

UNIVERSITÉ POLYTECHNIQUE DE LODZ
FACULTÉ: Internationale d'Ingénierie
SPÉCIALITÉ: Gestion et Technologie
II-ème année

**THERMODYNAMIQUE ET
MÉCANIQUE DES FLUIDES**

*Travaux Pratiques
A l'Institut des Turbomachines*

TRAVAIL PRATIQUE # 11

DIFFUSEUR SUBSONIQUE

COUCHE LIMITE

Personnes responsables du programme:
Dr ing. Jaroslaw R. Blaszcak (coté polonais)
Prof. Geneviève Comte-Bellot (coté français)

LODZ / LYON 2005

1. BUT DU TRAVAIL

On cherche à comprendre la nature de l'écoulement dans un diffuseur subsonique qui présente des angles de divergence 2α de plus en plus grands. Pour cela on va effectuer les mesures suivantes:

- mesure des pertes de pression pour différents angles 2α , et calcul du coefficient de perte ζ correspondant,
- mesure de la répartition des pressions statiques le long du diffuseur également pour différents angles 2α ,
- pour un angle 2α choisi, mesure de la répartition des vitesses dans la couche limite et détermination de son épaisseur δ et de son épaisseur de déplacement δ^*

2. INTRODUCTION

Un diffuseur subsonique est un canal divergent (Fig.1) dans lequel on observe une augmentation de l'énergie potentielle du fluide au lieu d'une diminution de son énergie cinétique. On peut constater que la pression statique du fluide augmente dans la direction de l'écoulement ($dp/dx > 0$), soit $p_2 > p_1$, et que la pression dynamique diminue, soit $p_{d2} < p_{d1}$. La diminution de la pression dynamique indique une diminution de la vitesse de l'écoulement, soit $v_2 < v_1$. L'énergie totale du fluide diminue et la pression totale diminue aussi.

$$p_{c1} = p_{c2} + p_{str}$$

La perte de pression p_{str} est constituée par la somme de la perte par frottement et de la perte par décollement (aussi appelée séparation) de la couche limite. Cette dernière cause est primordiale et apparaît très souvent. La conséquence du décollement de la couche limite est l'apparition de tourbillons à grande échelle, qui prennent de l'énergie à l'écoulement pour soutenir leur existence, et il en résulte une perte de pression.

La figure 1b montre la distribution de la pression statique $p = f(x)$, celle de la pression totale $p_c = f(x)$, et aussi la distribution de la perte de pression $p_{str} = f(x)$ le long du diffuseur. Les distributions de pressions et la quantité de perte de pression dépendent du type de diffuseur (axisymétrique ou plan), de l'angle d'ouverture 2α , de la forme des parois, de la répartition de la vitesse dans la section d'entrée du diffuseur, du niveau de turbulence à l'entrée, etc.

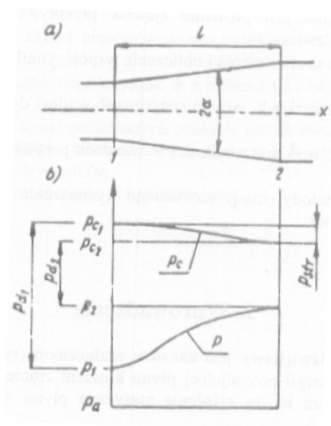


Fig. 1. Diffuseur subsonique:

- profil du diffuseur,
- distribution de pression (surpression) le long du diffuseur

Dans ce travail pratique on utilise un diffuseur plat qui possède deux parois parallèles. On utilise ce type de diffuseur très souvent dans les installations de ventilation avec des canaux de section rectangulaire. Le diffuseur plat est bien adapté aux recherches. Bien que la distribution des pressions et les pertes de pression n'y aient pas les mêmes valeurs que pour un diffuseur axisymétrique, le principe de fonctionnement est conservé.

Dans ce travail, on utilise aussi un diffuseur ouvert l'atmosphère. La figure 2 présente dans ce cas la distribution de la pression statique (courbe 1). On peut observer que dans le diffuseur entier il y a des dépressions par rapport à la pression atmosphérique p_a . Sur la figure 1b, il n'en était pas ainsi, on avait une surpression, car dans ce cas le diffuseur n'est pas ouvert l'atmosphère (au sortie d'un canal) mais dans le canal avec la surpression à l'entrée de diffuseur.

Pour l'angle $2\alpha = 0$ le diffuseur se transforme en un canal à section constante. Cela conduit à une distribution de pressions classique (courbe 2) où dans chaque section du canal il y a juste la surpression nécessaire pour vaincre la résistance de frottement.

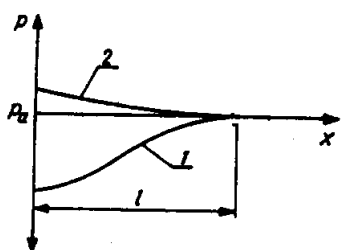


Fig. 2. Comparaison des distributions de pressions entre
1. diffuseur ouvert sur l'atmosphère
2. canal de sortie à section constante

L'angle d'ouverture 2α du diffuseur a une influence fondamentale sur la distribution longitudinale des pressions et sur les pertes de pression.

Pour les petits angles, $2\alpha \leq 12^\circ$ (15°), les couches limites restent attachées aux parois et les pertes de pression sont modérées. Les distributions de vitesse ont l'allure indiquée sur la figure 3. Bien sûr elles sont différentes de celles que l'on aurait avec un canal à section constante. En outre, l'épaisseur δ des couches limites augmentent. On peut aussi observer comme caractéristique importante que $dp/dx > 0$ ce qui conduit à un profil concave de vitesse (fig. 3). C'est le résultat de deux facteurs: le frottement à la paroi et la pression qui augmente vers l'aval.

Aux grands angles 2α , l'écoulement change totalement d'aspect. Les grands gradients de pressions dp/dx sont si grands qu'ils conduisent à une couche limite plus épaisse et ralentie. Au point A de la paroi (figure 4) elle commence à se détacher, le profil de vitesse a alors une dérivée nulle à la paroi. La partie inférieure de la figure 4 représente la répartition de la vitesse pour différentes sections du diffuseur avec la ligne séparatrice qui commence au point A et qui limite une zone de turbulence (courants inverses) du reste de l'écoulement. La partie supérieure de la figure 4 représente les lignes de courant et les zones de tourbillons. Les perturbations d'écoulement provoquées par le décollement de la couche limite, est la source de très grandes pertes pour la pression $p_{str.}$.

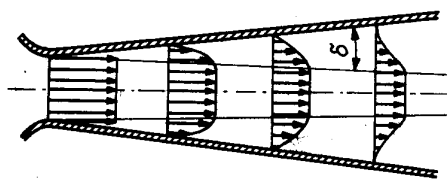


Fig. 3. Écoulement dans un diffuseur sans décollement de la couche limite

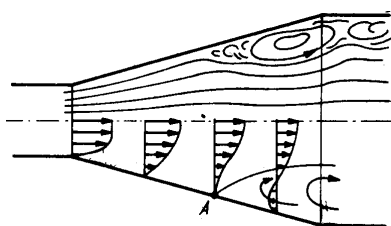


Fig. 4. Écoulement dans un diffuseur avec décollement de la couche limite

La figure 5 présente l'influence de la forme des parois du diffuseur sur la distribution des pressions, et également sur la valeur des pertes de pression. Le diffuseur (1) avec les parois rectilignes n'a pas une dérivée longitudinale de pression uniforme, $dp/dx \neq \text{const.}$, et le plus grand gradient de pression, soit donc la plus grande possibilité de détachement de la couche limite, existe dans la partie initiale de diffuseur. Le diffuseur (2), dit diffuseur iso-gradient, avec ses parois courbes, se caractérise par un gradient uniforme de pression $dp/dx = \text{const.}$ Cela favorise le déplacement du détachement de la couche limite vers la section de sortie, diminuant la zone de turbulence et diminuant aussi les pertes de pression. Cette forme est essentielle aux grands angles 2α .

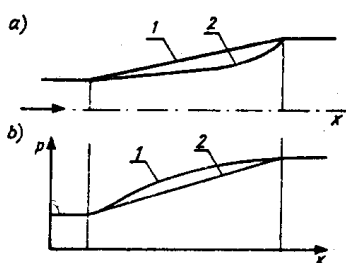


Fig. 5. Influence de la forme de parois d'un diffuseur:

- a) forme de parois
- b) distribution de pression
- 1 - diffuseur avec des parois droites
- 2 - diffuseur avec des parois courbes

Concernant la répartition des vitesses dans la section de sortie du diffuseur et l'influence de la turbulence, on peut en général constater que quand cette distribution est plus uniforme ou l'intensité de turbulence plus grande, le décollement de la couche limite est moins probable.

La répartition de la vitesse dans une couche limite peut être mesurée en utilisant p. ex. une sonde de pression. Dans ce travail pratique, on utilisera une microsonde de Pitot dans la section de sortie du diffuseur. En mesurant la répartition des pressions (surpressions) totales z_c on mesure aussi la distribution des pressions dynamiques z_d , parce que la pression statique est égale à la pression atmosphérique. Un exemple de distribution de vitesses est reporté sur la figure 6. A partir de la distribution de vitesse mesurée on peut déterminer les épaisseurs conventionnelles de la couche limite, notamment l'épaisseur de déplacement δ^* définie par la relation:

$$\delta^* v_\infty = \int_0^\sigma (v_\infty - v) dy \quad (2)$$

A gauche il y a l'aire du rectangle de côtés δ^* et v_∞ , à droite il y a le champ tracé dont on peut déterminer l'aire par planimétrie. La vitesse v_∞ est la vitesse de l'écoulement non perturbé, hors de la frontière de la couche limite, et δ est l'épaisseur de la couche limite.

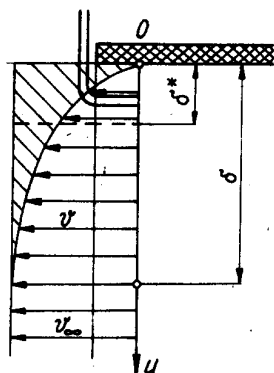


Fig. 6. Répartition de la vitesse dans la couche limite

3. SCHÉMA ET DESCRIPTION DU BANC DE MESURE

La figure 7 présente le schéma du banc de mesure. Il est alimenté par un ventilateur radial (1). Le circuit aéraulique comprend le tunnel (2), le diffuseur plan (3), un élément d'adaptation (4) pour passer de la section circulaire à la section rectangulaire ; $a_1 * b_1 = 52 * 70$ mm, où a_1 est la mesure verticale et b_1 la mesure horizontale. Le diffuseur possède deux parois avec une possibilité d'inclination dont on peut régler l'angle entre les limites $2\alpha = 0 \div 20^\circ$ avec un pas de 1° . Pour réaliser ce but on utilise le tasseau profilé (5) qui est muni d'ouvertures et de goupilles. La paroi supérieure possède dix tubulures (6) avec des prises de pression statique. À l'entrée du diffuseur il y a une sonde de Pitot (7) pour mesurer la pression totale et une prise de pression statique, tubulure (8). À la sortie du diffuseur il y a la microsonde de Pitot (9) de diamètre 1 mm, qui sert à mesurer la distributions des pressions dans la couche limite. Cette microsonde est montée dans la prise (10), ce qui permet son déplacement selon une direction perpendiculaire à la paroi du diffuseur (un tour de vis = un déplacement de la sonde de 1 mm). Les pressions (sous-pressions ou surpressions) sont mesurées avec un micromanomètre à alcool (11).

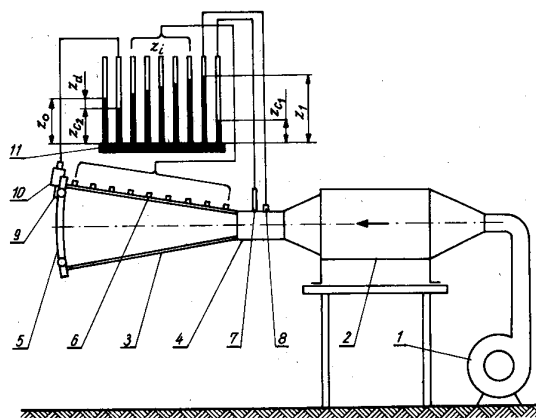


Fig. 7. Schéma du banc de mesure TCS-2
1 - ventilateur, 2 - petit tunnel, 3 - diffuseur plan, 4 - élément adaptateur, 5 - tasseau profilé, 6 - tubulures pour mesurer la distribution des pressions, 7 - sonde de Pitot, 8 - tubulure pour mesurer des pressions à l'entrée, 9 - microsonde de Pitot, 10 - prise de la microsonde, 11 - manomètre

4. MÉTHODES DE MESURES ET CALCULS

Après avoir mis en marche la soufflerie il faut effectuer les essais suivants :

**** Pour quelques angles 2α , par exemple 0° , 6° , 12° , 18°**

mesure de la hauteur manométrique z_{c1} correspondant à la pression totale à l'entrée du diffuseur (sonde cylindrique). Comme la distribution de la vitesse est uniforme à la buse de sortie du tunnel, il suffit d'une seule mesure.

Mesure de la hauteur manométrique z_I correspondant à la pression statique à l'entrée du diffuseur.

Mesure de la hauteur manométrique z_{c2} correspondant à la pression totale à la sortie du diffuseur. On utilise la microsonde de Pitot qui est introduite à l'intérieur de la zone où la répartition de la vitesse est uniforme.

Mesure de la hauteur manométrique z_I correspondant à la pression statique en quelques points sur la paroi du diffuseur.

Mesure de la hauteur manométrique z_0 dans le tuyau manométrique ouvert à l'atmosphère.

**** Pour un angle choisi, par exemple $2\alpha = 12^\circ$** , il faut déterminer la hauteur manométrique z_d correspondant à la distribution des pressions dynamiques à la sortie du diffuseur (microsonde de Pitot). z_d est donné par la différence des hauteurs manométriques totales et statique, avec une pression statique au point de mesure égale à la pression atmosphérique, ce qui donne

$$z_d = |z_{c2} - z_0| \text{ [mm]},$$

On déterminera z_d à différentes distances y de la paroi du diffuseur, de $y = 0.5 \text{ mm}$ à $y = \delta$, par pas de 2 mm . La distance $y = 0.5 \text{ mm}$ est égale au rayon de la sonde de Pitot. La distance $y = \delta$ est difficile à saisir à l'aide de sonde de pression et elle peut être évaluée approximativement comme la distance à partir de laquelle z_d ne change plus.

Les résultats doivent être notés dans le tableau des mesures.

On fera ensuite les calculs suivants:

Perte de pression p_{pertes} (Fig. 1), elle résulte de la relation (1):

$$p_{\text{pertes}} = p_{c1} - p_{c2} \quad (3)$$

Cette équation ne change pas pour le diffuseur de sortie pour lequel la pression $p_2 = p_a$. Après quelques transformations on obtient :

$$p_{\text{pertes}} = \frac{\rho_m g (|z_{c1} - z_{c2}|)}{1000k} \text{ [N/m}^2\text{]} \quad (4)$$

avec $\rho_m = 820 \text{ kg/m}^3$, la densité du liquide manométrique ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$),

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2,$$

z_{c1}, z_{c2} – les hauteurs manométriques pour la pression totale à l'entrée et à la sortie du diffuseur [mm],

k - constante de micromanomètre

Pression dynamique p_{d1} à l'entrée du diffuseur

$$p_{d1} = \frac{\rho_m g (|z_{c1} - z_1|)}{1000k} \text{ [N/m}^2\text{]} \quad (5)$$

avec les mêmes indices que dans l'équation (4).

Coefficient des pertes de la pression dans le diffuseur

$$\xi_d = \frac{P_{pertes}}{p_{d1}} \quad (6)$$

Pression statique sur la paroi du diffuseur

$$p_i = \frac{\rho_m g (z_o - z_i)}{1000k} \text{ [N/m}^2\text{]} \quad (7)$$

avec les mêmes indices que dans l'équation (4).

Distribution des vitesses dans la couche limite

$$u = \sqrt{\frac{2p_d}{\rho}} = \sqrt{\frac{2\rho_m g z_d}{1000\rho k}} = 3,7 \sqrt{\frac{z_d}{k}} \text{ [m/s]} \quad (8)$$

avec les mêmes indices que dans l'équation (4), et en outre $\rho = 1,17 \text{ kg/m}^3$ pour la densité de l'air (à 1000 hPa et 20 ° C).

Les résultats et calculs seront placés dans des tableaux. On les utilisera pour préparer trois graphes:

1. Le graphe des changements de ξ_d en fonction de 2α (Fig. 8) : Graphe $\xi_d = f(2\alpha)$.
2. Le graphe de la distribution de pression statique le long de la paroi du diffuseur (Fig. 9) : Graphe $p = f(x)$. Ce graphe est équivalent à celui le long du diffuseur. Sur l'axe x on gardera la proportionnalité de la disposition des points de mesure.
3. Le graphe de la distribution de vitesse dans la couche limite à la sortie du diffuseur (Fig. 10) : Graphe $u = f(y)$.

5. TABLEAUX DES MESURES

| 2α | Entrée du diffuseur | | Sortie du diffuseur | Orifices dans la paroi du diffuseur | z_0 | k |
|-----------|------------------------|-------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------|---|
| | z_{c1} | z_1 | z_{c2} | z_i | | |
| | | | mm C ₂ H ₅ OH | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |

| 2α | Distribution des pressions dynamiques dans la couche limite, z _d [C ₂ H ₅ OH] | | | | k |
|----|---|--|--|--|---|
| | Distance de la paroi du diffuseur y [mm] | | | | |
| | 0,5 | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |

6. TABLEAUX DES RESULTATS DES CALCULS

| 2α | Coefficient de perte de pression | | | Distribution des pressions le long du diffuseur | | | | |
|-----------|----------------------------------|----------|-----------|---|--|--|--|--|
| | p_{pertes} | p_{d1} | ζ_d | p_i | | | | |
| | N/m ² | | - | N/m ² | | | | |
| | Éq. (4) | Éq. (5) | Éq. (6) | Équation (7) | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

| 2α | Distribution de vitesse dans la couche limite u [m/s] selon équation (8) | | | | δ [mm] |
|----|---|--|--|--|-----------|
| | Distance de la paroi du diffuseur y [mm] | | | | |
| | 0,5 | | | | |
| | | | | | |

7. GRAPHES

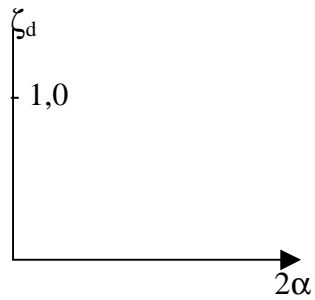


Fig. 8. $\zeta_d = f(2\alpha)$

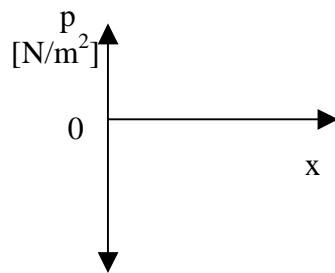


Fig. 9. Distribution de la pression statique le long du diffuseur $p = f(x)$

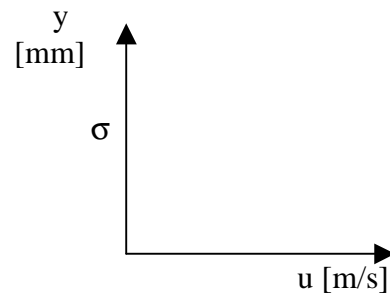


Fig. 10. Distribution des vitesses dans la couche près des parois

8. CONCLUSIONS ET REMARQUES

1. Quelle est l'origine de l'équation (6) ?
2. Indiquer une solution possible pour diminuer les pertes dans un diffuseur à grand angle 2α .
3. Quelle est l'utilité des épaisseurs conventionnelles définies pour une couche limite ? Expliquer sur l'exemple de δ^* .
4. Quand peut-on mesurer la pression dynamique à l'aide d'un tube de Pitot ?
5. Faire des remarques sur les graphes (8), (9), (10).
6. Compléter par d'autres remarques et observations sur le TP.