

Chapitre 1 : Définitions et théorie générale des turbomachines

1.1 Définitions, classification et diagramme des vitesses.

Les turbomachines rentrent dans la catégorie des machines à fluide qui sont des ensembles mécaniques où a lieu un échange d'énergie entre un fluide et un dispositif mobile.

Si le dispositif mobile est une enceinte de volume variable (pendant le transfert énergétique), où le fluide sera emprisonné, le système est fermé, le mouvement dérive d'une translation alternative ou d'une rotation, on parle de machine volumétrique.

Une turbomachine forme au contraire un système ouvert. Le dispositif mobile est une roue, munie de parois solides (aubes, augets ou pâles), dont le mouvement dérive d'une rotation. Il y a échange d'énergie par déviation des filets fluides dans les parois en question. C'est ce type de machines à fluides qui nous intéresse par la suite.

1.1.1 Définitions.

- + Une turbomachine est une machine thermique siège d'un transfert d'énergie mécanique entre un fluide et les parois solides d'un dispositif mobile.
- + Le mouvement dispositif mobil dérive généralement d'une roue en rotation (machine rotative).
- + Le transfert d'énergie s'effectue soit du fluide vers les parois solides, soit des parois solides vers le fluide, on parle de turbomachine génératrice ou réceptrice.
- + Une turbomachine quelle soit génératrice ou réceptrice comprendra toujours un rotor (roue) animé d'une vitesse de rotation uniforme N (tr/min), et d'un stator (bâti, etc..) immobile.
- + Une turbomachine peut être à fluide incompressible utilisant un liquide (l'eau, le lait, l'huile, le pétrole) ou à fluide compressible utilisant un gaz (l'air).

1.1.2 Classifications.

On distingue pour les machines à fluides une classification suivant les lois qui régissent leurs fonctionnement du point de vu transfert d'énergie. Celui-ci est lié à l'ensemble vitesse, poids, pression et viscosité du fluide. Les turbomachines peuvent être classées selon la nature du fluide, selon la fonction de la machine et selon le trajet du fluide par apport à l'axe de la machine.

Selon la nature du fluide :

Le fluide peut être compressible ou incompressible. Lorsqu'il s'agit d'un fluide compressible, sa masse volumique ρ subit des variations dont il faut tenir compte surtout si elles sont importantes. Lorsqu'il s'agit d'un fluide incompressible, sa masse volumique ρ ne subit aucune variation et elle est considérée toujours comme constante.

Selon la fonction de la machine

Il s'agit là de la manière dont l'énergie que reçoit la machine est transformée.

- Si la transformation se fait de l'énergie mécanique en énergie hydraulique (énergie fluide), la machine est dite *motrice*. Une pompe, un ventilateur sont considérés comme tels.
- Si la transformation se fait de l'énergie hydraulique en énergie mécanique, la machine est dite *réceptrice*. Une turbine hydraulique est considérée comme telle.

Dans certaines machines hydrauliques, il y a double transformation d'énergie. Par exemple, le cas des transmissions hydrauliques : le transformateur de couple où une machine génératrice (motrice) qui est la roue-pompe, est couplée par le biais du fluide à une machine réceptrice qui est la roue-turbine.

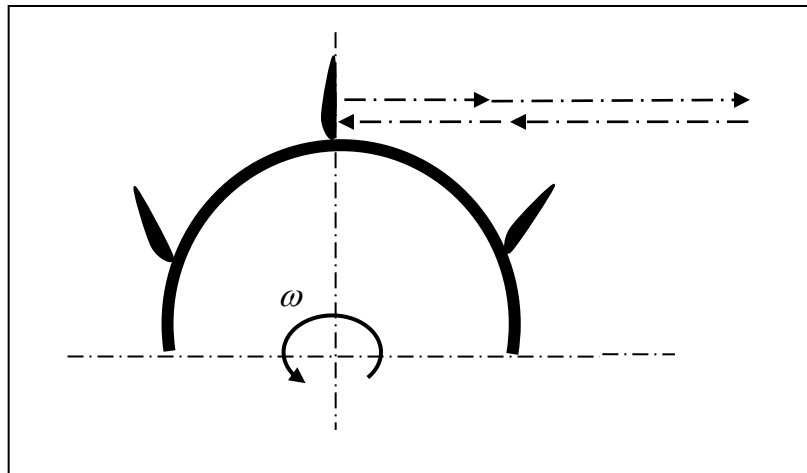
Selon le trajet du fluide par apport à l'axe de la machine :

En général, on distingue :

- Les turbomachines à passage tangentiel
- Les turbomachines à passage radiale (centrifuges ou centripètes)
- Les turbomachines à passage axiale (hélicoïdal).

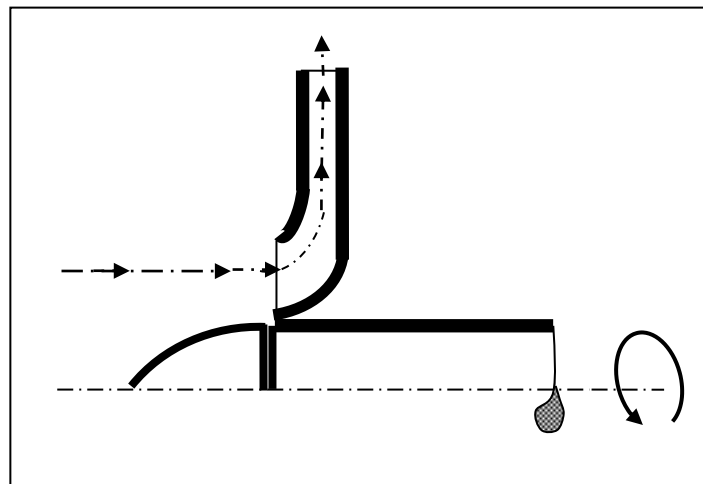
A ces trois types, on peut ajouté un quatrième, c'est les turbomachines mixtes (radiales et axiales), dans ce cas les particules fluides se déplacent selon une hélice centrifuge ou centripète, il existe : les hélico centripètes et les hélico centrifuges

Trajet tangentiel.



Roue tangentiel

Trajet radial

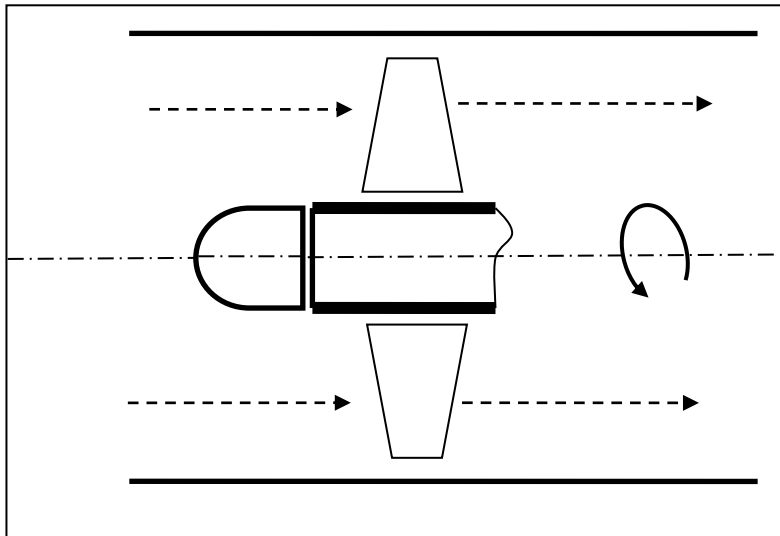


Roue radiale (centrifuge)

Le courant fluide entre parallèlement à l'axe et sort perpendiculairement à ce même axe.

Trajet axial.

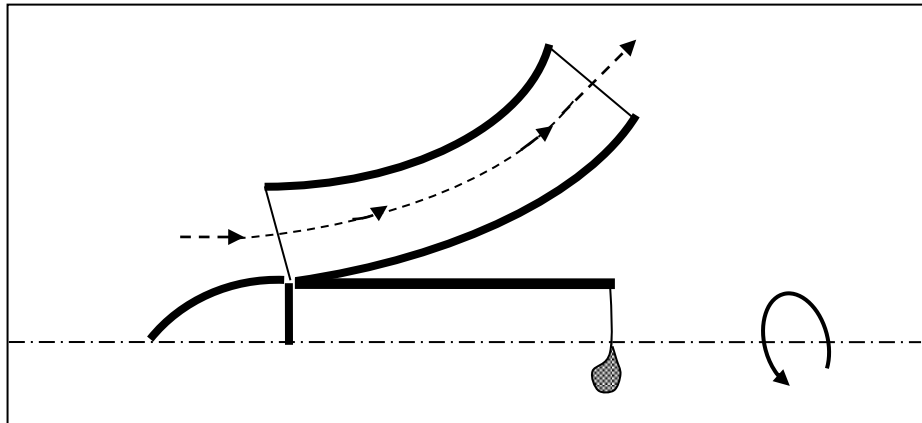
Ici, l'écoulement fluide a ses filets de courant qui sont situés sur des surfaces de révolution qui sont assimilées à des cylindres. Le courant fluide est axial à l'amont et l'aval de la roue.



Roue axiale

Trajet hélicoïdal.

Appelée également machine hélico-centrifuge, dans laquelle les filets de courant sont situés sur des surfaces de révolution (fig-3-) dont la méridienne est inclinée par rapport à l'axe.



Roue hélico centrifuge

1.1.3 Diagramme des vitesses :

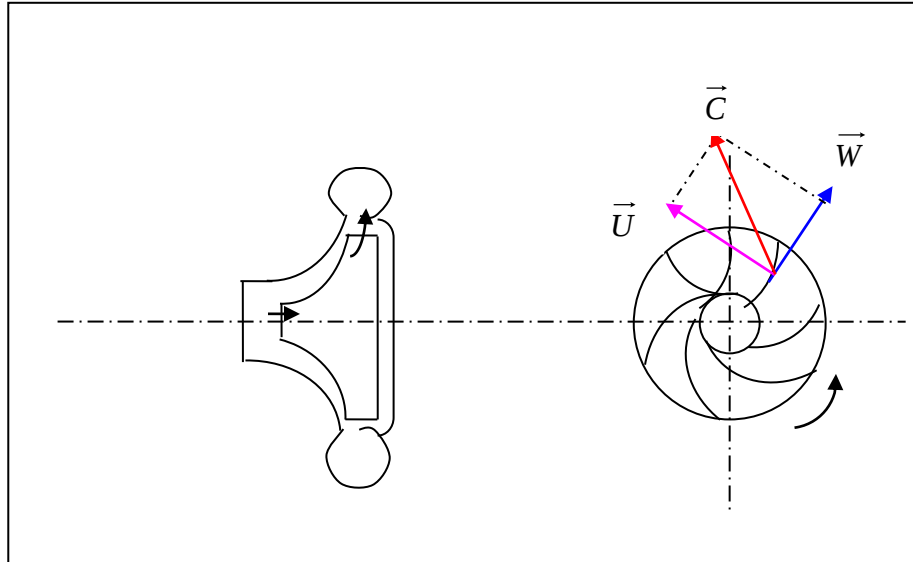
La particule fluide traversant la roue d'une turbomachine a un mouvement relatif par rapport à la roue et un mouvement absolu par rapport au stator immobile donc la vitesse absolue (C) est égale la vitesse d'entraînement (U) (rotation de la roue mobile) plus la vitesse relative (W).

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

avec:

$$U = \omega r, \quad \omega = \frac{2\pi N}{60} \text{ (rd/s)}, \quad N \text{ (tr/mn)} \text{ et } r \text{ (rayon de la roue)}$$

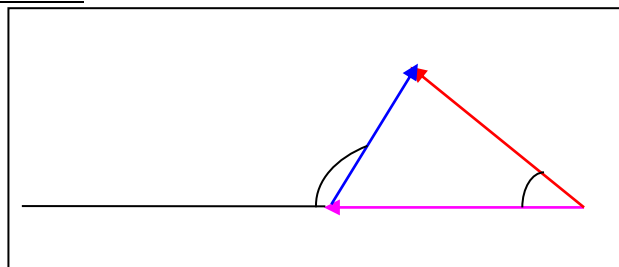
- **Cas d'une roue radiale:**



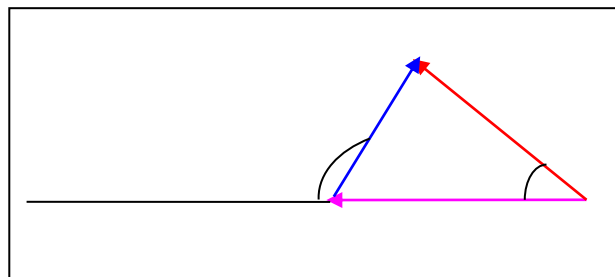
Roue radiale

Le diagramme des vitesses est composé de deux triangles des vitesses séparés l'un à l'entrée de la roue (e) et l'autre à la sortie (s) : U_e n'est pas égale à U_s

A l'entrée on a le triangle suivant:



A la sortie on a le triangle suivant:

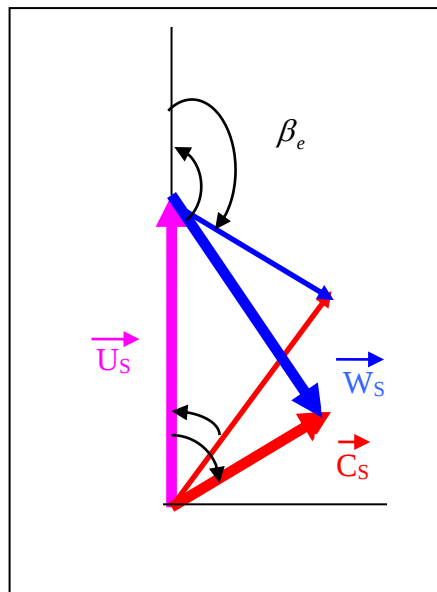


avec: en rouge la vitesse absolue, en rose la vitesse d'entrainement et bleu la vitesse relative.

Remarque: $\alpha_e = (\vec{U}_e, \vec{C}_e)$
 $\beta_e = (\vec{U}_e, \vec{W}_e)$
 $\beta_s = (\vec{U}_s, \vec{W}_s)$
 $\alpha_s = (\vec{U}_s, \vec{C}_s)$

- **Cas d'une roue axiale:**

Le diagramme des vitesses est composé de deux triangles des vitesses donnés sur la même figure : U_e est égale à U_s égale à U



Au rayon moyen (r_m) de la roue qui est égale au rayon extérieure plus le rayon intérieure divisé par deux, on a:

$$U = \omega.r_m$$

Remarque: dans le cas d'une machine axiale la vitesse d'entraînement de la particule fluide reste constante entre l'entrée et la sortie, ce n'est pas le cas pour une roue radiale.

A partir de l'un des triangles des vitesses on peut avoir :

$$C_r = C \sin \alpha \text{ ou } C_a = C \sin \alpha$$

C_r : La vitesse débitante ou méridienne dans le cas d'une roue radiale.

C_a : La vitesse débitante ou axiale dans le cas d'une roue axiale.

$$C_u = C \cos \alpha$$

C_u : La composante tangentielle de la vitesse absolue.

1.2 Théorie générale, Théorème d'EULER :

Le fonctionnement des turbomachines est basé sur le principe d'Euler qui s'énonce :

« Pour un écoulement permanent, la somme des quantités de mouvement sortantes à travers la surface d'un volume de fluide, est équivalente à la somme des forces qui lui sont appliquées ».

On va établir la théorie générale qui permet d'étudier les turbo machine à fluide incompressible, ainsi que celle à fluide compressible.

1.2.1 Equation de l'énergie :

L'équation d'énergie qui traduit le 1^{er} principe de la thermodynamique pour une unité de masse donnée par:

$$W_1 + Q = \underbrace{E_2 - E_1}_{\text{interne}} + \underbrace{P_2 W_2 - P_1 W_1}_{\text{transvasement}} + \underbrace{\frac{1}{2} V_2^2 - \frac{1}{2} V_1^2}_{\text{cinétique}} + \underbrace{g(h_2 - h_1)}_{\text{potentielle-négligeable}}$$

- Dans le cas d'une turbomachine à fluide incompressible

$$(\rho = \text{cte}) \quad v_2 = v_1 = \text{cte}$$

Ecoulement adiabatique ($T = \text{cte}$) $\Rightarrow E_1 = E_2$

$$W_1 = V(p_2 - p_1) + \frac{1}{2}(V_2^2 - V_1^2) = \frac{p_2 - p_1}{\rho} + \frac{1}{2}(V_2^2 - V_1^2)$$

V : étant la vitesse absolue de la particule d'un fluide :

$$W_T = \frac{p_2 - p_1}{\rho} + \frac{1}{2}(C_2^2 - C_1^2)$$

- Dans le cas d'une turbomachine à fluide compressible

$$W_T + Q_{12} = H_2 - H_1 + \frac{1}{2}(C_2^2 - C_1^2)$$

Relations isentropiques dans le cas d'un gaz parfait

L'équation de l'état du fluide s'écrit : $f(p, \rho, T) = 0$

Pour une unité de masse et dans le cas d'un gaz parfait on a :

$$\frac{p}{\rho} = r.T$$

Deux autres propriétés utiles sont les capacités thermiques à volume constant et à pression constante :

$$C_v = \frac{dE}{dT} \quad \text{et} \quad C_p = \frac{dH}{dT}$$

Les autres relations sont :

$$r = C_p - C_v \text{ et } \gamma = \frac{C_p}{C_v}$$

Où E est l'énergie interne spécifique et $H = C_p T$ est l'enthalpie spécifique. Elles sont traitées comme constantes dans l'analyse des écoulements compressibles élémentaires.

Les valeurs usuelles pour l'air sont :

$$C_v = 718 \text{ J/Kg K}, C_p = 1005 \text{ J/Kg K}, \gamma = 1,4, r = 287 \text{ J/Kg K}$$

Pour une évolution isentropique: $\frac{P}{\rho^\gamma} = \text{const.ante}$

Une transformation thermodynamique isentropique est une transformation thermodynamique réversible, adiabatique dans laquelle on néglige les frottements visqueux.

1.2.2 Théorème d'Euler. Equation d'Euler :

En va établir l'équation d'Euler, dans le cas de turbo machine à fluide incompressible qui sera valable dans le cas de turbo machine à fluide compressible, pour cela on suppose un écoulement absolu permanent et axisymétrique à l'entrée de la roue qui possède un nombre infini d'arbres pour cela on utilise l'équation de l'énergie et les triangles de vitesse.

Cas d'une roue axiale :

L'équation de l'énergie s'écrit entre l'entrée et la sortie :

$$\omega_{1-2} = \frac{p_2 - p_1}{\delta} + \frac{1}{2} (C_2^2 - C_1^2)$$

Pour un observateur qui place la roue, la particule fluide auront la vitesse ω_1 et ω_2 l'équation de l'énergie s'écrit :

$$W_{1-2} = \frac{1}{2} (\omega_1^2 - \omega_2^2) + \frac{1}{2} (C_2^2 - C_1^2)$$

En utilisant les triangles de vitesse à l'entrée et à la sortie de la roue:

$$w_1^2 = U^2 + C_1^2 - 2U.C_1 \cos \alpha_1$$

$$w_2^2 = U^2 + C_2^2 - 2U.C_2 \cos \alpha_2$$

On remplace et on a :

$$W_{12} = U \Delta C u = U C_{2u} - U C_{1u}$$

C'est l'équation d'Euler appliquée à une turbo machine à passage axiale.

Cas d'une roue radiale :

Pour cette étude on aura besoin de même type d'équations dans les roues en passage radial. La variation de cette vitesse d'entraînement montre que la variation de pression « ΔP »

$$\Delta P = P_2 - P_1 \text{ entre l'entrée et la sortie et forme deux composantes}$$

$$\Delta P = \Delta P' + \Delta P''$$

$\Delta P'$: C'est la variation de pression d'un force radial

$\Delta P''$: C'est la variation de pression du l'énergie cinétique relatif.

L'équation du l'énergie s'écrit :

$$W_{1-2} = \frac{\Delta p'}{\delta} + \frac{\Delta p''}{\delta} + \frac{1}{2}(C_2^2 - C_1^2)$$

Pour un observateur qui place de la roue l'équation de l'énergie s'écrit :

$$O = \frac{\Delta p'}{\delta} + \frac{1}{2}(w_2^2 - w_1^2)$$

L'expression de la force radial :

$$dF = \omega^2 r d.m$$

En intégrant entre r_1 et r_2

$$\frac{\Delta p'}{\delta} = \frac{\omega^2}{2}(r_2^2 - r_1^2)$$

$$\frac{\Delta p''}{\delta} = \frac{1}{2}(U_2^2 - U_1^2)$$

$$W_{1-2} = \frac{1}{2}(U_2^2 - U_1^2) + \frac{1}{2}(\omega_1^2 - \omega_2^2) + \frac{1}{2}(C_2^2 - C_1^2)$$

C'est l'équation générale et en utilisant les triangles des vitesses, on a:

$$W_{1-2} = U_2 C_{2U} - U_1 C_{1U}$$

C'est l'équation d'Euler appliquée à une turbo machine à passage radial.

1.3 Hauteur. Puissance. Rendements. Composantes de l'énergie transféré et degré de réaction :

1.3.1 Hauteur. Puissance. Rendements

La hauteur de charge (H) d'une turbomachine en mètre de fluide de travail est donnée par:

$$W_{12} = g.H \text{ avec } g \text{ l'accélération de gravitation universelle.}$$

L'expression de puissance en fonction du travail est donnée par:

$$P = q_m \cdot W_{1-2} [J/s] \text{ où } [W] \text{ avec } q_m \text{ le débit massique (Kg/s)}$$

L'expression de couple mécanique est donné par :

$$\Gamma_m = \frac{P}{\omega} [N.m]$$

On doit en réalité tenir compte du fait qu'il existe un travail réel pour une turbo machine donnée qui soit inférieur ou supérieur au travail théorique pour cela on introduit le rendement caractérisant les pertes dans une turbomachine parmi les rendements on cite :

Les pertes par frottements visqueux et les pertes par choc, les pertes par fuites et les pertes mécaniques, caractérisées respectivement par un rendement hydraulique, un rendement volumétrique et un rendement mécanique dont les expressions seront données lors de l'étude des différentes turbomachines.

1.3.2 Composante de l'énergie transférée, degré de réaction :

L'équation de l'énergie pour une turbo machine donnée peut s'écrire :

$$W_{1-2} = \underbrace{\frac{1}{2}(U_2^2 - U_1^2)}_{\substack{\text{Variation} \\ \text{del'énergie} \\ \text{cénitrique} \\ \text{radial}}} + \underbrace{\frac{1}{2}(\omega_1^2 - \omega_2^2)}_{\substack{\text{Variation} \\ \text{del'énergie} \\ \text{cénitrique} \\ \text{relatif}}} + \underbrace{\frac{1}{2}(C_2^2 - C_1^2)}_{\substack{\text{Variation} \\ \text{del'énergie} \\ \text{cénitrique} \\ \text{absolue}}}$$

Les trois termes de cette expression représentent les composants d'énergie transférée.

Le degré de réaction permet de distinguer si la turbo machine est action ou a réaction, avec:

$$\sigma = \frac{p_2 - p_1}{\rho W_{12}} \rightarrow \text{Turbo machine incompressible}$$

$$\sigma = \frac{H_2 - H_1}{H_{t1} - H_{t2}} \rightarrow \text{Turbo machine compressible}$$

avec H et H_t enthalpies statique et totale.