

TURBOMACHINE
APPROFONDIES

CHAPITRE 1.

**Rappel sur les Turbomachines
(3 Semaines)**

SOMMAIRE

1. Introduction
2. Fonctionnement d'une turbomachine
3. Description d'une turbomachine
4. Classification des turbomachines
 - 4.1. Classification selon le sens de l'échange d'énergie
 - 4.2. Classification selon le sens d'écoulement du fluide
 - 4.3. Classification selon la nature du fluide
5. Domaines d'utilisation
6. Diagramme des vitesses
7. Equation d'Euler des turbomachines
8. Rendement des turbomachines
9. Courbes caractéristiques
10. Point de fonctionnement

1. Introduction

La turbomachine est une machine qui réalise un échange d'énergie entre un fluide en mouvement et un ensemble mécanique (*une ou plusieurs roues ou rotors munis des aubes*) tournant autour de son arbre.

2. Fonctionnement d'une turbomachine

Les turbomachines ont un mouvement de rotation uniforme, et leurs pièces (aubes) fixes et mobiles présentent une périodicité autour de l'axe de rotation. Que ce soit les turbomachines motrices ou réceptrices, ces machines sont généralement constituées d'un rotor (partie mobile) et d'un stator (partie fixe)

L'échange d'énergie s'effectue dans le **rotor** et **résulte du travail** des forces aérodynamiques sur les **aubes** produites par l'écoulement du fluide autour de celles-ci, et qui résultent principalement de la **différence de pression** entre les deux faces des aubes, (Sur l'Intrados d'une aube, la pression est plus élevée que sur l'extrados). Il se fait simplement par rotation des aubes constituant un canal d'écoulement sans déformation de la frontière du système.

3. Description d'une turbomachine

Un étage de turbomachine se compose d'une partie mobile appelée **ROTOR** (ou roue) et d'une partie fixe appelée **STATOR** (ou selon le cas : redresseur, distributeur, diffuseur...)

3.1. Rotor :

Rôle : assurer le transfert d'énergie entre l'arbre de la machine et le fluide en mouvement.

L'écoulement étant défléchi au passage de la roue, il existe donc une force exercée par le fluide sur les aubages. Le point d'application de la force se déplace du fait de la rotation des aubages,

3.2. Stator :

Rôle : modifier la forme d'énergie (énergie cinétique en pression).

Il existe comme pour la roue mobile, une force exercée par le fluide sur les aubages, liée à la déflexion de l'écoulement.

➤ **Distributeur** : Situé en amont de la roue mobile son **Rôle** :

- Provoquer une giration de l'écoulement,

➤ **Diffuseur** : Situé en aval de la roue mobile son **Rôle** :

- Redresser l'écoulement vers la direction axiale, et orienter le fluide dans une direction compatible avec le prochain étage.

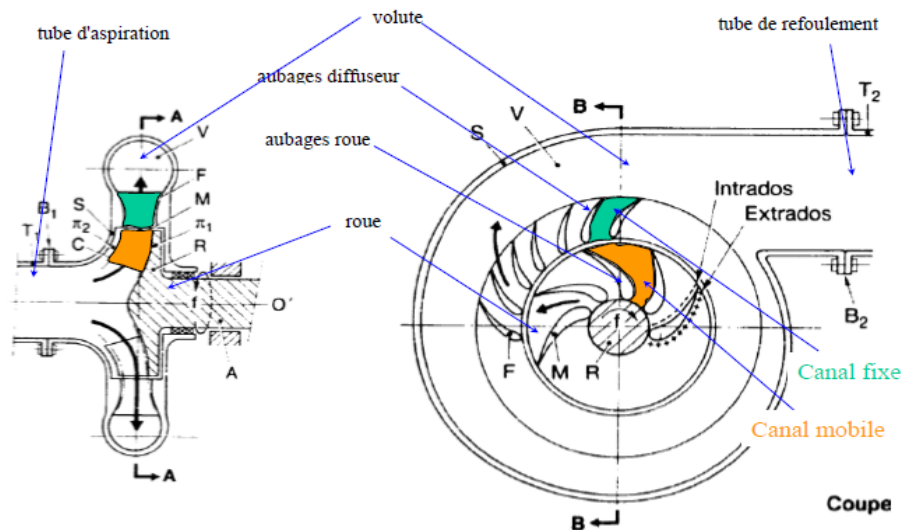


Figure 1. Description d'une turbomachine

4. Classification des turbomachines :

Il existe de nombreuses manières différentes de classer les turbomachines.

4.1. Classification selon le sens d'échange d'énergie

Dans les turbomachines le transfert d'énergie s'effectue entre le fluide et une roue mobile.

On distingue :

- ✓ Transfert d'énergie du fluide vers les parois une récupération de l'énergie du fluide sur l'arbre de la machine - dans ce cas les machines dites **MOTRICES** (fonction réalisée par les machines de type turbine : hydraulique, à vapeur, à gaz)
- ✓ Transfert d'énergie des parois vers le fluide, une augmentation de l'énergie du fluide par fourniture d'énergie mécanique par l'arbre de la machine - dans ce cas les machines dites **RECEPTRICES** (fonction réalisée par les machines de type compresseur, ventilateur, pompe, hélices ...)

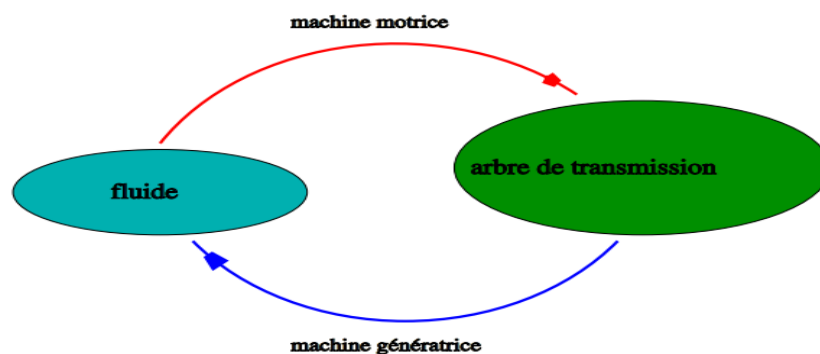


Figure 2 Définition du transfert d'énergie

4.2. Classification selon le sens d'écoulement du fluide

4.2.1. Ecoulement axial du fluide

Le sens d'écoulement du fluide traversant la machine est essentiellement parallèle à l'axe de rotation de la machine, et on les appelle donc des machines axiales.

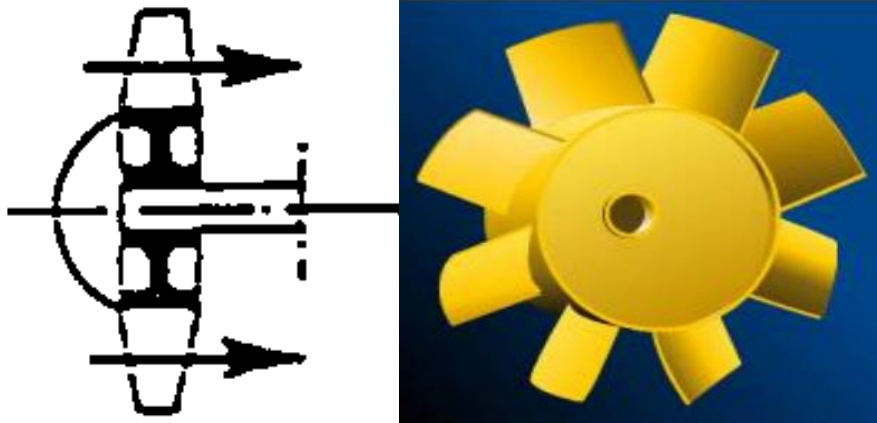


Figure 3. Ecoulement axial du fluide

4.2.2. Ecoulement radial du fluide

Le fluide traverse la roue (rotor) perpendiculairement à l'axe de rotation de l'arbre de la machine

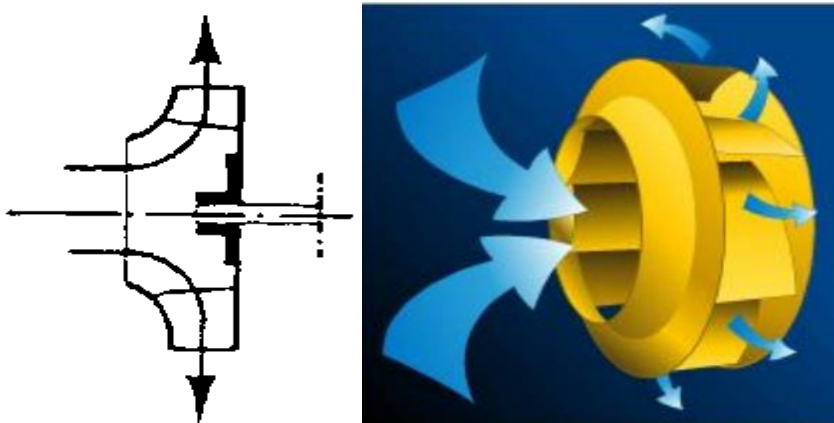


Figure 4. Ecoulement radial du fluide

4.2.3. Ecoulement mixte du fluide

Il existe également des configurations intermédiaires, dites mixtes, dans lesquelles l'écoulement a des composantes tant axiales que radiales.

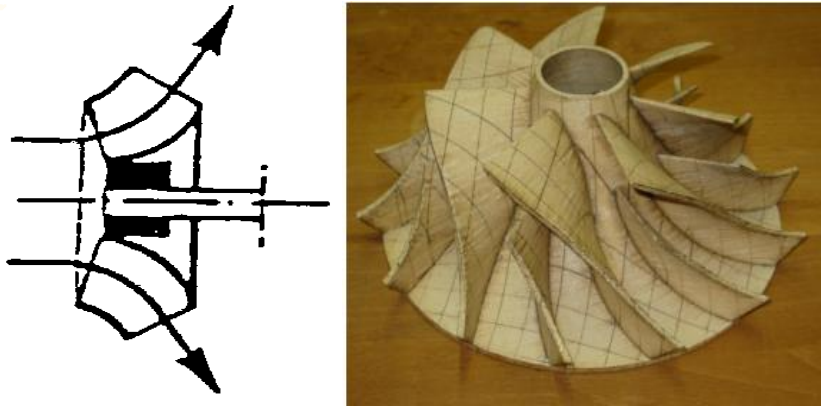


Figure 5. Ecoulement mixte du fluide

4.3. Classification selon la nature du fluide

On peut classer les turbomachines selon la nature de fluide utilisé :

- ✓ Turbomachine utilisant les fluides compressibles : turbine à gaz, turbine à vapeur.
- ✓ Turbomachine utilisant les fluides incompressibles : turbopompe, turbo hydraulique.

5. Domaines d'utilisation

- ✓ Production d'énergie mécanique (Turbines)
- ✓ Industrie pétrolière (extraction du pétrole), (Pompes)
- ✓ Transport de fluide (pompe)
- ✓ élévation des pressions (Compresseurs)
- ✓ Production d'énergie électrique (Turbines à vapeur)

6. Diagramme des vitesses

Les diagrammes des vitesses (ou triangle des vitesses) à l'entrée et à la sortie de la roue jouent un rôle très important, la figure 5, représente une roue d'une turbomachine sur laquelle les vecteurs des vitesses sont tracés (à l'entrée « indice 1 » et à la sortie « indice 2 »). La vitesse \vec{V} est appelée la vitesse absolue, peut être déterminée par :

$$\vec{V} = \vec{U} + \vec{W}$$

La rotation de la roue : représentée par la vitesse tangentielle à la roue \vec{U} (appelé aussi vitesse périphérique, vitesse d'entraînement). Elle est donnée par :

$$U = \omega r = 2\pi r N / 60$$

Avec :

r : Rayon de la roue

D : Diamètre de la roue

N : Vitesse de rotation de la roue (tr/min)

- Le déplacement par rapport à l'aube : représenté par la vitesse relative \vec{W} qui est tangente à l'aube

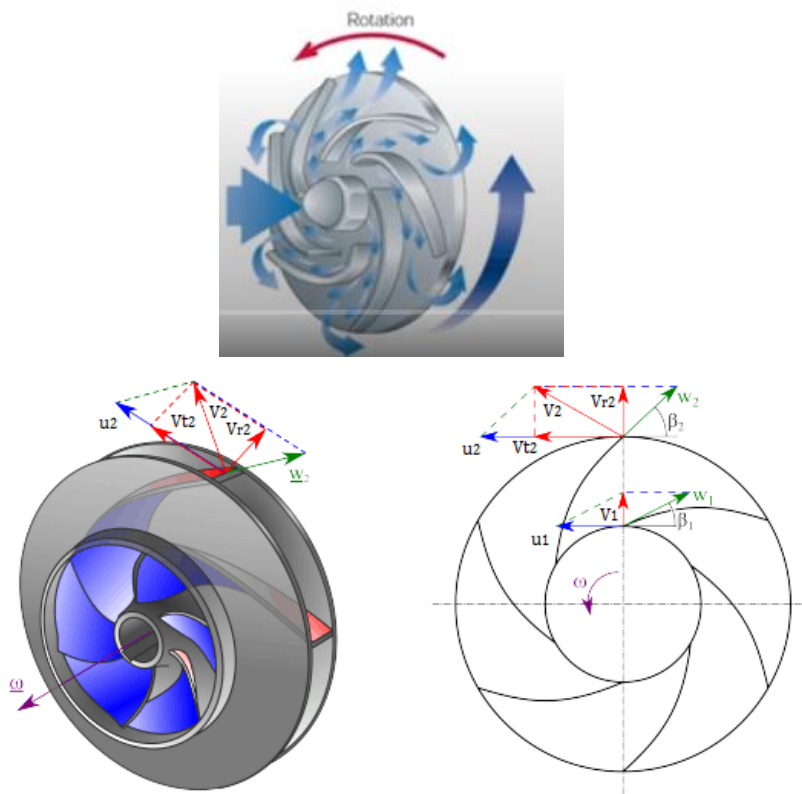


Figure 6 : Ecoulement des particules fluides dans la roue

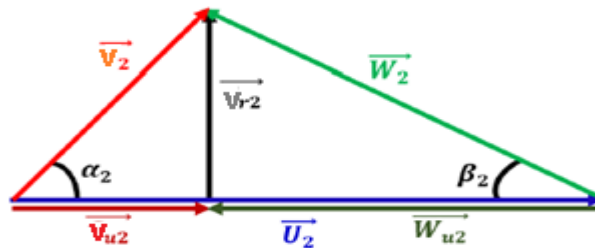


Figure 7 : Triangle des vitesses

V_{r2} : Composante radiale de la vitesse absolue (appelée vitesse d'écoulement).

V_{u2} : Composante tangentielle de la vitesse absolue.

L'angle α_2 est formé par les vitesses \vec{U} et \vec{V} et l'angle β_2 est formé par les vitesses \vec{U} et \vec{W} .

$$\alpha = (\vec{U}, \vec{V}) \text{ et } \beta = (\vec{U}, \vec{W})$$

Dans ce qui suit il faut intervenir encore deux composantes de la vitesse absolue :

- Une composante radiale : $V_r = V \sin(\alpha_2)$
- Une composante tangentielle : $V_u = V \cos(\alpha_2)$

$$V^2 = V_r^2 + V_u^2$$

➤ **Entrée de la roue :**

La vitesse V_1 est purement radiale ($\alpha_1=90^\circ$), elle se détermine à partir du débit volumique

$$V_1 = V_r = \frac{Q_v}{2\pi r_1 b_1}$$

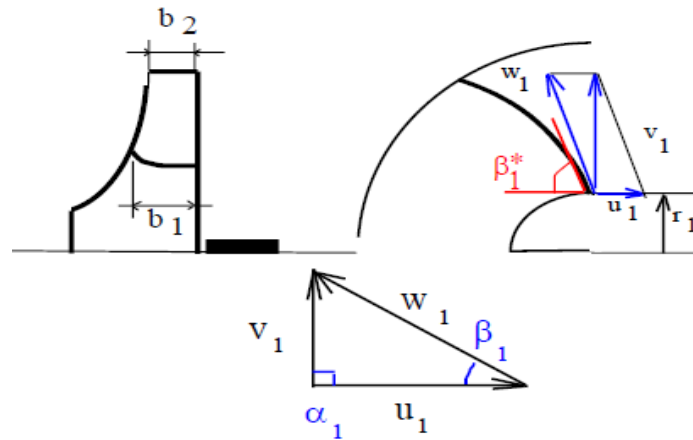


Figure 8. Triangle des vitesses à l'entrée de la roue

La vitesse U_1 se détermine à partir du rayon d'entrée r_1 et de la vitesse angulaire de rotation de la roue $\omega=2\pi N/60$

$$U_1 = r_1 \omega = 2\pi r_1 N/60 \text{ (m/s)}$$

A partir de ces deux vitesses on détermine la vitesse relative W_1 du fluide à l'entrée des canaux mobiles de la roue à l'aide du triangle des vitesses représenté ci-dessus.

$$W_1 = U_1 / \cos \beta_1 = V_{r1} / \sin \beta_1 \text{ (m/s)}$$

L'angle β_1 peut être déterminé par la relation

$$\text{Tg} \beta_1 = \frac{V_{r1}}{U_1}$$

➤ **Sortie de la roue**

De même que précédemment, on détermine U_2 :

$$U_2 = r_2 \omega = 2\pi r_2 N/60 \text{ en (m/s)}$$

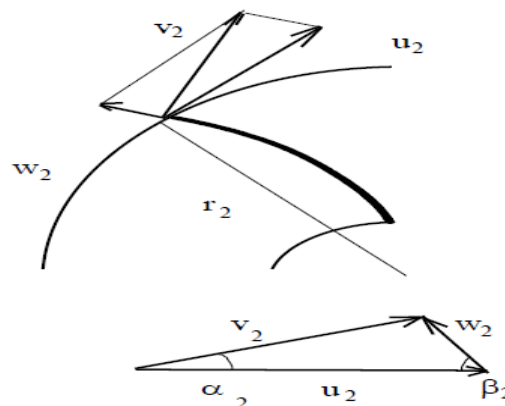


Figure 9. Triangle des vitesses à la sortie de la roue

En supposant que la direction de la vitesse relative à la sortie de la roue est **alignée** avec l'angle de sortie des aubages on écrit

$$V_{r2} = \frac{Q_v}{2\pi r_2 b_2}$$

$$V_{r2} = V_2 \sin \alpha_2 = W_2 \sin \beta_2 \implies W_2 = V_{r2} / \sin \beta_2 \implies W_2 = \frac{Q_v}{2\pi r_2 b_2 \sin \beta_2}$$

$$V_{u2} = V_2 \cos \alpha_2 = U_2 - W_2 \cos \beta_2 \implies V_{u2} = U_2 - \frac{V_{r2} \cos \beta_2}{\sin \beta_2} \implies V_{u2} = U_2 - V_{r2} \cot \beta_2$$

L'angle β_2 se calcul par la formule : $\text{Tg} \beta_2 = \frac{V_2}{U_2 - V_2 \cos \alpha_2}$

7. Couple échangé entre les aubages mobiles et le fluide Equation d'Euler

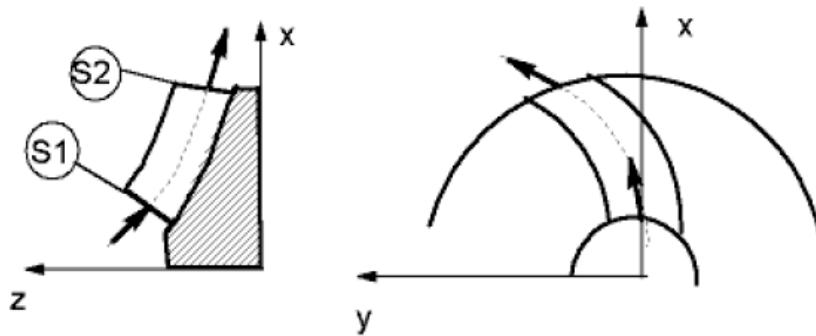


Figure 10. Ecoulement du fluide entre deux aubages mobiles de la roue d'une turbomachine

Pour évaluer le couple échangé entre le fluide et les aubages mobiles de la roue d'une turbomachine, nous allons appliquer le théorème d'Euler au domaine fluide situé entre deux aubages mobiles de la roue. Pour l'analyse énergétique de la machine, la valeur que nous voulons évaluer est le couple par rapport à l'axe tournant de la machine ; c'est à dire dans notre exemple le couple par rapport à l'axe Oz. Nous allons donc utiliser le théorème d'Euler selon la composante du couple par rapport à l'axe Oz du torseur des efforts extérieurs.

Théorème d'Euler

Le point de départ pour l'étude des turbomachines est l'équation d'Euler. Celle-ci être déduite aisément du principe de conservation de l'impulsion angulaire ou moment de la quantité de mouvement. En particulier, on considère un écoulement unidimensionnel en régime stationnaire dans le rotor d'une turbomachine ayant des conditions uniformes à l'entrée et à la sortie notées par les indices 1 et 2, respectivement.

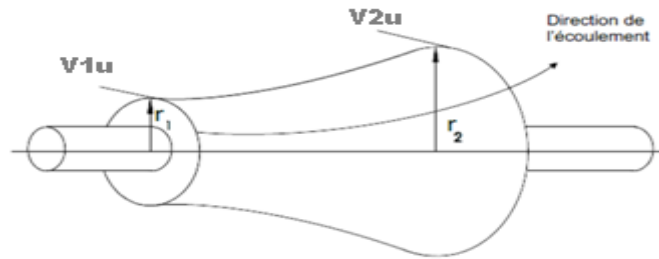


Figure 11 : Rotor Schématisé

Le moment angulaire est donné par l'équation suivante :

$$M = Q_m (r_2 v_2 - r_1 v_1)$$

r_1 : rayon d'entrée des aubes;

r_2 : rayon de la circonférence extérieure du rotor.

v_2, v_1 : composantes tangentielles de la vitesse absolue de mouvement de rotor

- La puissance absorbée par la pompe est donnée par :

$$P = M \cdot \omega = Q_m (r_2 v_{u2} \omega - r_1 v_{u1} \omega)$$

M : Couple de torsion sur l'arbre de la pompe

ω : Vitesse angulaire du rotor

Nous avons que $U_1 = r_1 \omega$, $U_2 = r_2 \omega$

Donc :

$$P = M \cdot \omega = Q_m (U_2 v_{u2} - U_1 v_{u1})$$

La puissance absorbée par la pompe peut être déterminée aussi par :

$$M \omega = g H_{th} Q_m$$

H_{th} : Hauteur créée par la pompe idéale appelée hauteur effective d'élevation

On déduit l'expression de la hauteur créée par la pompe à partir de deux équations de la puissance

$$H_{th} = \frac{P}{g Q_m} = \frac{1}{g} (U_2 v_2 \cos \alpha_2 - U_1 v_1 \cos \alpha_1)$$

Cette équation (dite d'Euler) est l'équation fondamentale non seulement des pompes centrifuges, mais encore de toutes les autres machines à : ventilateurs, compresseurs, turbines.

8. Rendement des turbomachines

Le rendement total d'une machine est le résultat de la multiplication des rendements. Chaque type est lié à un genre de pertes qui se passent dans la machine :

- ✓ Pertes hydrauliques : due aux frottements.
- ✓ Pertes mécaniques : due aux frottements mécaniques dans les paliers, les presses étoupe. ...etc.

8.1. Rendement hydraulique (indiqué)

Il est donné en fonction des pertes hydrauliques comme suit :

$$\eta_h = \eta_l = \frac{H_n}{H_{mt}}$$

Avec :

H_n : Hauteur nominale de la pompe, $H_n = H_{mt}$

H_{mt} : Hauteur manométrique (énergie exprimée en (m))

η_h : Généralement entre 80% et 95%.

8.2. Rendement mécanique

Il est lié aux pertes mécaniques qui représentent les pertes en puissance mécanique du moteur d'entraînement.

$$\eta_m = \frac{P_u}{P_a} = \frac{\rho \cdot g \cdot H_m \cdot Q_v}{P_a}$$

Avec :

P_u : Puissance utile (hydraulique) de la pompe :

$$P_u = Q_v \cdot \rho \cdot g \cdot H_m$$

P_a : Puissance de l'arbre absorbée par la pompe $P_a = P_{mec} = M \cdot \omega$

9. Courbes caractéristiques de la turbomachine

Les constructeurs fournissent les caractéristiques des pompes en fonction du débit (m^3/h) pour des conditions données (nature du liquide, vitesse du moteur pour une pompe centrifuge ou une pompe à membrane (à piston)). Les caractéristiques fournies sont la hauteur manométrique totale, la puissance consommée par le moteur (kW), et le rendement.

La hauteur manométrique totale (H_{mt}) d'une pompe est la différence de pression en mètres (hauteurs) entre les orifices d'aspiration et de refoulement

Les paramètres caractéristiques la pompe sont fournis par le constructeur sous forme des courbes appelées courbes caractéristiques

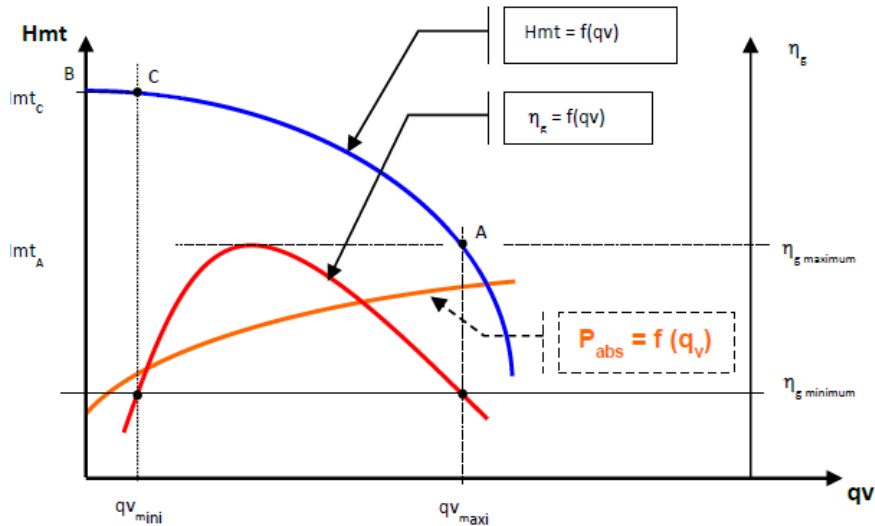


Figure 10 : Courbes caractéristiques

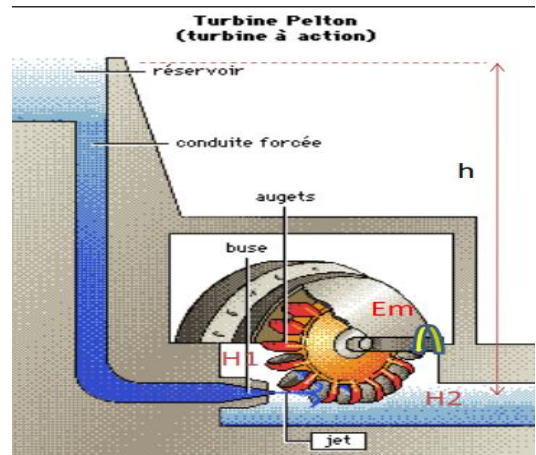
✦ Expression de la hauteur manométrique en fonction de débit $Hm = f(Q)$

Equation de Bernoulli

Le théorème de Bernoulli permet d'expliquer de nombreux phénomènes comme l'effet Venturi, la portance d'une aile d'avion, ou encore le fonctionnement d'une trompe à eau ...etc. Il possède différentes formulations et démonstrations.

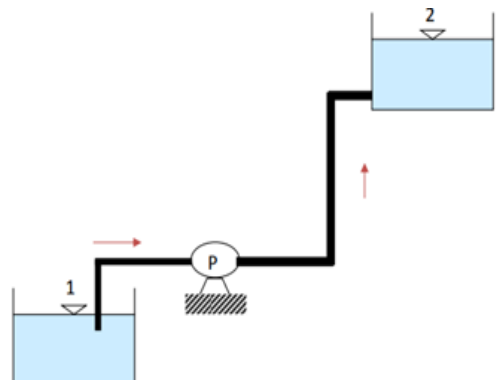
- Si de l'énergie H_t est fournie par l'écoulement à un dispositif mécanique, l'équation de Bernoulli devient :

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 - H_t = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + \Delta h$$



- Si de l'énergie H_p est fournie à l'écoulement par le moyen d'une pompe: Machines évatrices (pompes volumétriques, turbopompes) l'équation de Bernoulli devient

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + H_p = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + \Delta h$$



A partir de l'équation de Bernoulli pour une pompe nous avons :

$$P_1 = P_2 = P_{atm} \quad \text{Donc le terme } \frac{P}{\rho g} = 0$$

On pose que

$$G = \Delta Z + \Delta h,$$

$$\Delta Z = Z_2 - Z_1$$

P_1, P_2 : Pressions aux points 1 et 2
 P_{atm} : Pression atmosphérique
 H_p : Energie fournie au fluide en (m)
 Δh : Perte de charge totale (m)
 H_m : Hauteur manométrique en (m)

L'équation devient

$$H_m = G + \frac{1}{2g}(V_2^2 - V_1^2) \quad \text{***** (D)}$$

L'équation de continuité

$$Q_v = V * S = \text{Constant} \quad \implies \quad V = \frac{Q_v}{S}$$

$$V_1 S_1 = V_2 S_2 \quad \implies \quad V_2 = V_1 \frac{S_1}{S_2}$$

On remplace dans l'équation (D).

$$H_{mt} = G + \frac{1}{2g} \left(\frac{S_1^2 - S_2^2}{S_2^2 * S_1^2} \right) Q_v^2$$

$$H_{mt} = K Q_v^2$$

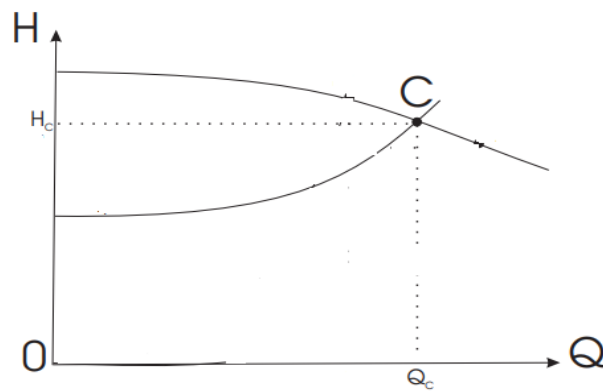
10- Point de fonctionnement

Compresseurs et turbines sont en général calculés pour un point de fonctionnement (débit volumique (Q_v) où le rendement est maximal : c'est le point de fonctionnement nominal.

On ne connaît pas le **point de fonctionnement** donc on doit tracer la caractéristique du circuit et trouver graphiquement le point de fonctionnement, la caractéristique du circuit donne à partir des éléments du circuit la valeur de la perte de charge (exprimé en mètre) en fonction de débit, cette courbe est donc aussi d'une H-Q dont l'intersection avec la caractéristique est le seul point de fonctionnement possible

La relation entre la hauteur manométrique et le débit est déduire à partir de l'équation de **Bernoulli**

$$H = K \cdot Q^2$$



Détermination graphique du point de fonctionnement d'une pompe

Figure 11 : D étermination graphique du point de fonctionnement d'une pompe