

V.1. Introduction

Comme mentionné au chapitre IV, le rapport de pression maximal atteint dans les compresseurs centrifuges est d'environ 4: 1 pour les machines simples (sauf si l'on utilise plusieurs étages) avec un rendement d'environ 70-80%. Cependant, le compresseur à écoulement axial peut atteindre des pressions plus élevées avec un rendement plus élevé. Il existe deux caractéristiques importantes du compresseur d'écoulement axial : les rapports haute pression à bonne efficacité et la poussée par unité de surface frontale. Bien que dans l'ensemble, les turbines axiales soient très similaires, l'examen de la section transversale de la pale indique une grande différence. Dans la turbine, la zone de passage d'entrée est plus grande que la sortie. L'inverse se produit dans le compresseur, comme la montre la Figure. V.1.

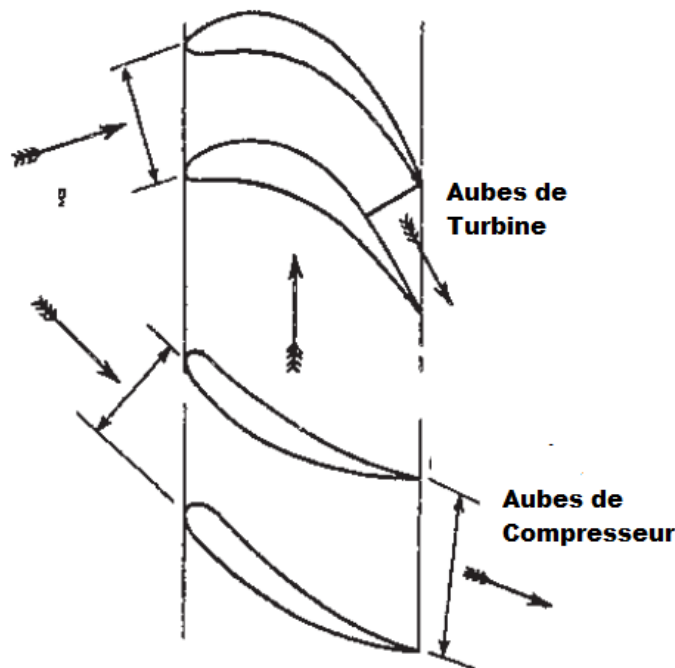


Figure V.1. Écoulement entre aubes pour le compresseur et la turbine

V.2 .Principe de fonctionnement

Ainsi, le processus dans les aubes de turbine peut être décrit comme un flux d'accélération, l'augmentation de la vitesse étant obtenue par le convergent. Cependant, dans le compresseur à écoulement axial, l'écoulement décélère ou diffuse et l'élévation de pression se produit lorsque le fluide passe à travers les aubes. Comme mentionné dans le chapitre sur la conception du diffuseur (chapitre IV), il est beaucoup plus difficile d'effectuer une diffusion efficace en raison de l'arrachement des molécules d'air des parois du passage divergent. Les molécules d'air qui se détachent tendent à s'inverser et à refluer dans le sens du gradient de pression. Si la divergence est trop rapide, cela peut entraîner la formation de tourbillons et une réduction de la pression utile.

Lors d'une accélération dans un convergent, il existe une tendance naturelle à ce que l'air remplisse de près les parois du passage (seule la perte de charge normale sera considérée dans ce cas).

Les sections de l'aube typiques sont illustrées à la Figure V.2. Les compresseurs à écoulement axial modernes peuvent donner des rendements de 86 à 90% - la technologie de conception des compresseurs est un domaine bien développé. Les compresseurs à écoulement axial sont constitués d'un certain nombre d'étages, chaque étage étant formé par une rangée stationnaire (redresseur ou stator) et une rangée d'aubes en rotation (rotor).

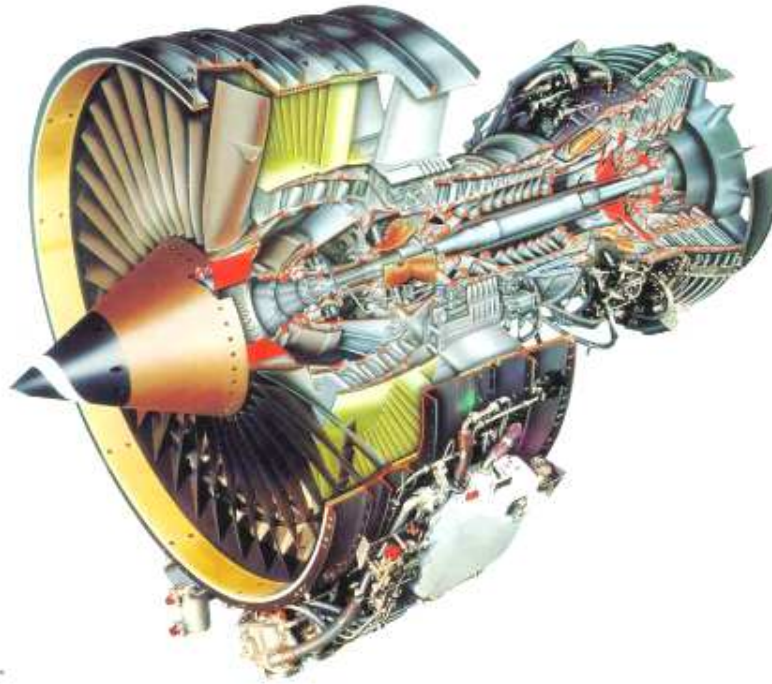


Figure V.2. *Compresseur axial dans un turboréacteur*

La Figure V.3 montre comment quelques étages de compresseur sont intégrés dans le compresseur axial. Les aubes rotatives transmettent l'énergie cinétique à l'air tout en augmentant la pression de l'air et la rangée d'aubes stationnaire (redresseur) redirige l'air dans la bonne direction et convertit une partie de l'énergie cinétique en pression. Le flux d'air à travers le compresseur est dans la direction de l'axe du compresseur et, par conséquent, il est appelé un compresseur à écoulement axial. La hauteur des aubes diminue à mesure que le fluide se déplace dans le compresseur. Lorsque la pression augmente dans le sens de l'écoulement, le volume d'air diminue. Pour maintenir la même vitesse de l'air à chaque étape, la hauteur de l'aube diminue dans l'axe du compresseur. Une rangée supplémentaire de lames fixes, appelées aubes de guidage d'entrée, est montée sur l'entrée du compresseur.

Ceux-ci sont fournis pour guider l'air à l'angle correct sur la première rangée de lames mobiles.

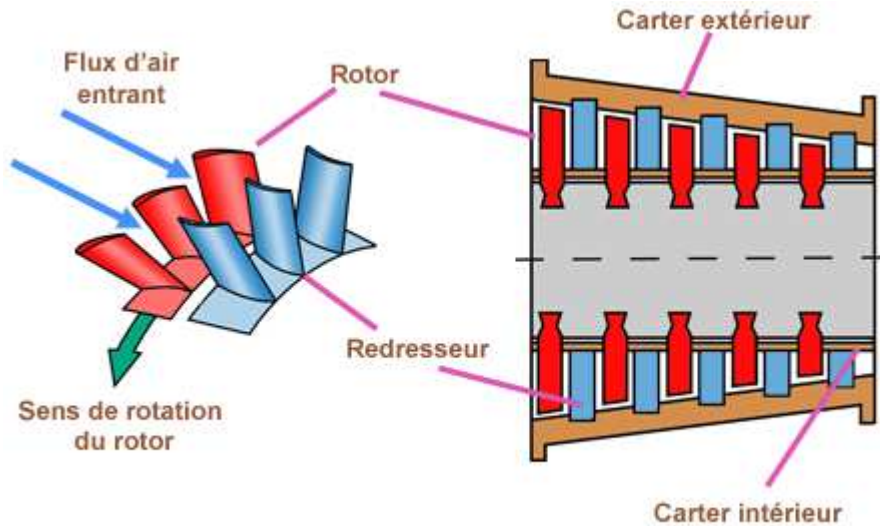


Figure V.3. Éléments d'un compresseur axial

Le débit est supposé avoir lieu à une hauteur moyenne de l'aube, où les vitesses périphériques des aubes à l'entrée et à la sortie sont les mêmes. Aucun débit n'est supposé dans la direction radiale.

V.3 .Triangles des vitesses

Le principe de base du fonctionnement du compresseur axial est que l'énergie cinétique est transmise à l'air dans la rangée d'aubes rotatives, puis diffusée à travers les passages des aubes rotatives (rotor) et stationnaires (stator). Le processus est effectué sur plusieurs nombres d'étages. Comme mentionné précédemment, la diffusion est un processus de décélération. Il n'est efficace lorsque l'augmentation de la pression par étage est très faible. Les triangles des vitesses pour un étage de compresseur à écoulement axial sont représentés sur la figure V.4.

L'air entre dans l'aube du rotor avec la vitesse absolue C_1 d'un angle α_1 mesuré de la direction axiale. L'air quitte l'aube du rotor avec une vitesse absolue C_2 d'un angle α_2 . L'air traverse les passages divergents formés entre les aubes du rotor. Comme le travail est effectué sur l'air dans les aubes du rotor, C_2 est plus grand que C_1 . La rangée de rotors a une vitesse tangentielle U . La combinaison des deux vecteurs de vitesse donne la vitesse relative à l'entrée V_1 d'un angle β_1 . V_2 est la vitesse relative à la sortie du rotor. Il est inférieur à V_1 , montrant que la diffusion de la vitesse relative a eu lieu avec une augmentation de la pression statique à travers les aubes du rotor. La rotation de l'air vers la direction axiale est provoquée par la cambrure des aubes.

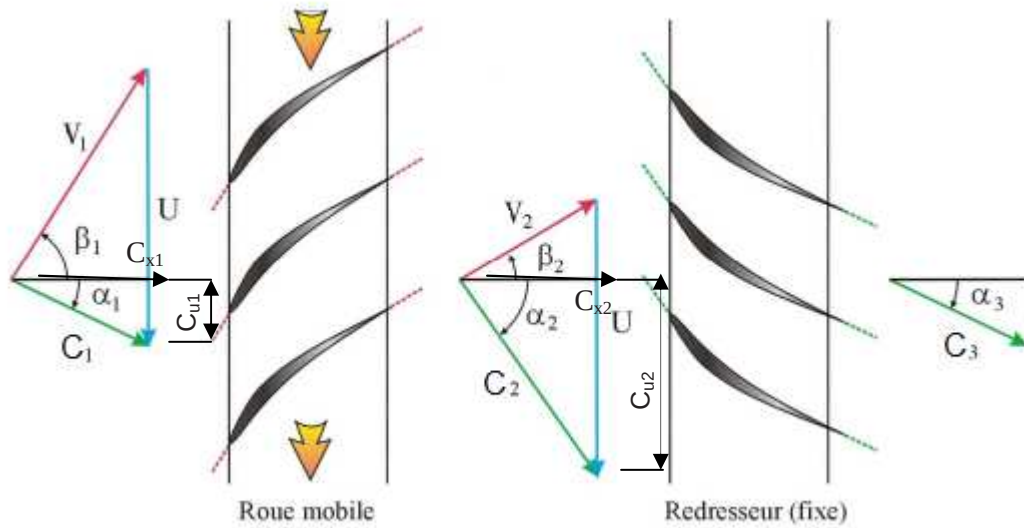


Figure V.4. Triangles des vitesses pour un étage du compresseur

.L'équation d'Euler fournit le travail fait sur l'air :

$$W_c = U(C_{u2} - C_{u1}) \quad (V - 1)$$

En utilisant les triangles de vitesse, les équations de base suivantes peuvent être écrites :

$$\frac{U}{C_x} = \tan\alpha_1 + \tan\beta_1 \quad (V - 2)$$

$$\frac{U}{C_x} = \tan\alpha_2 + \tan\beta_2 \quad (V - 3)$$

Dans laquelle $C_x = C_{x1} = C_{x2}$ est la vitesse axiale, supposée constante à travers l'étage.

L'équation (V-1) peut être écrite en termes d'angles d'air :

$$W_c = UC_x(\tan\alpha_2 - \tan\alpha_1) \quad (V - 4)$$

Aussi,

$$W_c = UC_x(\tan\beta_1 - \tan\beta_2) \quad (V - 5)$$

La totalité de cette énergie d'entrée sera absorbée utilement pour augmenter la pression et la vitesse de l'air et pour surmonter diverses pertes par frottement. Indépendamment des pertes, toute l'énergie est utilisée pour augmenter la température d'arrêt de l'air, T_{0s} .

Si la vitesse de l'air quittant le premier étage C_3 est égale à C_1 , alors l'augmentation de la température d'arrêt sera égale à l'augmentation de la température statique, ΔT_s . Par conséquent :

$$T_{0s} = \Delta T_s = \frac{UC_x}{C_p} (\tan\beta_1 - \tan\beta_2) \quad (V - 6)$$

L'équation (V.6) est l'élévation théorique de la température de l'air dans un étage. En réalité, l'élévation de la température de l'étage sera inférieure à cette valeur en raison des effets 3D dans l'anneau du compresseur. Pour trouver l'élévation de température réelle de l'air, un facteur λ , compris entre 0 et 100%, sera utilisé. Ainsi, l'élévation de température réelle de l'air est donnée par :

$$T_{0s} = \frac{\lambda UC_x}{C_p} (\tan\beta_1 - \tan\beta_2) \quad (V - 7)$$

Si R_s est le rapport de pression d'un étage et η_s est le rendement isentropique de l'étage, alors :

$$R_s = \left[1 + \frac{\eta_s T_{0s}}{T_{01}} \right]^{\gamma/\gamma-1} \quad (V - 8)$$

Où T_{01} est la température d'arrêt à l'entrée.

V.4. Degrée de réaction

Le degré de réaction, L , est défini comme :

$$L = \frac{\text{l'augmentation de l'enthalpie statique dans le rotor}}{\text{l'augmentation de l'enthalpie statique dans tout l'étage}} \quad (V - 9)$$

Le degré de réaction indique la distribution de l'augmentation de pression totale dans les deux types d'aubes. Le choix d'un degré de réaction particulier est important en ce sens qu'il affecte les triangles de vitesse, le frottement du fluide et d'autres pertes.

soit :

ΔT_A : l'augmentation de la température statique dans le rotor.

ΔT_B : l'augmentation de la température statique dans le stator

En utilisant l'équation d'entrée du travail (Équation (V-4)), nous obtenons :

$$W_C = C_p(\Delta T_A + \Delta T_B) = \Delta T_S = UC_x(\tan\alpha_2 - \tan\alpha_1) = UC_x(\tan\alpha_2 - \tan\alpha_1) \quad (V - 10)$$

Mais puisque toute l'énergie est transférée à l'air dans le rotor, en utilisant l'équation d'énergie de l'écoulement stationnaire, nous avons :

$$W_C = C_p\Delta T_A + \frac{1}{2}(C_2^2 - C_1^2) \quad (V - 11)$$

Combinaison les équations (V-10) et (V-11), nous obtenons :

$$C_p\Delta T_A = UC_x(\tan\alpha_2 - \tan\alpha_1) - \frac{1}{2}(C_2^2 - C_1^2)$$

Dans le triangle des vitesses

$$C_2 = C_x \cos\alpha_2 \text{ et } C_1 = C_x \cos\alpha_1$$

Alors

$$\begin{aligned} C_p\Delta T_A &= UC_x(\tan\alpha_2 - \tan\alpha_1) - \frac{1}{2}C_x^2(\cos^2\alpha_2 - \cos^2\alpha_1) \\ &= UC_x(\tan\alpha_2 - \tan\alpha_1) - \frac{1}{2}C_x^2(\tan^2\alpha_2 - \tan^2\alpha_1) \end{aligned}$$

En utilisant la définition du degré de réaction,

$$L = \frac{\Delta T_A}{\Delta T_A + \Delta T_B}$$

$$L = \frac{UC_x(\tan\alpha_2 - \tan\alpha_1) - \frac{1}{2}C_x^2(\tan^2\alpha_2 - \tan^2\alpha_1)}{UC_x(\tan\alpha_2 - \tan\alpha_1)}$$

$$L = 1 - \frac{C_x}{U} (\tan \alpha_2 + \tan \alpha_1) \quad (V - 12)$$

Mais à partir des triangles de vitesse, en ajoutant des Équations (V-2) et (V-3),

$$\frac{2U}{C_x} = (\tan \alpha_1 + \tan \beta_1 + \tan \alpha_2 + \tan \beta_2)$$

Alors

$$L = \frac{C_x}{2U} \left(\frac{2U}{C_x} - \frac{2U}{C_x} + \tan \beta_1 + \tan \beta_2 \right)$$

$$L = \frac{C_x}{2U} (\tan \beta_1 + \tan \beta_2) \quad (V - 13)$$

Habituellement, le degré de réaction est fixé à 50%, ce qui conduit à ce résultat intéressant :

$$(\tan \beta_1 + \tan \beta_2) = \frac{U}{C_x}$$

Utilisant les équations (V-1) et (V-2),

$$\tan \alpha_1 = \tan \beta_2 \Rightarrow \alpha_1 = \beta_2$$

$$\tan \beta_1 = \tan \alpha_2 \Rightarrow \alpha_2 = \beta_1$$

Comme nous avons supposé que C_x est constant à travers l'étage :

$$C_x = C_1 \cos \alpha_1 = C_3 \cos \alpha_3$$

Puisque nous connaissons $C_1 = C_3$, il s'ensuit que $\alpha_1 = \alpha_3$. Parce que les angles sont égaux, $\alpha_1 = \beta_2 = \alpha_3$, et $\beta_1 = \alpha_2$. Dans ces conditions, les triangles de vitesse deviennent symétriques. Dans l'équation (V-13), le rapport entre la vitesse axiale et la vitesse de l'aube est appelé le coefficient de débit et noté par ϕ . Pour un rapport de réaction de 50%, $(h_2 - h_1) = (h_3 - h_1)$, ce qui implique que

l'enthalpie statique et l'augmentation de la température dans le rotor et le stator sont égales. Si pour une valeur donnée de C_x / U , β_2 est choisi supérieur à α_1 (Figure V.5), alors l'augmentation de la pression statique dans le rotor est supérieure à l'augmentation de pression statique dans le stator et la réaction est supérieure à 50%.

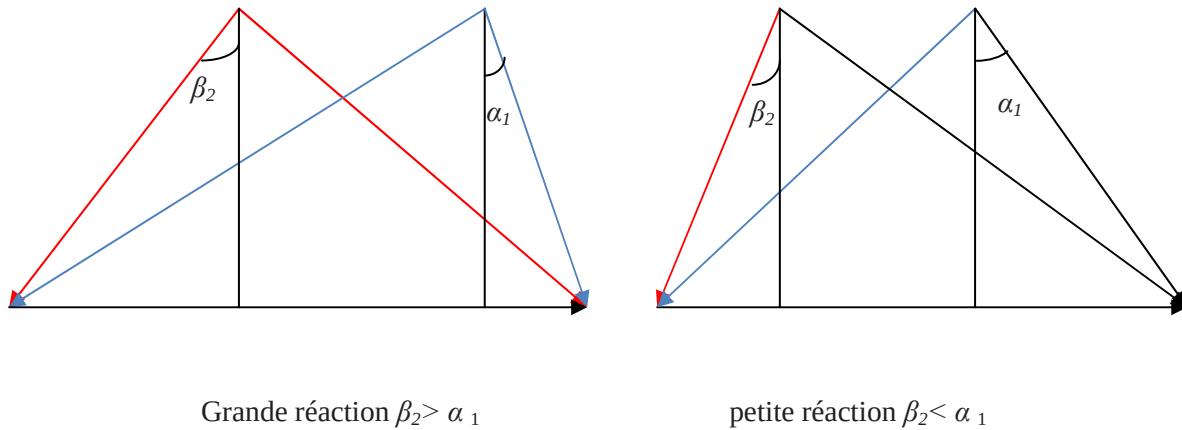


Figure V.5. Variation du degré de réaction dans un étage.

Inversement, si le concepteur choisit β_2 inférieur à α_1 , l'élévation de la pression du stator sera plus importante et la réaction sera inférieure à 50%.

V.5. Le coefficient de charge d'un étage

Le coefficient de charge d'un étage Ψ est défini comme :

$$\psi = \frac{W_c}{\dot{m}U^2} = \frac{h_{03} - h_{01}}{U^2}$$

$$\psi = \frac{\lambda(C_{u2} - C_{u1})}{U} = \frac{\lambda C_x}{U} (\tan \alpha_2 - \tan \alpha_1)$$

$$\psi = \lambda \phi (\tan \alpha_2 - \tan \alpha_1) \quad (V - 14)$$

V.6. Performances multi-étages

Un compresseur à écoulement axial est constitué d'un certain nombre d'étages. Si R est le rapport de pression, R_s est le rapport de pression d'étage, et N est le nombre d'étages, alors le rapport de pression total est donné par :

$$R = (R_s)^N \quad (V - 15)$$

L'équation (V-15) donne seulement une valeur approximative de R car l'air passe à travers le compresseur, la température augmente continuellement. L'équation utilisée pour trouver la pression d'étage est donnée par :

$$R_s = \left[1 + \frac{\eta_s T_{0s}}{T_{01}} \right]^{\gamma/\gamma-1}$$

L'équation ci-dessus indique que le rapport de pression de l'étage dépend uniquement de la température d'arrêt à l'entrée T_{01} , qui augmente dans les étages successifs. Pour trouver la valeur de R , le concept du rendement polytropique est très utile. Le rendement polytropique ou à petite échelle d'un compresseur est donnée par :

$$\eta_{\infty c} = \frac{\gamma - 1}{\gamma} * \frac{n - 1}{n}$$

ou

$$\frac{n}{n - 1} = \eta_s \frac{\gamma}{\gamma - 1}$$

Où $\eta_{\infty c} = \eta_s$ = rendement d'un petit étage

Le rapport de pression global est donné par :

$$R = \left[1 + \frac{NT_{0s}}{T_{01}} \right]^{n/n-1} \quad (V - 16)$$

V.7. Caractéristiques du compresseur de flux axial

Les formes des courbes caractéristiques des compresseurs à écoulement axial sont illustrées à la Figure V.6. Ces courbes sont assez similaires au compresseur centrifuge. Cependant, les compresseurs à flux axial couvrent une plage d'écoulement de masse plus étroite que les

compresseurs centrifuges, et la ligne de pompage est également plus inclinée que celle d'un compresseur centrifuge. Le pompage et l'étouffement limitent les courbes aux deux extrémités. Cependant, les points de pompage dans les compresseurs à écoulement axial sont atteints avant que les courbes atteignent une valeur maximale. Par conséquent, la plage de fonctionnement des compresseurs à flux axial est assez étroite.

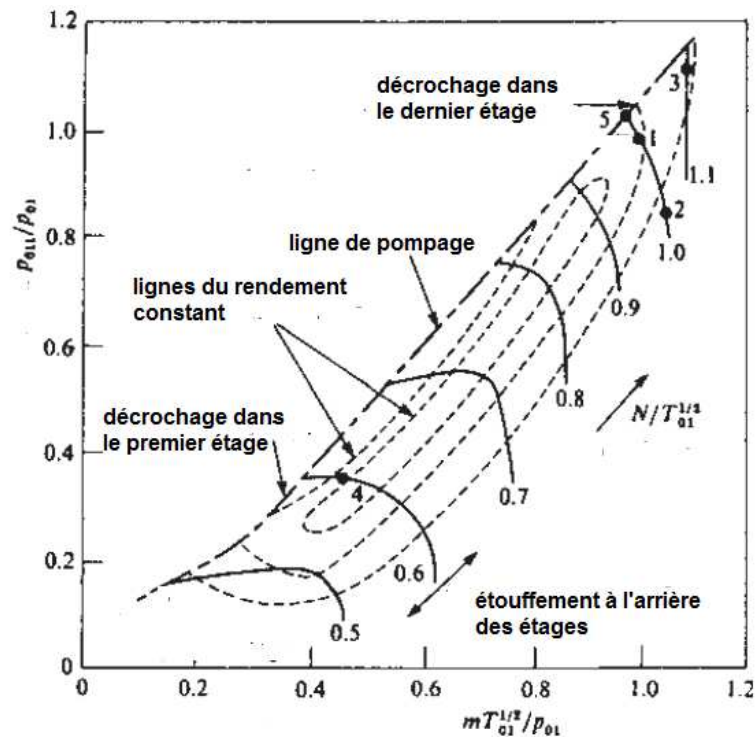


Figure V.6. Les caractéristiques du compresseur axial.