REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DE MOHAMED SEDDIK BEN YAHIA DE JIJEL

جامعة محمد الصديق بن يحيى

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Mécanique

Cours

Turbomachines II

Chapitre 3

(Niveau : L3 Energétique)

Par

S.DJIMLI

Année Universitaire 2020/2021

Chapitre III: Etude d'une Turbine Axiale

1. Introduction:

Les turbines à vapeur et à gaz à écoulement axial sont des turbomachines qui dilatent un fluide en mouvement continu, essentiellement dans la direction axiale. Le développement de la turbine à vapeur et à gaz à écoulement axial a été entravé par la nécessité d'obtenir à la fois un débit et un taux de compression élevés.

Initialement, l'air était fournis par des compresseurs centrifuges, par la suite les compresseurs axiaux ont été développés et utilisés dans les turboréacteurs, dans lesquels la puissance développée par la turbine est utilisée pour faire fonctionner le compresseur axial.

La turbine à écoulement axial a des applications très larges dans la propulsion des avions, installations industrielles et marines. Dans ce chapitre, les turbines à vapeur et à gaz sont considérées ensemble, avec l'hypothèse que la même théorie s'applique aux deux types de machines. Cela n'est valable que lorsque la nature de la vapeur utilisée dans la turbine à vapeur existe à l'état surchauffé qui est supposé se comporter comme un gaz idéal. De nos jours, la puissance de sortie des turbines à vapeur varie de quelques kilowatts à 660 kW. Pour avoir une puissance de sortie élevée, la vapeur surchauffée utilisant un surchauffeur est conçu pour se dilater dans la turbine à une pression inférieure à la pression atmosphérique dans le condenseur, pour extraire l'énergie maximale de la vapeur.

Les turbines à gaz sont utilisées comme unité de puissance pour la propulsion des gros avions à réaction, car elles ont un rapport puissance / poids très élevé. Dans le cas de la propulsion à réaction d'un avion, pour avoir une poussée de jet suffisante, des vitesses axiales élevées sont souhaitables. Habituellement, une ou aux plus rangées des tuyères et des aubes sont nécessaires. Mais les turbines à gaz utilisées dans les usines industrielles ou marines nécessitent un grand nombre d'étages. Ceci est nécessaire pour réduire la perte d'énergie et pour réduire la charge sur les aubes, pour donner à la turbine une longue durée de vie. Les turbines à vapeur sont utilisées dans les centrales à combustibles fossiles et pour la propulsion à vapeur des navires, bien que les unités de propulsion des turbines à gaz soient souvent installées dans la classe plus petite des navires de guerre.

2. La Description:

Le principe de production de l'énergie est basé sur le transfert de l'énergie thermique haute pression en énergie cinétique. Ceci est réalisé par faire passer le gaz alternativement à travers des rangées d'aubes fixes et mobiles. L'énergie cinétique du gaz est réduit dans les aubes mobiles, qui sont attachées au arbre de la turbine et récupérées dans les aubes fixes au carter (Fig.1).

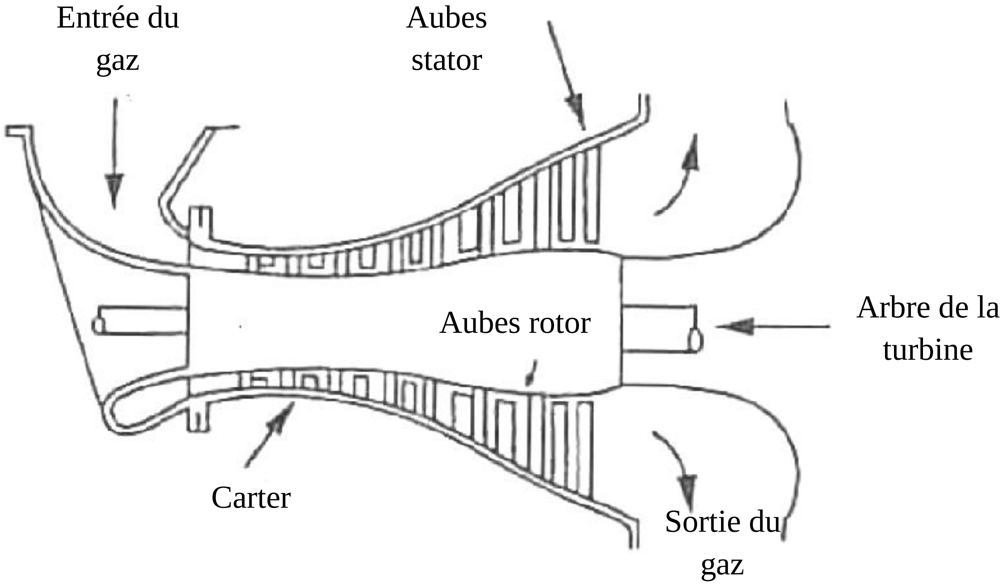

Fig.1: Turbine à écoulement axial

La densité du gaz diminue progressivement fur à mesure que le gaz se déplace à travers la turbine et pour maintenir une vitesse d'écoulement axial constante, la hauteur de l'aube est augmentée vers l'extrémité basse pression.

La rangée de stators est souvent appelée la range de tuyères et dans certains types de turbines à vapeur, la rangée de tuyère se compose d'un ensemble de tuyères convergentes espacées autour du tambour.

Lors de l'examen du flux à travers l'étage, les hypothèses suivantes seront faites:

1. Le rayon moyen est constat, sauf indication contraire.
2. La hauteur de l'aube / le rayon moyen est petit, ce qui permet d'utiliser la théorie de l'écoulement bidimensionnel.

3. Triangles De Vitesse Pour Une Turbine A Ecoulement Axial:

Pou un seul étage de turbine les triangles de vitesse sont représentés sur la figure 2.

on donne: $\vec{U} = \vec{V} + \vec{W}$ et,

U : Vitesse absolue de l'écoulement

W : Vitesse relative de l'écoulement

V : Vitesse périphérique du rotor

Uv, Ux, : Composante tangentielle et axiale de la vitesse absolue du fluide

Wv, Wx : Composante tangentielle, axiale de la vitesse relative du fluide

α : L'angle des vitesses absolues mesurés par rapport à la direction axiale

β: l'angle des vitesses relatives mesurés par rapport à la direction axiale

La forme des aubes du rotor dépend des angles ***β*** (des vitesses relatives dans le repère du rotor) et la forme des aubes du stator dépend des angles ***α*** (des vitesses absolues dans le repère fixe). Lorsqu'on garde ***ρA=cte***, la vitesse périphérique V et la composante axiale ***Ux*** demeurent constantes.

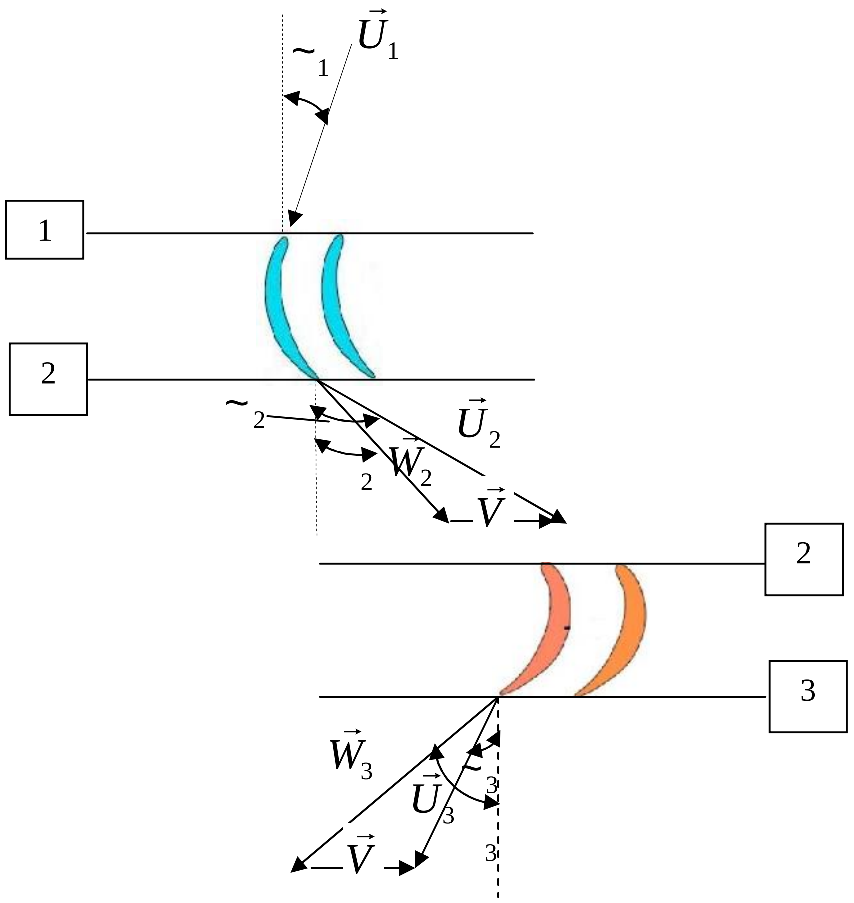

Fig.2: Triangles de vitesses pour un étage d'une turbine à écoulement axial

Une rangée d’aubes du stator suivie d’un ensemble d’aubes du rotor est considérée comme un étage. L'entrée des aubes du stator est désignée par l'indice 1. L'entrée à la section du rotor est désignée par l'indice 2 et la sortie de la section du rotor est indiquée par l'indice 3

. Tous les angles d'écoulement sont mesurés dans la direction axiale et il faut faire attention lorsque les angles d'écoulement sont mesurés à partir de la direction du mouvement de l'aube, c'est-à-dire de la direction tangentielle.

Le gaz quitte les aubes du stator avec une vitesse absolue U_2 à l'angle α_2 et en soustrayant le vecteur de vitesse des aubes V, le vecteur de vitesse relative à l'entrée du rotor W est déterminé. En se déplaçant à travers la pale de rotor, la direction d'écoulement est modifiée et la pression réduite tandis que la vitesse absolue est diminuée et la vitesse relative augmente.. Le gaz quitte l'aube tangentiellement à l'angle β_2 avec une vitesse relative W_2.

La soustraction vectorielle de la vitesse de l'aube donne la vitesse absolue U_3. C'est maintenant la vitesse d'entrée vers la prochaine rangée de stators à l'angle $\alpha_{3,}$ pour un étage normal est égal à U_1 à α_1.

3.1 Turbine à réaction:

Le passage du fluide à travers un étage d'une turbine à réaction, engendrée une diminution de la pression dans le stator, mais une augmentation de la vitesse absolue. Dans le rotor la vitesse relative augmente suite à la diminution de la vitesse absolue (fig.3).

Turbine à réaction	**U**	**W**	**P**	**A**
Stator	↗	**-**	↘	↘
Rotor	↘	↗	↘	↘

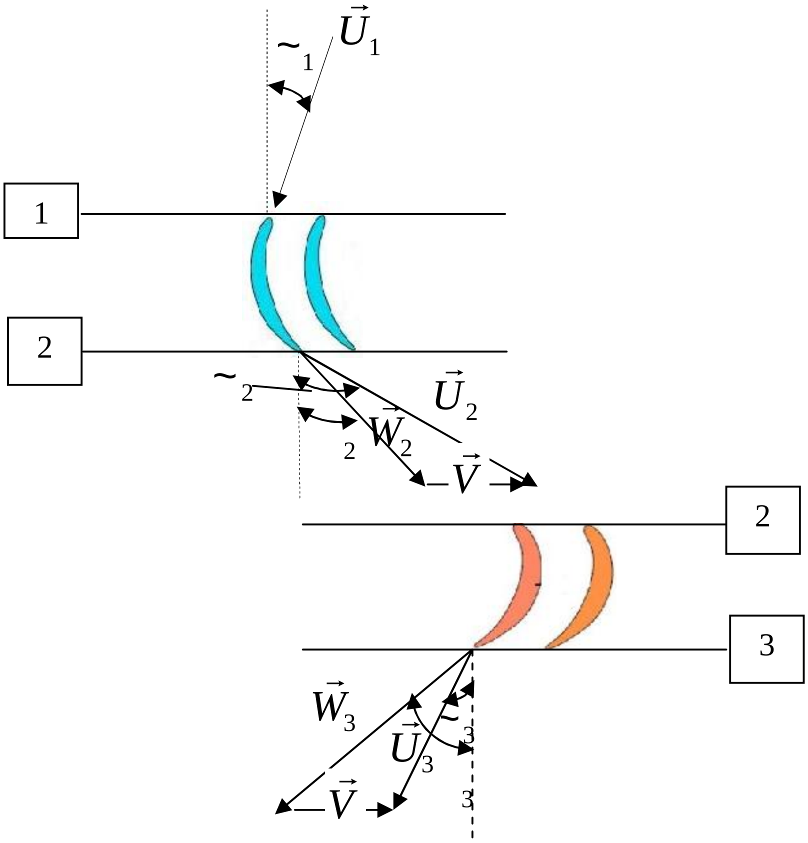

Fig.3: Triangles de vitesses pour un étage d'une turbine à réaction (écoulement axial)

3.2 Turbine à action:

L'écoulement du fluide dans un étage d'une turbine à action est caractérisé par la diminution de la pression et l'augmentation de la vitesse absolue à travers le stator (les canaux fixes). Dans le rotor la pression et la vitesse relative W restent constantes, mais on remarque le changement de la direction de la vitesse (fig.4).

Turbine à action	**U**	**W**	**P**	**A**
Stator	↗	-	↘	↘
Rotor	↘	Cte	Cte	Cte

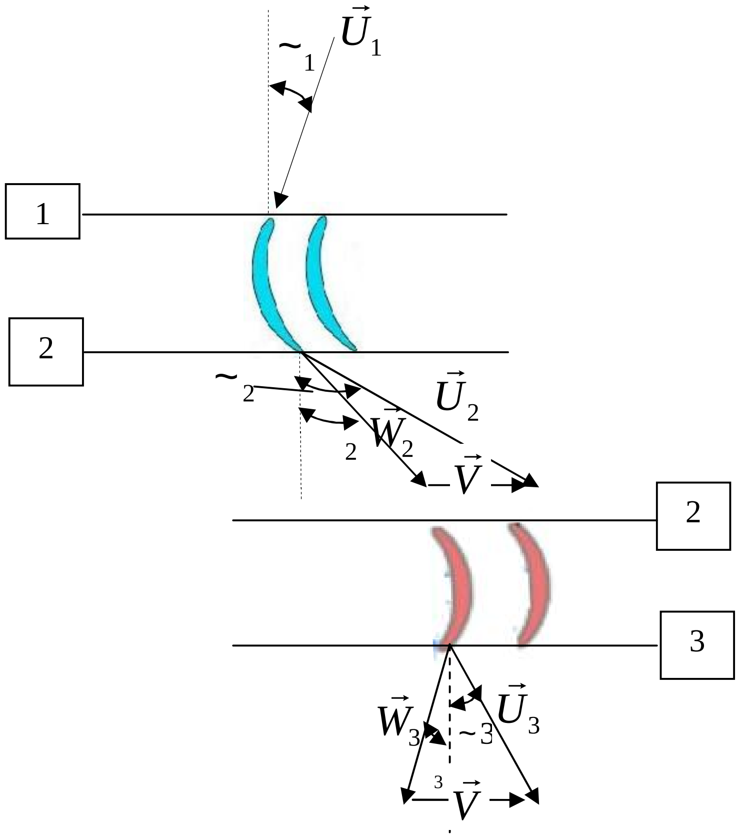

Fig.4: Triangles de vitesses pour un étage d'une turbine à action (écoulement axial)

3.3 Etage Normal:

Pour les machines axiales, la composante axiale de la vitesse absolue reste constante entre l'entrée et la sortie ($U_{2x} = U_{3x}$) de l'étage, et la vitesse d'entrainement est considérée constante. Si les triangles des vitesses à l'entrée et à la sortie de l'étage sont superposés, on appelait un étage normal (étage périodique) dont:

$$U_3 = U_1$$

$$\sim_3 = \sim_1$$

$$U_x = Cte$$

$$V = Cte$$

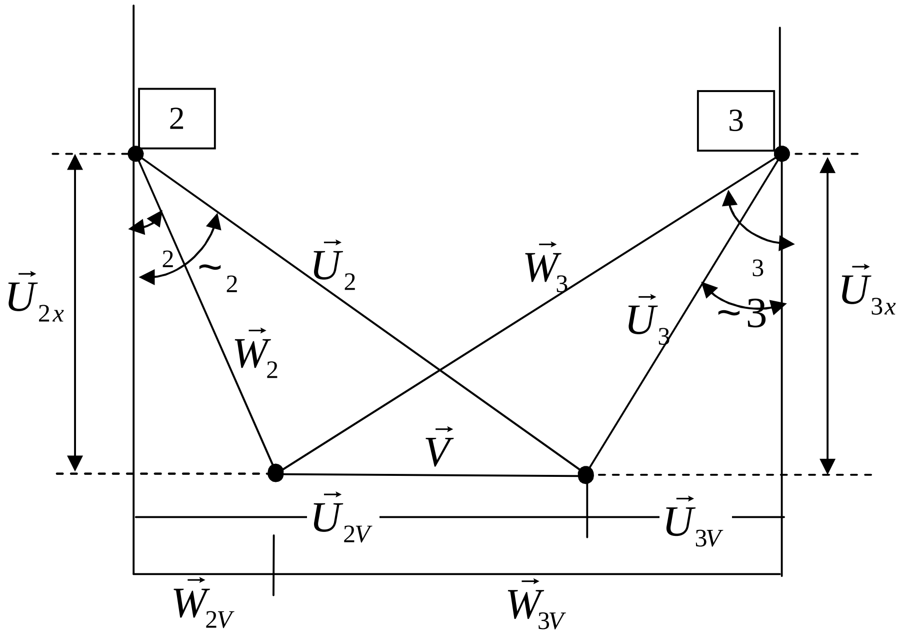

Fig.5: Triangles de vitesses pour un étage normal d'une turbine axiale à réaction

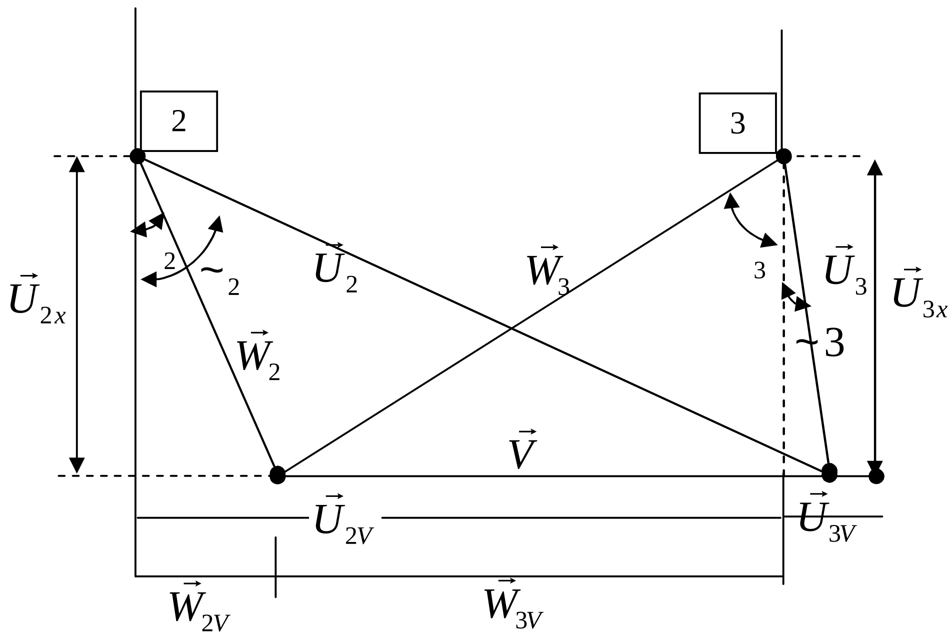

Fig.6 : Triangles de vitesses pour un étage normal d'une turbine axiale à action

4. Etude thermodynamique:

D'après la figure 5, les deux triangles de vitesse sont superposés et le transfert d'énergie de la turbine est donné par l'équation d'Euler.

$$H = V(U_{3v} - U_{2v}) / g$$

Et comme U_{3v} est dans la direction X négative, le travail effectué par unité de débit massique est donné par : $$V(U_{3v} + U_{2v}) = W/m$$

Si $U_{2x} = U_{3x}$, il y aura une poussée axiale dans le sens de l'écoulement. Cependant, on suppose que la vitesse axiale U_x est constante et donc :

$$W/m = VU_x(\tan g\sim_3 + \tan g\sim_2)$$

$$W/m = VU_x(\tan gB_3 + \tan gB_2)\ \textbf{..(1)}$$

Cette équation est souvent désignée sous le nom de diagramme de travail par unité de débit massique.

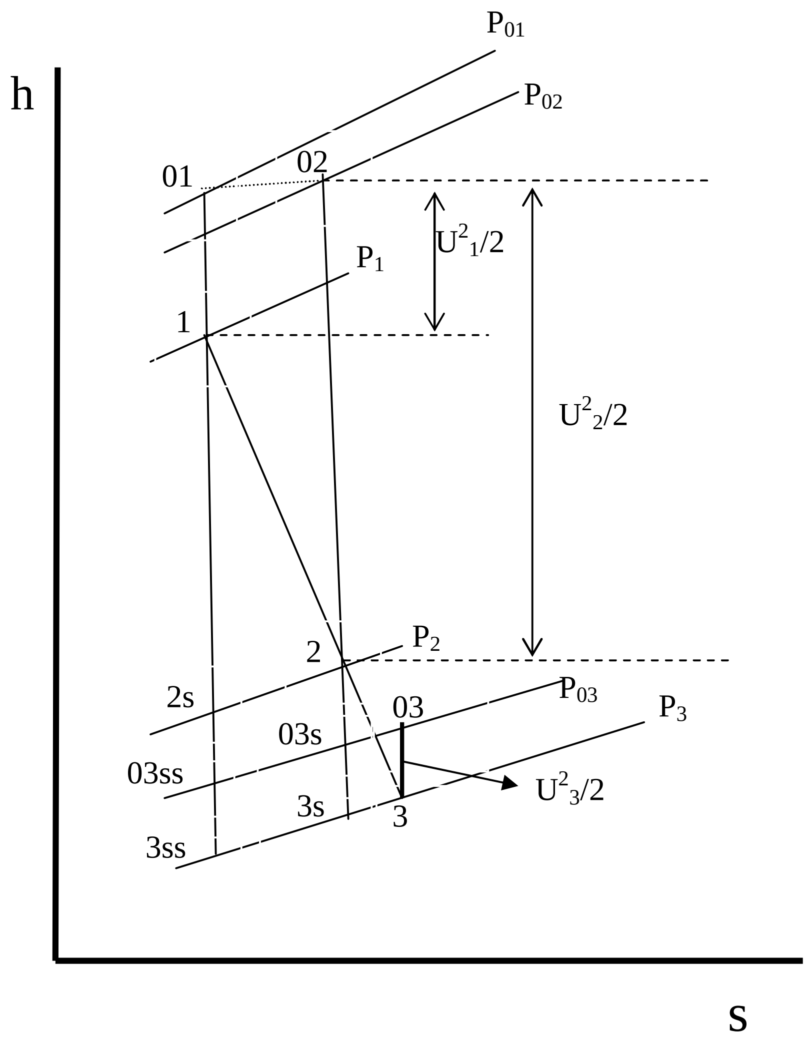

Fig.7 : Le diagramme de Mollier ou h-s pour une turbine à écoulement axial

La pression totale P_{01} et l'enthalpie totale h_{01} se réfèrent aux conditions d'entrée du stator. Pour un écoulement adiabatique à travers les aubes de stator ou les tuyères $h_{01} = h_{02}$ en raison d'irréversibilités, la pression totale chute à P_{02} à la sortie du stator (ou à l'entrée du rotor). La détente à P_{03} et l'enthalpie totale h_{03} a lieu à la sortie du rotor.
Le travail effectué par unité de débit massique par le gaz est donné par:

$$W/m = h_{01} - h_{03} = h_{02} - h_{03}$$
$$or \quad W/m = cp\,(T_{02} - T_{03}) \quad \textbf{..(2)}$$

Substitution l'équation (1) dans l'équation (2)

$$W/m = cp\,(T_{02} - T_{03}) = VU_x(\tan gB_3 + \tan gB_2) \quad \textbf{..(3)}$$

Il convient de noter que le facteur de travail effectué (λ) n'est pas utilisé dans l'équation (3). En effet, dans une turbine à gaz ou à vapeur, l'écoulement à travers le passage de l'aube s'accélère. Par contre l'effet de la croissance de la couche limite dans la turbine est négligeable. Pour un étage normal dans lequel $U_1 = U_3$, la chute de température statique à travers l'étage est égale à la chute de température totale:

$$T_1 - T_3 = T_{01} - T_{03} \quad (U_1 = U_3)$$

le rendement isentropique total à total de l'étage de turbine est défini par:

$\eta_{tt,t}$ =Travail isentropique effectué / Travail réel effectué par le gaz

$$\eta_{tt} = (T_{01} - T_{03})/(T_{01} - T_{03s})$$
$$T_{01} - T_{03} = \eta_{tt}\, T_{01}\left(1 - T_{03s}/T_{01}\right)$$

$$T_{01} - T_{03} = \eta_{tt}\, T_{01}\left(\left[1 - (P_{03}/P_{01})^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}}\right]\right)$$

4.1 Rendement total à total

Ceci est utilisé lorsque l'énergie cinétique à la sortie de l'étage est distinguée à la production du travail.

$$\eta_{tt} = \frac{h_{01} - h_{03}}{h_{01} - h_{03s}}$$

$$\eta_{tt} = \frac{h_1 - h_3}{h_1 - h_{3s}} \quad \textit{pour un étage normal} \quad U_1 = U_3$$

4.2 Rendement total-statique

Ceci est utilisé lorsque l'énergie cinétique à la sortie est perdue et n'est donc pas utilisée pour générer du travail. Il est défini comme

$$\eta_{ts} = \frac{h_{01} - h_{03}}{h_{01} - h_{3s}}$$

5. Etude dynamique :

Dans le rotor l'énergie cinétique du fluide se transforme en énergie mécanique (mouvement de rotation); pour déterminer les efforts (forces élémentaires de pression et de frottement) exercée sur les aubes de la turbine, on considère un volume de contrôle qui contient une aube fig.8.

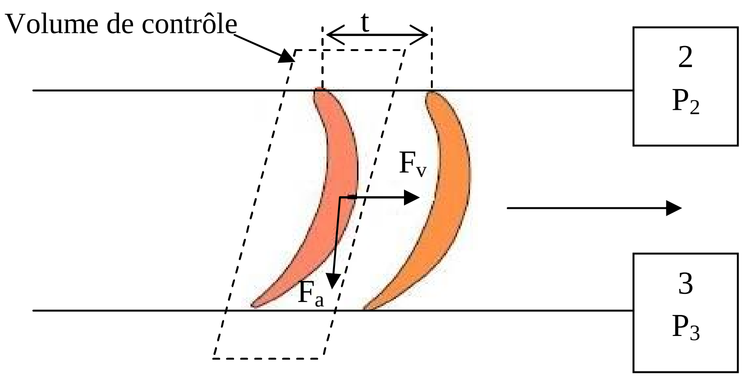

Fig.8: Les forces élémentaires sur les aubes d'une turbine axiale

Dans le repère mobile (relatif) la détente entraine une augmentation de la vitesse relative (W_3 super W_2), l'application de théorème de quantité de mouvement dans la direction tangentielle V dans l'effort tangentiel:

$$F_V = D(W_{3V} - W_{2V})$$

D: débit massique par unité de longueur dans un canal inter-aubes:

$$\begin{aligned} D &= \ddot{\ }_2 W_2 \, Cos \quad _2 \, t \\ &= \ddot{\ }_3 W_3 \, Cos \quad _3 \, t \end{aligned}$$ Avec t=S*1 et $W_{2x}=W_2 Cos\beta_2$

Dans la direction axiale

$$\mathbf{F_a + (P_3 - P_2).t = D\ (W_{3x} - W_{2x})}$$

$$\mathbf{F_a = D\ (W_{3x} - W_{2x}) + (P_2 - P_3).t}$$

Si $U_x = Cte = W_x$

Donc: $\mathbf{F_a = (P_2 - P_3).t}$

Et l'expression du couple appliqué par le fluide:

$$\mathbf{C = q_m . r_{moy} . (U_{3v} - U_{2v})} \text{ où } \mathbf{q_m = n.D}$$

et n : nombre total des aubes.

Donc la puissance nécessaire pour entrainer l'étage:

$$\mathbf{P_{et} = C.\omega = q_m . r_{moy} . \omega (U_{3v} - U_{2V})}$$

$$\mathbf{P_{et} = C.\omega = q_m . V . (U_{3v} - U_{2V})}$$

6. Les Coefficients:

6.1 Coefficient de charge:

La capacité du travail de l'étage est exprimée en termes de coefficient de chute de température (ou) «coefficient de charge de l'aube»:

$$\Psi = \frac{-W_e}{V^2} = \frac{h_{02} - h_{03}}{V^2} = \frac{\Delta h_0}{V^2}$$

Parfois ψ est considéré positif pour les turbines et négatif pour les compresseurs

$$\Psi = ¦_{s} \frac{\Delta h_{0s}}{V^{2}}$$

le coefficient de charge est appelé aussi le coefficient de température:

$$\Psi = \frac{\Delta h_{0}}{V^{2}} = \frac{C_{p}\Delta T_{0}}{V^{2}}$$

pour les turbine à gaz :

- ψ>1.5: indique des pâles fortement chargé
- ψ<1: indique des pâles faiblement chargé

6.2 <u>Coefficient de débit:</u>

Ce paramètre est directement proportionnel à la vitesse axiale.

$$¤ = \frac{U_{x}}{V}$$

Si : $\mathbf{U_x = W_x = Cte}$

Le travail est donné par la relation d'Euler:

$$\mathbf{W = V(U_{3V} - U_{2V}) = V(W_{3V} - W_{2V})}$$

$$\mathbf{= V.\ U_x\ (tg\alpha_3 - tg\alpha_2) = V.\ U_x\ (tg\beta_3 - tg\beta_2),\ on\ a\ :(tg\alpha = U_V/U_x)}$$

Divisant cette relation par vitesse V^2:

$$\mathbf{W/V^2 = (V/V^2).\ U_x\ (tg\alpha_3 - tg\alpha_2) = -\psi = \Phi(tg\alpha_3 - tg\alpha_2)}$$

et $$\mathbf{\psi = \Phi(tg\alpha_2 - tg\alpha_3)}$$

6.3 <u>Dégrée de réaction:</u>

Le degré de réaction est défini par: R= Chute d'enthalpie dans le rotor/ Chute d'enthalpie dans l'étage

$$R = \frac{h_2 - h_3}{h_1 - h_3} = \frac{(h_1 - h_3) - (h_1 - h_2)}{h_1 - h_3}$$ **..(4)**

Cela montre le facteur de la détente de l'étage, qui se produit dans le rotor, et il est habituel de définir en terme de chute de température statique, à savoir:

$$R = \frac{T_2 - T_3}{T_1 - T_3}$$

Dans le repère relatif l'équation d'énergie de l'écoulement du gaz dans le rotor s'écrite:

$$h_2 + \frac{W_2^2}{2} = h_3 + \frac{W_3^2}{2} \quad \Rightarrow h_2 - h_3 = \frac{1}{2}(W_3^2 - W_2^2)$$

Si : **$W_2 = W_3$** **=> $h_2 = h_3$ et R_{Th}=Cte**

A travers le stator l'enthalpie total est constante donc:

$$h_1 - h_2 = \frac{1}{2}(U_2^2 - U_1^2)$$

Si: U_x=Cte => $h_1 - h_2 = \frac{1}{2}(U_{V2}^2 - U_{V1}^2)$

Et comme **$tg\alpha = U_V/U_X$ => $U_X = U_v.\ tg\alpha$**

$$h_1 - h_2 = \frac{1}{2}U_x^2(tg^2\sim_2 - tg^2\sim_1)$$

Pour un étage normal

$$\begin{aligned} U_3 &= U_1 \\ \sim_3 &= \sim_1 \\ U_x &= Cte \end{aligned}$$

Donc : $h_1 - h_3 = h_{01} - h_{03} = h_1 + \frac{U_1^2}{2} - h_3 - \frac{U_3^2}{2}$

Alors : $$W = h_1 - h_3 = h_{01} - h_{03} = -\cdot\ V^2$$

Et l'équation (4), peut être écrite :

$$R = 1 - \frac{U_x^2}{2}\frac{tg^2\sim_2 - tg^2\sim_3}{\cdot\ V^2}$$

$$R = 1 - \frac{¤^2}{2}\frac{tg^2\sim_2 - tg^2\sim_3}{\cdot}$$

on a : **ψ=Φ(tgα$_2$ - tgα$_3$) ..(5)**

Replacement dans l'équation précédente:

$$R = 1 - \frac{¤^2}{2}\frac{tg^2\sim_2 - tg^2\sim_3}{¤(\mathrm{tg}\sim_2\ \ -\mathrm{tg}\sim_3)}$$

$$R = 1 - \frac{¤}{2}(tg\sim_2 + tg\sim_3)\ \textbf{..(6)}$$

De l'équation (5) : $$\frac{\cdot}{¤} = (tg\sim_2 - tg\sim_3)$$

De l'équation (6) : $$(tg\sim_2 + tg\sim_3) = \frac{2-2R}{¤}$$

Donc $$\left\{\begin{aligned} tg\sim_2 &= \frac{1-R+\frac{\cdot}{2}}{¤} \\ tg\sim_3 &= \frac{1-R-\frac{\cdot}{2}}{¤} \end{aligned}\right.$$

7. <u>Remarque:</u>

1- Ces dernières relations nous permettant de déterminer les angles de l'écoulement α_2 et α_3 en choisissant ψ, Φ et R

2- Ces relations sont valables seulement pour un étage périodique

3- Par la même procédure on peut démontrer que:

$$\left\{\begin{aligned} tg\ \ _2 &= -\frac{R+\frac{\cdot}{2}}{\text{¤}} \\ tg\ \ _3 &= -\frac{R-\frac{\cdot}{2}}{\text{¤}} \end{aligned}\right\}$$

4- Un étage avec un dégrée de réaction R=50% on a:

$$\left\{\begin{aligned} tg\sim_2 &= \frac{1+\cdot}{2\text{¤}} \\ tg\sim_3 &= \frac{1-\cdot}{2\text{¤}} \end{aligned}\right\} \text{ et } \left\{\begin{aligned} tg\ \ _2 &= -\frac{1-\cdot}{2\text{¤}} \\ tg\ \ _3 &= -\frac{1+\cdot}{2\text{¤}} \end{aligned}\right\}$$

On remarque que : $tg\sim_2 = -tg\ \ _3 \quad et \quad tg\sim_3 = -tg\ \ _2$

Sachant que les valeurs absolues des angles α et β sont inférieurs 90°, on peut écrire:

$$\sim_2 = -\ \ _3 \quad et \quad \sim_3 = -\ \ _2$$

Puisque: **U_x= =W_x=Cte**

$$W_3^2 = W_{3v}^2 + W_{3x}^2 = U_x^2 + W_{3x}^2 tg\ \ _3$$

$$= U_x^2 + U_{2V}^2 = U_2^2$$

$$W_3 = U_2$$

De la même manière, on aura $W_2=U_3$ ($U_{2V}=W_{3V}$ et $U_{3V}=W_{2V}$), on obtient alors un triangle des vitesses symétrique:

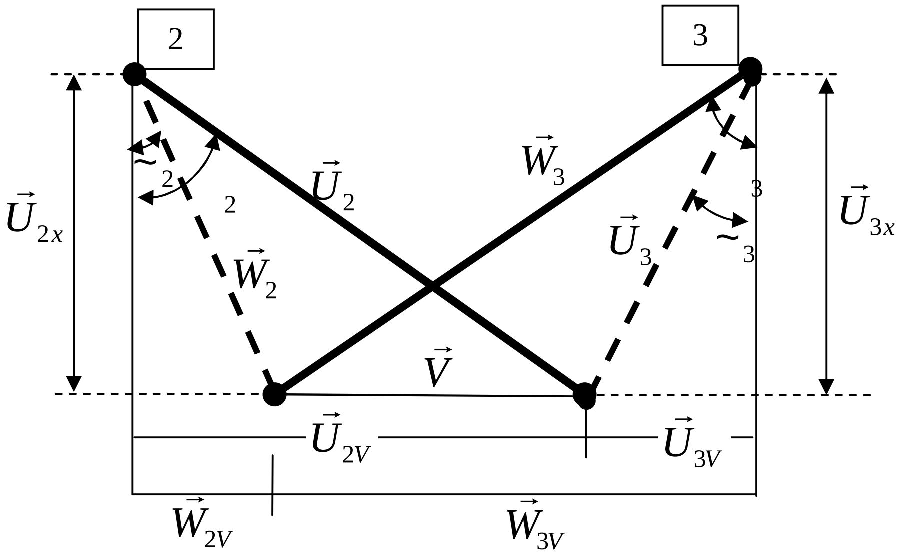

Fig. 9: Triangle des vitesses symétrique pour R=50%

5- Un étage avec un dégrée de réaction nul R=0%:

$$_2 = - \;_3 \quad et \quad tg\sim_3 \neq tg\sim_2$$

Et puisque **U_x=Cte => $W_2=W_3$**

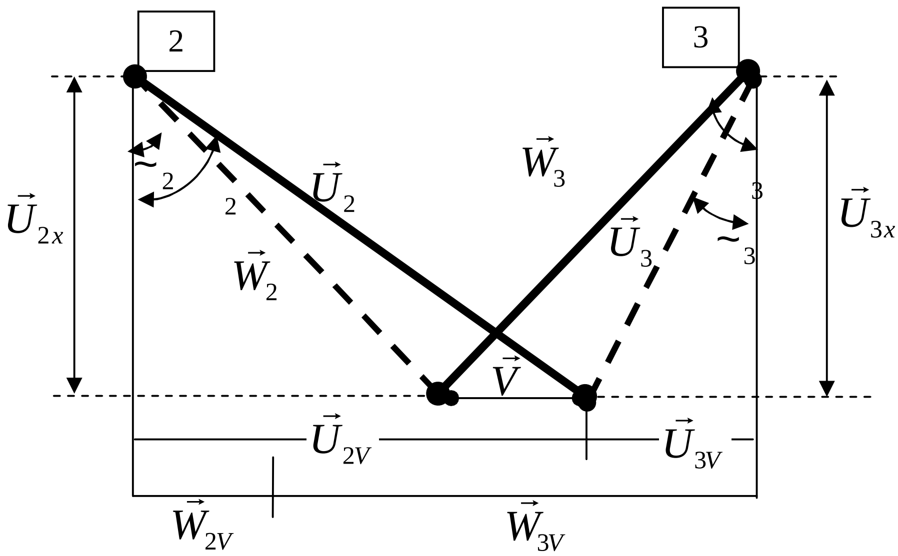

Fig. 9: Triangle des vitesses pour R=0%