

Chapitre IV : TURBINES A REACTION

IV.1 Ecoulement axial dans les turbines à vapeur à réaction

Dans ce type de machine, la détente de la vapeur a lieu à la fois dans les aubes fixes et dans les aubes mobiles, elle a été inventée par Sir Charles Parsons en 1884. .

Dans une turbine à réaction, une force réactive est produite sur les aubes mobiles lorsque la vapeur augmente en vitesse et lorsque la vapeur change de direction.

Les turbines à réaction sont normalement utilisées comme **turbines à basse pression**.

Etage d'une turbine à réaction

L'étage d'une **turbine à réaction** (Fig. IV.1) au sein duquel, une partie de la détente s'effectue au niveau du stator et l'autre partie, au niveau du rotor.

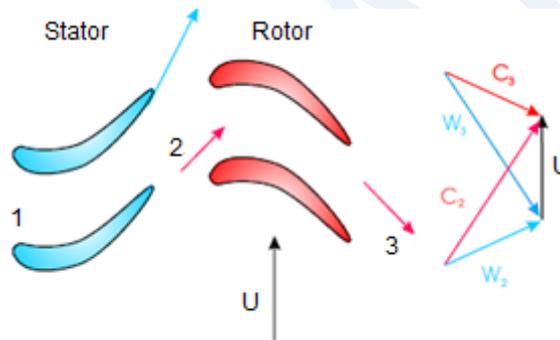


Figure IV. 1 : Etage d'une turbine à réaction.

IV.2. Caractérisation des triangles de vitesse des turbines axiales

IV.2.1 Coefficient de débit et coefficient de charge

On utilisera ces nombres adimensionnels pour caractériser les triangles de vitesse :

✓ **Le coefficient de débit ϕ** :

$$\phi = \frac{C_a}{U} \quad (IV.1)$$

C'est une mesure du débit massique et de la grandeur de l'étage, ce coefficient est proportionnel à la vitesse axiale C_a .

✓ **Le coefficient de charge ψ** :

$$\psi = \frac{W}{U^2} = \frac{W}{\omega^2 R^2} = \frac{gH}{U^2} = \frac{\Delta h_0}{U^2} \quad (IV.2)$$

$$\psi = \eta_s \frac{\Delta h_{0s}}{U^2} = \frac{C_p \Delta T_0}{U^2} \quad (IV.3)$$

Mesure la puissance par unité de masse de l'étage, connu également sous le nom de coefficient de température.

$\psi > 1.5$: pour les turbines à gaz dont les pales sont fortement chargées.

$\psi < 1$: aubes de turbines à gaz faiblement chargées

$0.3 < \psi < 0.5$: pales des compresseurs fortement chargées

✓ **Le degré de réaction R :**

Nombre additif à ϕ et à ψ permettant de spécifier les triangles de vitesse.

IV.3.2 Degré de réaction d'une turbine axiale

Caractérise le degré de détente d'un fluide entre le stator et le rotor de la turbine. Il est défini par le rapport entre la chute d'enthalpie statique dans le rotor et la chute d'enthalpie statique dans l'étage.

Il indique la proportion dans laquelle la chute de pression se distribue entre le rotor et le stator.

$$R = \frac{\text{Variation d'enthalpie dans le rotor}}{\text{Variation d'enthalpie dans l'étage}} = \frac{\Delta h_r}{\Delta h_e} = \frac{h_2 - h_3}{h_1 - h_3} \quad (\text{IV.4})$$

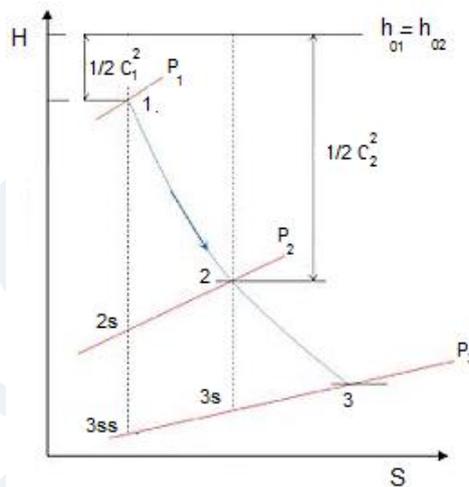


Figure IV. 2 : Processus de détente dans un étage d'une turbine axiale

Conservation de l'énergie au niveau du stator : $h_{01} = h_1 + \frac{C_1^2}{2}$; $h_{02} = h_2 + \frac{C_2^2}{2}$

$$h_{01} = h_{02} \quad (\text{IV.5})$$

Chute d'enthalpie au niveau du rotor : $\Delta h_r = h_2 - h_3 = h_{01} = \left(h_{02} - \frac{C_2^2}{2}\right) - \left(h_{03} - \frac{C_3^2}{2}\right)$

$$\Delta h_r = (h_{02} - h_{03}) - \left(\frac{C_2^2}{2} - \frac{C_3^2}{2}\right) \quad (\text{IV.6})$$

Chute d'enthalpie au niveau de l'étage : $\Delta h_e = h_1 - h_3 = \left(h_{01} - \frac{C_1^2}{2}\right) - \left(h_{03} - \frac{C_3^2}{2}\right)$

Pour une turbine axiale, on considère que la vitesse absolue à l'entrée du stator est égale à la vitesse à la sortie du rotor : $C_1 = C_3$ et comme $h_{01} = h_{02}$ ainsi :

$$\Delta h_e = h_1 - h_3 = (h_{01} - h_{03}) = (h_{02} - h_{03}) \quad (\text{IV.7})$$

Le degré de réaction s'écrit donc :

$$R = \frac{\Delta h_r}{\Delta h_e} = \frac{(h_{02} - h_{03}) - \left(\frac{c_2^2 - c_3^2}{2}\right)}{(h_{02} - h_{03})} = 1 - \frac{\left(\frac{c_2^2 - c_3^2}{2}\right)}{(h_{02} - h_{03})} \quad (\text{IV.8})$$

Or la chute d'enthalpie correspond au travail de détente de la turbine, d'après Euler :

$$\Delta h_e = (h_{02} - h_{03}) = W_T = U(C_{2u} + C_{3u})$$

$$R = 1 - \frac{(c_2^2 - c_3^2)}{2U(C_{2u} + C_{3u})} \quad (\text{IV.9})$$

En introduisant le coefficient de charge :

$$R = 1 - \frac{(c_2^2 - c_3^2)}{2\psi U^2} \quad (\text{IV.10})$$

Le degré de réaction est tel que : $0 \leq R \leq 1$

En introduisant l'expression d'Euler du travail de détente en fonction de l'ensemble des vitesses :

Sachant $U = Cte$; l'Eq. IV.10 prend une nouvelle forme :

$$R = \frac{W_3^2 - W_2^2}{2U(C_{2u} + C_{3u})} \quad (\text{IV.11})$$

- Triangle de vitesse d'une turbine à degré de réaction R=0

L'enthalpie ne varie pas dans le rotor. L'augmentation de pression se fait uniquement au niveau du stator. C'est le cas d'une turbine à action (étage d'impulsion).

De l'Eq. IV. 11, si R=0 on aura $W_3 = W_2$

Du triangle de vitesse (Fig. IV.3) : $W_3 = W_2$; $\beta_2 = \beta_3$; $W_{2u} = W_{3u}$ et $\Delta C_U = \Delta W_U$, d'où

$$W_T = U\Delta C_U = U\Delta W_U \quad (\text{IV.12})$$

$$W_T = U\Delta C_U = U(C_{2u} + C_{3u}) = UC_a(tg\alpha_2 + tg\alpha_3) \quad (\text{IV.13})$$

$$W_T = U\Delta W_U = U(W_{2u} + W_{3u}) = UC_a(tg\beta_2 + tg\beta_3) = 2UC_a tg\beta_2 \quad (\text{IV.14})$$

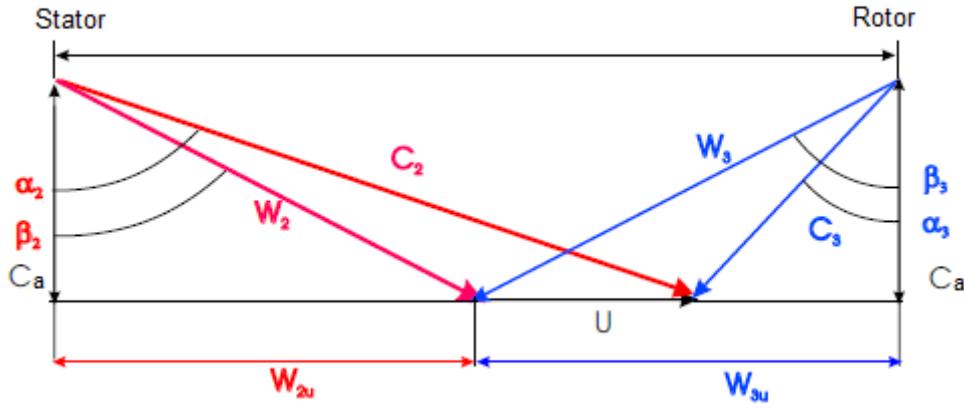


Figure IV. 3 : Triangle de vitesse d'une turbine axiale de degré de réaction R=0

Le travail de la turbine sera exprimé en fonction de l'angle β_2 :

$$W_T = 2UC_a \operatorname{tg} \beta_2 \quad (\text{IV.15})$$

Le travail de la turbine peut être exprimé en fonction de l'angle α_2 étant donné que :

$$\sin \alpha_2 = \frac{W_{2u} + U}{C_2} \Rightarrow W_{2u} = C_2 \sin \alpha_2 - U \quad (\text{IV.16})$$

A l'aide de $\operatorname{tg} \beta_2 = \frac{W_{2u}}{C_a}$ et des Eq. IV.15 et IV.16 on obtient :

$$W_T = 2U(C_2 \sin \alpha_2 - U) \quad (\text{IV.17})$$

Relation entre le coefficient de charge ψ et le coefficient de débit ϕ pour R=0 :

$$\psi = \frac{W_T}{U^2} = \frac{2U(C_2 \sin \alpha_2 - U)}{U^2} = \frac{2(C_2 \sin \alpha_2 - U)}{U} = 2 \left(\frac{C_2 \sin \alpha_2}{U} - 1 \right) \quad (\text{IV.18})$$

$$\text{Comme } \sin \alpha_2 = \frac{U_2 + W_{2u}}{C_2} \text{ et } \operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{U_2 + W_{2u}}{C_a} \Rightarrow C_2 \sin \alpha_2 = C_a \operatorname{tg} \alpha_2 \quad (\text{IV.19})$$

Dans ce cas, l'Eq. IV.17 mène à : $\psi = 2 \left(\frac{C_a \operatorname{tg} \alpha_2}{U} - 1 \right) = 2(\phi \operatorname{tg} \alpha_2 - 1)$

$$\psi = 2(\phi \operatorname{tg} \alpha_2 - 1) \quad (\text{IV.20})$$

La valeur optimale de vitesse optimale est obtenue par dérivation de W_T par rapport à U (Eq.IV.18) avec α_2 et C_2 constants $U_{opt} = \frac{C_2 \sin \alpha_2}{2}$ à laquelle correspond une valeur du coefficient de charge est $\psi_{opt} = 2$.

- Triangle de vitesse d'une turbine à degré de réaction R=0.5

Pour une turbine à réaction à un étage de degré R=0.5 ; $R = \frac{h_2 - h_3}{h_1 - h_3} = \frac{1}{2} \Rightarrow h_1 - h_3 = 2(h_2 - h_3)$

La détente de la vapeur (Fig. IV.2) est fractionnée entre le stator et le rotor, les lames fixes et mobiles ont la même forme.

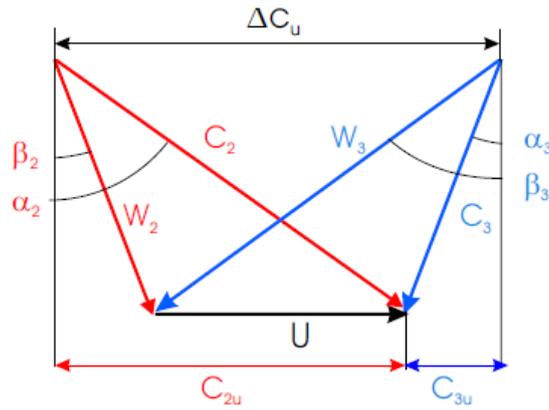


Figure IV.4 Triangle de vitesse pour un degré de réaction 50%

Des expressions Eq. IV.9 et Eq.11 permettant l'obtention du degré de réaction R, en prenant R=0.5 et par identification on obtient :

$$(W_3^2 - W_2^2) = (C_2^2 - C_3^2) \quad (IV.21)$$

Ceci est vérifié par la construction du triangle de vitesse symétrique, nécessairement :

$$W_3 = C_2 \text{ et } W_2 = C_3 \quad (IV.22)$$

$$\alpha_2 = \beta_3 \text{ et } \beta_2 = \alpha_3 \quad (IV.23)$$

La vitesse à la sortie du stator est égale à la vitesse de sortie du rotor.

Relation entre le coefficient de charge ψ et le coefficient de débit ϕ pour R=0 :

$$\psi = \frac{W_T}{U^2} = \frac{U(C_{2u} + C_{3u})}{U^2} = \frac{(C_2 \sin \alpha_2 + W_3 \sin \beta_3 - U)}{U} \quad (IV.24)$$

Des relations Eq.IV.22 et Eq. IV.23 on a : $C_2 \sin \alpha_2 = W_3 \sin \beta_3$

$$\psi = \frac{2C_2 \sin \alpha_2}{U} - 1 = \frac{2C_a \operatorname{tg} \alpha_2}{U} - 1 \quad (IV.25)$$

$$\psi = 2\phi \operatorname{tg} \alpha_2 - 1 \quad (IV.26)$$

La valeur optimale de vitesse optimale est obtenue par dérivation de W_T par rapport à U (Eq.IV.25) avec α_2 et C_2 constants $U_{opt} = C_2 \sin \alpha_2$ à laquelle correspond une valeur du coefficient de charge $\psi_{opt} = 1$.

- Triangle de vitesse d'une turbine à degré de réaction R=1

Dans ce cas R=1 la variation d'enthalpie a lieu uniquement au niveau du rotor, le stator dirige l'écoulement.

$$R = \frac{h_2 - h_3}{h_1 - h_3} = 1 \Rightarrow h_1 = h_2$$

De l'Eq. IV.9, il en résulte : $C_3 = C_2$; $C_{2u} = C_{3u}$; d'où la représentation du triangle (Fig. IV.5) :

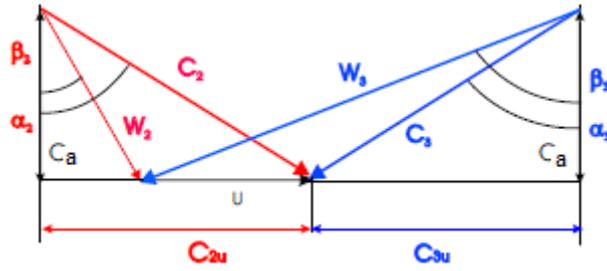


Figure IV.5 Triangle de vitesse pour un degré de réaction 100%

Par construction : $\alpha_2 = \alpha_3$

$$W_T = U \Delta C_U = U(C_{2u} + C_{3u}) = U(C_2 \sin \alpha_2 + C_3 \sin \alpha_3) = 2UC_2 \sin \alpha_2$$

$$W_T = 2UC_2 \sin \alpha_2 \quad (IV.27)$$

$$C_2 \sin \alpha_2 = C_a \operatorname{tg} \alpha_2$$

$$\psi = \frac{W_T}{U^2} = \frac{2UC_a \operatorname{tg} \alpha_2}{U^2} = \frac{2C_a \operatorname{tg} \alpha_2}{U} = 2\phi \operatorname{tg} \alpha_2$$

$$\psi = 2\phi \operatorname{tg} \alpha_2 \quad (IV.28)$$