, déformable, sans rigidité et qui peut s'écouler. Parmi les fluides, on trouve les liquides et gaz.

- ils n'ont pas de forme propre et ils prennent la forme du récipient qui les contient.
- la viscosité caractérise le fait que tout changement de forme s'accompagne d'une résistance (frottements).

1.1. Propriétés des fluides.$

Les fluides sont caractérisés par les grandeurs suivantes :

– Masse volumique : masse d'un volume donné de fluide : ρ en kg/m^3

eau : $\rho = 1 kg/L$

– Volume massique : volume d'une masse donnée de fluide : c'est l'inverse de la masse volumique.

– Densité : rapport entre la masse volumique d'un fluide et celle d'un fluide de référence.

Pour les liquides, la référence est en général l'eau,

pour les gaz, la référence est l'air

– Compressibilité : diminution de volume sous l'effet d'une pression appliquée.

– Viscosité : Résistance d'un fluide au glissement d'une couche par rapport à une autre.

2. Statique des fluides

2.1. La grandeur PRESSION :

Définition : La pression correspond à la force exercée par un fluide, par unité de surface, sur tout corps avec lequel il est en contact.

$F = P \times S$ => Unité: Le Pascal (Pa) $Pa = \frac{N}{m^2} = \frac{J}{m^3}$

1 bar = 10^5 Pa $1\,mbar = 100\,Pa = 1\,hPa$

On exprime aussi les pressions en hauteur de colonne d'eau (mce) : 1mCE = 98,1 mbar
(Pression due à une colonne d'eau de 1 m de hauteur)

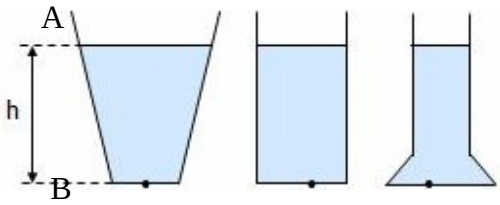
unité US : (“pound per square inch” -- livre par pouce carré) $1 psi = 6894{,}8\,Pa$.

2.2. Principe Fondamental de la Statique des Fluides ou Principe de l'hydrostatique

Une colonne de fluide dans un fluide est soumise à des forces de pression exercées par les parties voisines du fluide. Si la colonne de fluide est en équilibre, les forces de frottement sont nulles. La colonne de fluide n'est alors soumise, généralement, qu'à son poids et aux forces de pression.

La condition d'équilibre permet d'écrire l'équation fondamentale de la « Statique des Fluides »:

A : surface libre du liquide. B : Point quelconque.



$$\boxed{p_B - p_A = \rho g (z_A - z_B)} \quad \text{ou} \quad \boxed{p + \rho g z = Cte}$$

La pression au fond du récipient ne dépend que de la hauteur h de fluide et non de la forme (ou surface) du récipient

z : altitude en m et p : pression en Pa

ρ masse volumique du fluide (kg/m^3)

g accélération de la pesanteur $(g = 9{,}81 m/s^2)$

Conclusions :

– Dans un fluide la pression croît de haut en bas.

– les surfaces isobares (pression constante) sont des plans horizontaux.

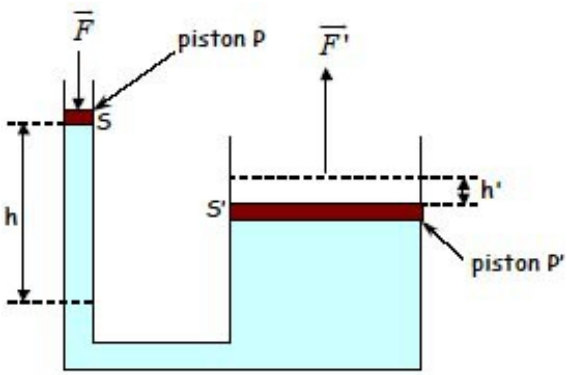
– la surface de séparation entre deux fluides non miscibles est un plan horizontal.

– La pression dans un fluide ne dépend que de la hauteur de fluide

2.3. Théorème de Pascal

Dans un fluide incompressible en équilibre, les variations de pression en un point se transmettent intégralement en tous les points de ce fluide.

Ce théorème est utile pour l'étude et la conception des presses hydrauliques et plus généralement dans le cadre de la transmission hydraulique.



La pression est la même dans toute la chambre (très supérieure à la pression atmosphérique.)

Il en résulte la relation entre les forces et les surfaces :

$$p = \frac{F}{S} = \frac{F'}{S'}$$

Cependant, si la force a été augmentée, la course a été diminuée : le volume de fluide déplacé est identique des deux côtés : $Volume = S.h = S'.h'$

3.DYNAMIQUE DES FLUIDES INCOMPRESSIBLES

3.1. DEFINITIONS :

Le DEBIT est la quantité de matière qui traverse une section droite de la conduite pendant l'unité de temps.

A) DÉBIT MASSE :

Si m est la masse de fluide qui a traversé une section droite de la conduite pendant l'intervalle de temps t, le débit-masse s'écrit :

$$\boxed{Q_m = \frac{m}{t}} \quad \text{unité :} \quad kg.s^{-1}$$

B) DÉBIT VOLUME :

Si V est le volume de fluide qui a traversé une section droite de la conduite pendant l'intervalle de temps t , le débit-volume s'écrit :

$$\boxed{q_V = \frac{dV}{dt}} \quad \text{unité :} \quad m^3.s^{-1}$$

Relation entre q_m et q_V : $\boxed{q_m = \rho\, q_V}$

Remarques : si les liquides sont incompressibles et peu dilatables (masse volumique constante) ; on parle alors d'écoulements isovolumes.

Pour les gaz, la masse volumique dépend de la température et de la pression. Pour des vitesses faibles (variation de pression limitée) et pour des températures constantes on retrouve le cas d'un écoulement isovolume.

C) ÉCOULEMENTS PERMANENTS OU STATIONNAIRES :

Un régime d'écoulement est dit permanent ou stationnaire si les paramètres qui le caractérisent (pression, température, vitesse, masse volumique, ..), ont une valeur constante au cours du temps.

3.2. EQUATION DE CONSERVATION DE LA MASSE OU EQUATION DE CONTINUITE

A) DÉFINITIONS :

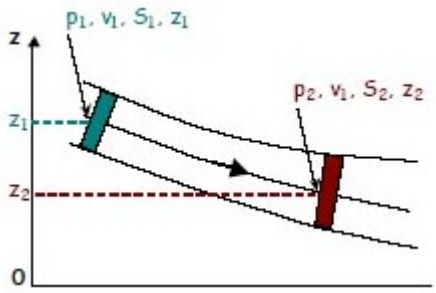
Ligne de courant : En régime stationnaire, on appelle ligne de courant la courbe suivant laquelle se déplace un élément de fluide.

Tube de courant : Ensemble de lignes de courant s'appuyant sur une courbe fermée.

B) CONSERVATION DU DÉBIT :

Le fluide s'écoule à l'intérieur d'un tube qui passe d'une section S_1 à une section S_2, il passe également d'une vitesse d'écoulement v_1 à la vitesse v_2.

Le débit volumique est le même à travers toute section d'un circuit, donc le débit Q_1 au niveau de la première section est égal au débit Q_2. L'équation de la conservation du débit s'exprime par la relation :



$$v_1 . S_1 = v_2 . S_2 = q_V = Cte$$

Conséquence :

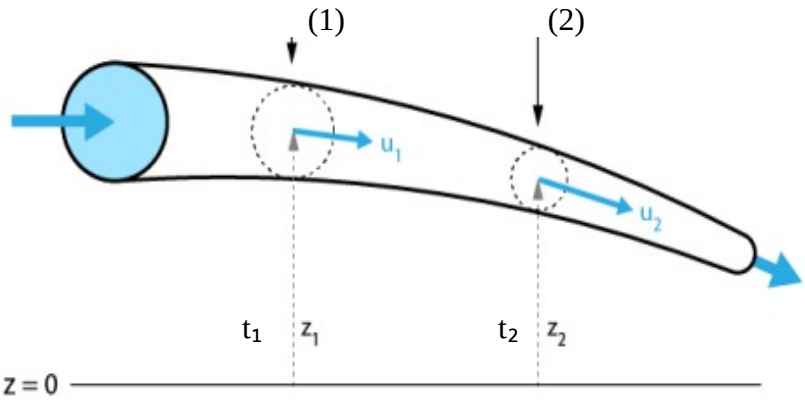
Conduite de section constante : la vitesse est constante

Rétrécissement : une section plus petite implique une vitesse d'écoulement plus importante .

3.3. EQUATION DE CONSERVATION DE L'ENERGIE :THEOREME DE BERNOULLI

A) ÉCOULEMENT (1) VERS (2) SANS ÉCHANGE DE TRAVAIL

Par application de la conservation de l'énergie, appliquée à une masse m entre les instants t1 et t2 , on montre que l'on peut écrire le théorème de Bernouilli :



$$\rho\frac{v_2^2}{2}+\rho g z_2+p_2=\rho\frac{v_1^2}{2}+\rho g z_1+p_1 = Cte \quad \text{soit encore :} \quad \boxed{\rho\frac{v^2}{2}+\rho g z+p = Cte}$$

En divisant tous les termes de la relation précédente par le produit ρg , on écrit tous les termes dans la dimension d'une hauteur (pressions exprimées en mètres de colonne de fluide).

D'un point de vue pratique, on utilise l'une ou l'autre des formes suivantes :

$$\boxed{\frac{1}{2}\rho\left(v_2^2-v_1^2\right)+\rho g\left(z_2-z_1\right)+\left(p_2-p_1\right)=0} \quad \text{ou} \quad \boxed{\frac{1}{2g}\left(v_2^2-v_1^2\right)+\left(z_2-z_1\right)+\frac{\left(p_2-p_1\right)}{\rho g}=0}$$

B) RELATION DE BERNOULLI GÉNÉRALISÉE

Ces relations permettent de :

- Dimensionner une pompe
- Dimensionner une turbine

Lors du transfert du fluide entre les points (1) et (2), il peut y avoir échange de puissance (énergie) du à une pompe ou une turbine P_{12} . Il faudra aussi tenir compte de l'énergie perdue par frottements (viscosité du fluide) ΔH_{12} ou Δp_{12} .

Cas d'un écoulement (1) vers (2) avec échange d'énergie.

- ΔH_{12} est négatif en m ou Δp_{12} est négatif en Pa avec $\Delta H_{12} \times \rho g = \Delta p_{12}$
- $P_{12} > 0$ si l'énergie est reçue par le fluide (ex. : pompe) en Watt;
- $P_{12} < 0$ si l'énergie est fournie par le fluide (ex. : turbine) en Watt.

$$\frac{p_2 - p_1}{\rho \times g} + \frac{1}{2g}\left(v_2^2 - v_1^2\right) + \left(z_2 - z_1\right) = \frac{P_{12}}{g q_m} + \Delta H_{12} \quad \text{ou} \quad \frac{1}{2}\rho\left(v_2^2 - v_1^2\right) + \rho g\left(z_2 - z_1\right) + \left(p_2 - p_1\right) = \frac{P_{12}}{q_V} + \Delta p_{12}$$

Il faudra prendre en compte les pertes et établir la puissance due à la viscosité et dissipée par les forces de frottement ; c'est le calcul des pertes de charge.

C) PERTES DE CHARGE.

Les pertes de charge sont les pertes d'énergie du fluide lorsqu'il se déplace.

Cette perte peut être due aux frottements (viscosité) des particules sur les parois des canalisations (« pertes de charge régulières ») ou aux accidents de parcours (coude par exemple, « pertes de charge singulières »).

Cette perte d'énergie se traduit :

- soit par une chute de pression Δp (en Pa ou J/m^3)
- soit par une chute de hauteur Δh (en m)
- soit par une perte d'énergie massique ΔE (en J/kg).

VISCOSITE

Sous l'effet des forces entre les molécules de fluide et des forces entre les molécules de fluide et celles de la paroi, chaque molécule de fluide ne s'écoule pas à la même vitesse.

La viscosité sera responsable de pertes lors du déplacement du fluide.

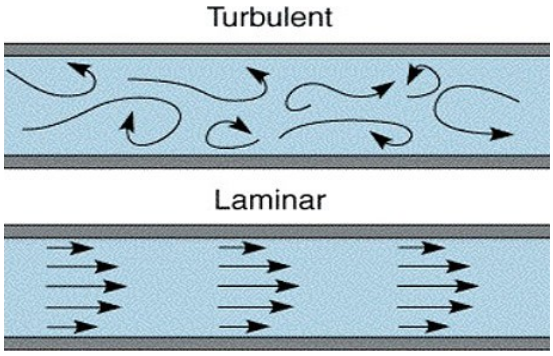
La viscosité des liquides diminue lorsque la température augmente.

Contrairement à celle des liquides, la viscosité des gaz augmente avec la température.

4.DYNAMIQUE DES FLUIDES VISQUEUX INCOMPRESSIBLES

4.1. VISUALISATION DE L'ÉCOULEMENT

On considère que l'écoulement peur se faire selon les deux types ci-contre. En fonction du type d'écoulement, les pertes seront plus ou moins importantes.



4.2. TYPE D'ÉCOULEMENT : NOMBRE DE REYNOLDS ET PERTES EN CHARGE.

Le nombre de Reynolds d'un fluide en mouvement dans une canalisation a pour expression

$$\Re = \frac{\rho v D}{\eta} = \frac{v D}{\nu}$$

D diamètre de la canalisation, v vitesse du fluide, ρ masse volumique,

η coefficient de viscosité dynamique en [$Pa.s$]

$\nu = \eta / \rho$ coefficient de viscosité cinématique [m^2/s]

La valeur du nombre de Reynolds définit le type d'écoulement.

Pour chaque type d'écoulement , le coefficient de perte de charge λ a une expression qui dépend du nombre de Reynolds $\Re$.

Nombre de Reynolds	Type d'écoulement	Coefficient de perte de charge
$\Re < 2300$	écoulement laminaire	$\lambda = 64/\Re$
$2300 < \Re < 3\ 10^5$	écoulement turbulent lisse	$\lambda = 0{,}316\,\Re^{-0{,}25}$
$\Re > 3\ 10^5$	écoulement turbulent	λ est constant et ne dépend pas de $\Re$

Ces valeurs doivent être considérées comme des ordres de grandeur, le passage d'un type d'écoulement à un autre se faisant progressivement.

4.3. Calcul des Pertes de Charge

Des formules empiriques ou des abaques sont utilisés pour avoir des ordres de grandeur corrects des pertes de charge:.

Lorsqu'on considère un fluide réel, les pertes d'énergie spécifiques (les pertes de charge) dépendent de la forme, des dimensions et de la rugosité de la canalisation, de la vitesse d'écoulement et de la viscosité du liquide.

Les frottements du fluide sur la paroi interne de la tuyauterie sont appelées pertes de charge régulières ou systématiques.

La résistance à l'écoulement provoquée par les accidents de parcours (coudes, élargissements ou rétrécissement de la section, organes de réglage, etc...) sont les pertes de charge accidentelles ou singulières.

A) PERTES DE CHARGE ACCIDENTELLES

La détermination de ce coefficient est principalement du domaine de l'expérience.

« le guide du calcul en mécanique » permet de calculer l'ensemble des pertes de charges.

B) PERTES DE CHARGE RÉGULIÈRES

Ce genre de pertes est causé par le frottement intérieur qui se produit dans les liquides ; Il se rencontre dans les tuyaux lisses aussi bien que dans les tuyaux rugueux.

Ces pertes sont directement liées au nombre de Reynolds.

Pour une canalisation de longueur L , la perte de charge régulière est Δp .

La perte de charge linéique est la perte de charge par unité de longueur : $\omega = \Delta p / L \, [en\ Pa/m]$.

La perte de charge linéique de la canalisation a pour expression : $\omega = \lambda \frac{\rho v^2}{2D}$

D diamètre de la canalisation, v vitesse du fluide, ρ masse volumique.

λ est le coefficient de perte de charge, sa valeur dépend du type d'écoulement.

Attention à ne pas confondre la vitesse v et le coefficient de viscosité cinématique ν .

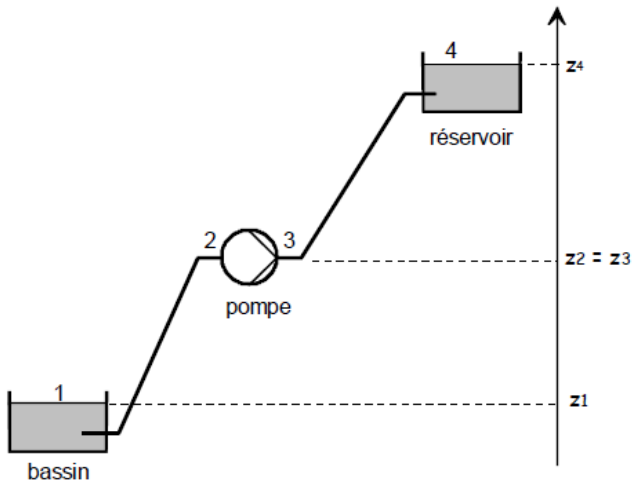
c) Diminution des pertes

On peut intervenir sur les paramètres suivants :

- diminuer la longueur de canalisation, le nombre d'accidents sur la canalisation, le débit.
- augmenter le diamètre des canalisations
- faire circuler des liquides le moins visqueux possible
- utiliser des matériaux de faible rugosité

5. Choisir une pompe

5.1. Critères de choix d'une pompe :



Généralement, on a les données suivantes :

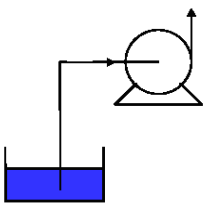
- section canalisation amont
- section canalisation aval
- débit demandé

Questions :

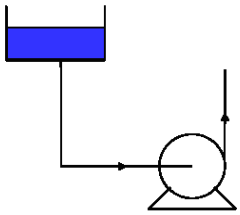
- déterminer la puissance de la pompe,
- Choix sur abaques $H(Q_v)$.
- vérifier qu'il n'y a pas de phénomène de cavitation dans la canalisation amont,
- vérifier qu'il n'y a pas de phénomène de cavitation dans la pompe.

Conseils à respecter, si le procédé le permet, pour éviter la cavitation:

- Changer la position de la pompe (rapprocher du bassin d'alimentation)
- préférer si possible les montages de pompes en charge.
- éviter de transporter des liquides à des températures trop élevées.



Pompe en aspiration



Pompe en charge

- éviter une alimentation à partir d'un réservoir sous pression réduite.
- diminuer les pertes de charge du circuit d'aspiration.

5.2. Phénomène de cavitation : Limitation de la hauteur d'aspiration - NPSH

La cavitation est la vaporisation du liquide contenu dans la pompe quand il est soumis à une pression inférieure à la tension de vapeur correspondant à sa température (pression de vapeur saturante (p_{Vs}).

Des bulles apparaissent dans les zones où la pression est la plus faible (entrée des aubes de roue des pompes centrifuges). Des implosions se produisent alors à des fréquences élevées et créent des surpressions locales très élevées (jusqu'à des centaines de bars)

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

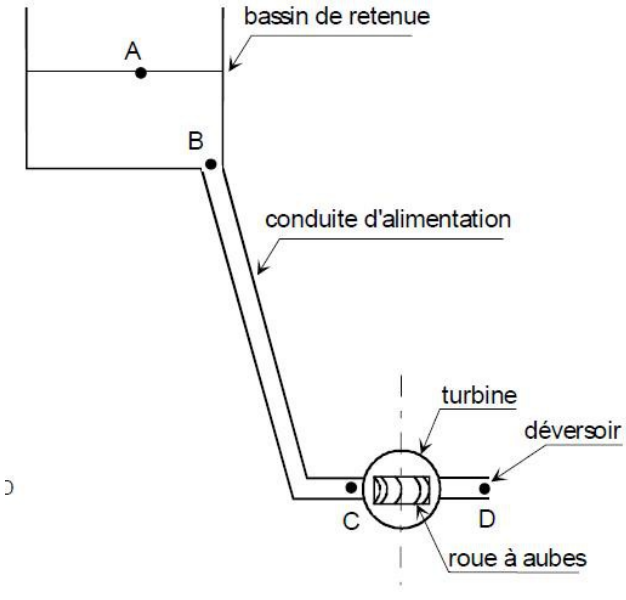
- érosion du matériau pouvant aller jusqu'au perçage des aubes de turbine des pompes centrifuges
- augmentation du bruit et des vibrations générés par la pompe
- chute des performances des pompes avec diminution importante de la hauteur manométrique totale, du débit et du rendement.

La valeur NPSH mesure la différence entre la pression du liquide en un point et sa pression de vapeur saturante. Cette valeur ne doit pas descendre en dessous de la valeur du NPSH requis par le constructeur.

Conséquence : si on place une pompe à une hauteur trop haute en aspiration, on peut arriver au phénomène de cavitation. Il faudra rester vigilant !

6. Choisir une turbine

Quelques questions à se poser pour le dimensionnement d'une turbine.



Données :

- section conduite
- débit
- différence d'altitude

Grandeurs à calculer :

- vitesse dans la conduite,
- puissance produite par la turbine,
- pression à l'entrée de la turbine (p_C),
- pression à l'entrée de la canalisation (p_B),
- vérifier qu'il n'y a pas de phénomène de cavitation ($p_B > p_{Vs}$).

Si cavitation, ajuster le diamètre de la buse