

Chapitre2. Aérodynamique des grilles d'aubes

Un profile aérodynamique peut être définie comme une forme profilée, délimitée par deux courbes aplaties dont leurs longueurs et leurs largeurs sont très grandes par rapport à son épaisseur.

- L'aube aérodynamique est un corps profilé ayant un bord d'attaque arrondi épais et un bord de fuite mince,
- Lorsqu'elle est convenablement formée et correctement orientée dans le flux, la force agissant normalement dans la direction du flux est plus grande que celle qui lui résiste.
- Les profiles aérodynamiques sont utilisés dans les aubes (pâles) de diverses turbomachines

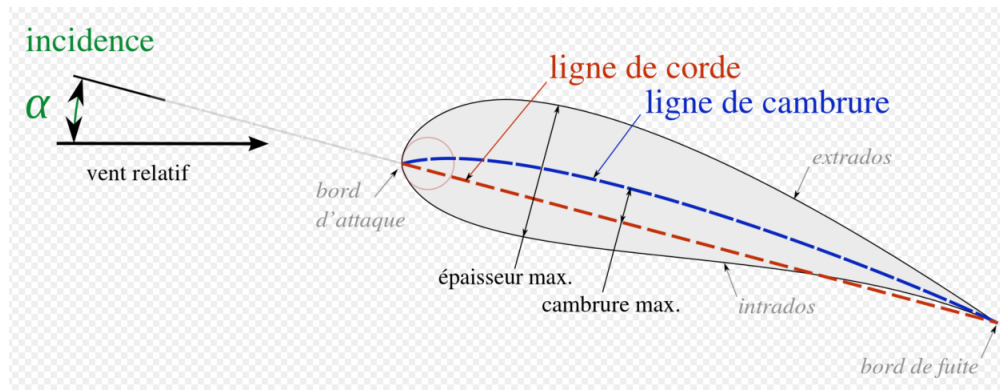


Fig.1 : Profile aérodynamique

On distingue les profiles symétriques et non symétriques.

- Profile Symétrique :** L'intrados et l'extrados convexes sont symétriques par rapport à la corde. La ligne moyenne est rectiligne et est confondue avec la corde. L'écoulement se divise au tour du bord d'attaque et se rejoint au bord de fuite.
- Profile Asymétrique :** La ligne moyenne est à simple courbure (intrados et extrados convexes). L'extrados est plus grand que l'intrados, l'air est plus accéléré sur celui-ci et parcourt un chemin plus long ce qui entraîne des perturbations (dépression et surpression) et donc la création d'une force portante. Ces profiles sont les plus employés.

2.1 Efforts aérodynamiques (portance et traînée)

La force résultante normale à l'aube comprend deux composants, nommément portance et traînée. La portance est due à une force déséquilibrée (répartition de la pression) sur la surface de l'aube et est désignée comme F_L . La traînée indiquée par F_D , est due à la contrainte de cisaillement à la surface et à la couche limite conséquente. La force de traînée est constituée d'une traînée de frottement, en raison des effets de frottement et d'une traînée de pression, due à une répartition de la pression déséquilibrée autour de l'aube.

La couche limite est généralement laminaire sur une courte distance en aval du bord d'attaque, puis elle devient turbulente. La traînée due à une couche limite laminaire est inférieure à celle due à une couche limite turbulente. Ainsi, pour une traînée de frottement faible, il est important de maintenir une couche limite laminaire sur une plus grande surface que possible.

La séparation d'écoulement due à une pression défavorable diminue la portance et augmente la traînée.

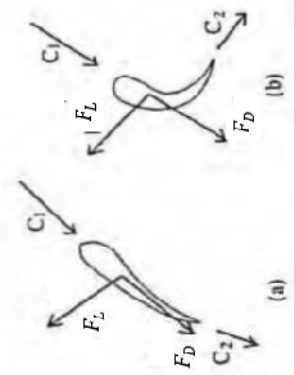


Fig. 2 : Force de portance et de traînée, a) Compresseur et b) Turbine

La portance, F_L , et la traînée, F_D , de l'aube peuvent être écrites en termes de coefficients de portance et de traînée de la section transversale de l'aube, C_L et C_D ,

$$F_L = \frac{1}{2} \rho * W_m^2 * A * C_L$$

$$F_D = \frac{1}{2} \rho * W_m^2 * A * C_D$$

Où W_m , est la vitesse relative moyenne, A est la surface du corps et $\left(\frac{1}{2} \rho W_m^2\right)$ est défini comme une pression dynamique.

Les conditions de section de l'aube doivent s'approcher de celles d'un écoulement laminaire sur une plaque plane car, cela donne le coefficient traînée le plus bas. Mais il est difficile d'obtenir ça ou de vérifier cette condition en pratique, car :

1. Les aubes doivent avoir une courbure pour modifier la direction du fluide,
2. Les aubes doivent avoir une épaisseur limitée,
3. Le fluide a un niveau élevé de désordre.

2.2 Corrélations pour la conception des grilles d'aubes

Le rôle des aubes est de guider le flux dans la direction requise. Dans les compresseurs, les aubes forment un passage convergent, c'est à dire la surface à l'entrée est supérieure à celle à la sortie. Ainsi, le fluide est accéléré dans le passage. Dans les turbines, les aubes forment un passage divergent, c'est-à-dire que la surface en entrée est inférieure à celle en sortie et donc le fluide est décéléré dans le passage.

La courbure des aubes de compresseur est moindre par rapport à la courbure des aubes de turbine. Parce que, si le taux de changement du profil d'aube du compresseur est élevé, une séparation de flux se produira en raison d'un gradient de pression défavorable. Alors que dans une turbine, le gradient de pression est favorable et avec une très grande courbure, c'est-à-dire 90° ou même plus, peut être utilisé sans pertes importantes.



Fig. 3 : Grille d'aube

Une grille d'aubes est une rangée des aubes géométriquement similaires disposées sur des distances égales les unes des autres et alignées dans le sens de l'écoulement. Les différentes nomenclatures importantes (Figures 4 et 5) d'une grille d'aubes sont :

- 1) **Angle de cambrure** : est l'angle entre la ligne de cambrure et les directions axiales, noté α' . Les angles de cambrure à l'entrée et à la sortie sont α'_1 et α'_2 respectivement.
- 2) **Angle de l'air** : L'angle entre la direction de la vitesse par rapport à l'aube et l'axe, noté α . Les angles de l'air à l'entrée et à la sortie sont respectivement α_1 et α_2 . L'angle de l'air de la grille d'aube est égal à l'angle relatif de l'air du compresseur ou de la turbine.

- 3) **Angle de cambrure de l'aube**: est la différence entre l'angle de cambrure à l'entrée et à la sortie noté θ :

Pour le compresseur : $\theta = (\alpha'_1 - \alpha'_2)$

Pour la turbine: $\theta = (\alpha'_1 + \alpha'_2)$

- 4) **Solidité des aubes** : est un paramètre de conception important pour la turbine à écoulement axial et est définie comme le rapport entre la longueur de la corde des aubes et l'espacement des aubes.

$$\sigma = l/s$$

s : est l'espacement, $s = 2\pi r_m / n_b$

r_m : est le rayon moyen ;

n_b : est le nombre des aubes ;

l : est la corde.

- 5) **Corde**: est la largeur maximale du profil de l'aube dans une direction parallèle à la ligne de corde, c'est-à-dire la distance entre les bords d'attaque et de fuite de l'aube, et est désignée par l .
- 6) **Pas**: Le pas ou l'espacement des aubes, désigné s est la distance entre les points correspondants de l'aube adjacente et est exprimé soit par le rapport du pas à la corde (s/l), soit par la solidité (l/s). Lorsque les aubes sont régulièrement espacées autour d'un rotor, le pas est la circonférence à n'importe quel rayon divisée par le nombre des aubes.
- 7) **Angle d'incidence**: est la différence entre l'angle de l'air à l'entrée et l'angle de cambrure à l'entrée, notée i :

$$i = \alpha_1 - \alpha'_1$$

- 8) **Angle de déviation**: est la différence entre l'angle de l'air à la sortie et l'angle de cambrure à la sortie, noté δ :

9) Pour une turbine: $\delta = \alpha'_2 - \alpha_2$

Pour un compresseur : $\delta = \alpha_2 - \alpha'_2$

Pour les compresseurs, l'angle de déviation δ est causé par le fait que l'air ne reste pas attaché à l'aube sur sa courbure totale. δ est donné par la relation empirique

$$\delta = m\theta(s/l)^{1/2}$$

$$m = 0.23(2a/l)^2 + 0.1(\alpha_2/50)$$

a est la distance le long de la corde jusqu'au point de cambrure maximum, $(2a/l) = 1$.

- 10) **Angle de déflexion de l'air**: est la différence entre l'angle de l'air à l'entrée et l'angle de l'air à la sortie, notée ε :

Pour un compresseur : $\varepsilon = \alpha_1 - \alpha_2$

Pour une turbine: $\varepsilon = \alpha_1 + \alpha_2$

À partir de la définition des différents angles, on peut voir qu'ils sont liés par l'expression suivante :

$$\varepsilon = \theta + i - \delta$$

11) Angle de décalage : est l'angle entre la direction axiale et la corde, noté ϕ_s et il représente l'angle al auquel l'aube est réglée dans la grille.

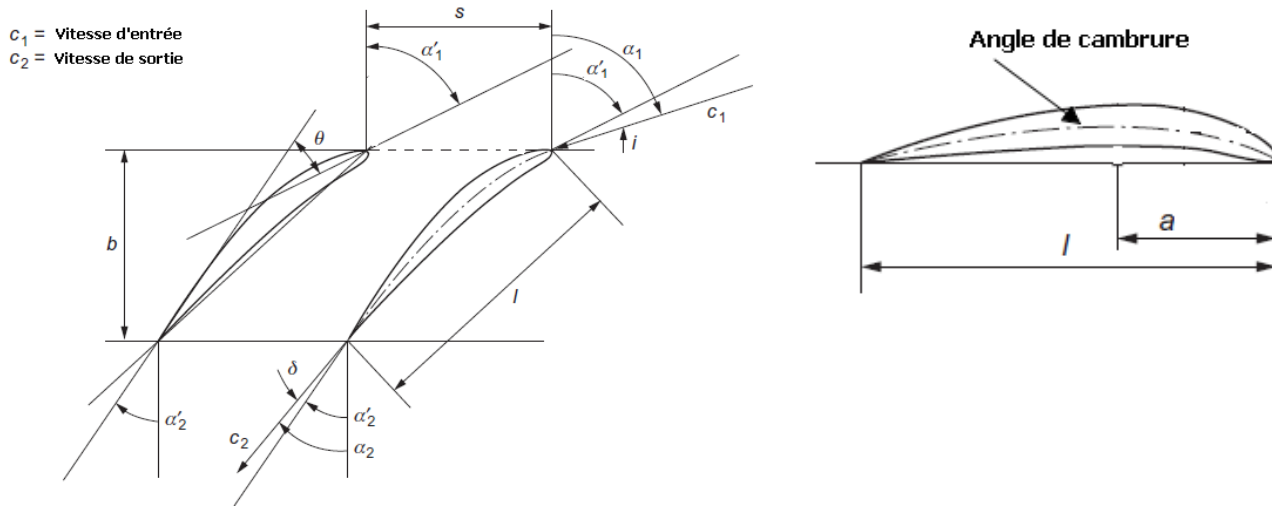


Fig. 4 : grille d'aubes du compresseur et notation des aubes

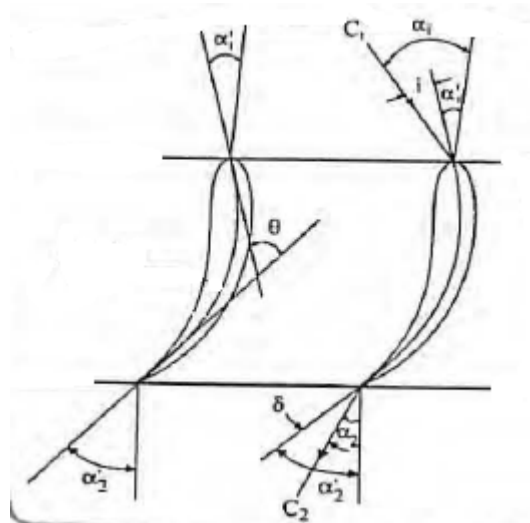


Fig. 5 : Grille d'aubes de turbine

2.2.1 Coefficients de portance C_L et de traînée C_D des grilles d'aubes

Le coefficient de portance C_L est une mesure de la capacité d'une section à supporter un poids lorsqu'elle est déplacée à travers un fluide, comme dans une aile d'avion, ou alternativement, à transférer de l'énergie au fluide, comme dans une pompe ou un compresseur, de transférer de l'énergie sur un rotor lorsqu'un fluide est causé à l'écoulement.

Le coefficient de traînée C_D est une mesure de la perte d'énergie associée à la tâche utile de production de portance.

Les relations suivantes sont obtenues pour la traînée et la portance des grilles d'aubes :

- **Pour un compresseur :**

$$C_D = 2(s/l)(p_{0m}/\rho c_1^2)(\cos^3 \alpha_m / \cos^2 \alpha_1)$$

$$\alpha_m = \tan^{-1}[(\tan\alpha_1 + \tan\alpha_2)/2]$$

$$p_{0m} = (p_{01} - p_{02})_m$$

$$C_L = 2(s/l)\cos\alpha_m[\tan\alpha_1 - \tan\alpha_2] - C_D \tan \alpha_m$$

p_{01} et p_{02} , sont les pressions totales correspondantes à c_1 et c_2 .

- **Pour une turbine :**

$$C_D = 2(s/l)(p_{0m}/\rho c_1^2)(\cos^3\alpha_m/\cos^2\alpha_2)$$

$$\alpha_m = \tan^{-1}[(\tan\alpha_2 - \tan\alpha_1)/2]$$

$$C_L = 2(s/l)\cos\alpha_m[\tan\alpha_1 + \tan\alpha_2] + C_D \tan \alpha_m$$

2.2.2 Coefficient de pression

Le coefficient de pression est un coefficient aérodynamique adimensionnel facilitant l'étude et la représentation graphique de la distribution des pressions autour des aubes.

$$C_p = \frac{P_0}{\frac{1}{2}\rho C_1^2}$$

References:

A Valan Arasu, Turbo Machines, Department of Mechanical Engineering Thiagarajar College of Engineering Madurai (2001).

Ingram G. - Basic Concepts in Turbomachinery (2009).

S.L. Dixon and Cesare Hall (Auth.) - Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery-Butterworth-Heinemann (2014).