

*CHAPITRE III*

*ETUDE ÉNERGÉTIQUE DES PASSAGES  
D'ENTRÉE ET DE SORTIE*

### **III.1- ENTRÉE D'AIR**

La fonction de l'entrée d'air est de ralentir l'écoulement relatif de l'air en amont du turboréacteur jusqu'à un certain nombre de Mach interne imposé pour le fonctionnement du compresseur ( $M \leq 0.4$ ). Elle est composée principalement d'une zone de capture de l'air et d'une conduite divergente (diffuseur). L'ouverture graduelle de cette canalisation doit satisfaire les conditions suivantes:

- Une faible perte de pression totale.
- L'écoulement doit être uniforme à l'entrée du compresseur car la distorsion du profil de vitesse à l'entrée de ce dernier peut provoquer un renversement aérodynamique qui conduit à des pannes d'aubes à cause des vibrations résultantes.
- Un faible encombrement puisque l'espace disponible est limité.
- Une faible traînée externe.

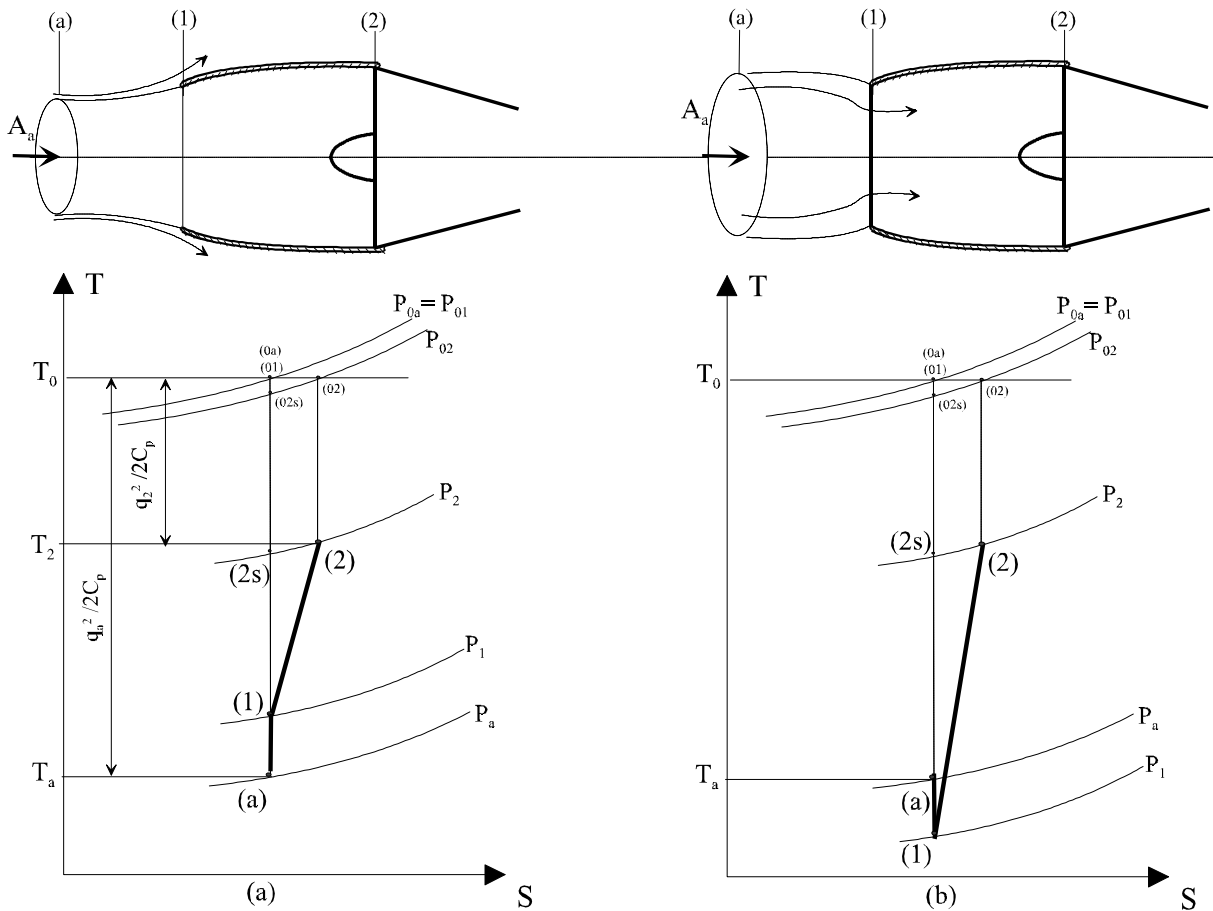
On note qu'il est plus difficile d'obtenir une bonne performance pour les éléments comprimants (diffuseur, compresseur) que pour les éléments détendant (turbine, tuyère). Ceci est dû à la tendance de la couche limite à se décoller dans le cas d'un écoulement avec un gradient de pression défavorable (c-à-d la pression augmente au cours de l'écoulement).

#### **III.1.1- CONFIGURATION DE L'ÉCOULEMENT EXTÉRIEUR**

La configuration de l'écoulement dans la zone de capture d'air en amont du diffuseur dépend de la vitesse de vol et du débit massique demandé par le turboréacteur.

Pour un écoulement subsonique on distingue 2 allures de lignes de courant (fig.III.1).

La section de capture de l'air du cas (b) est plus grande que celle du cas (a). Ceci est dû à l'exigence d'un débit massique très grand au moment du décollage (fig.III.1.b) pour produire la poussée suffisante à la montée du véhicule; et afin d'admettre la quantité d'air nécessaire, l'écoulement doit être accéléré extérieurement au décollage. Au contraire, dans le cas du vol en croisière (fig.III.1.a) l'écoulement subit une décélération extérieure. Pour des vitesses données dans les sections (a) et (2) et sachant que les deux processus extérieurs précédents sont isentropiques, l'accélération extérieure de l'écoulement dans le cas (b) va augmenter la vitesse et diminuer la pression à l'entrée du diffuseur. Par conséquent, l'augmentation de la pression à l'intérieur du diffuseur devient plus grande que celle qui correspond à la décélération extérieure dans le cas (a). Si l'augmentation de la pression par l'accélération extérieure est suffisamment grande, le diffuseur peut avoir un renversement aérodynamique dû au décollement de la couche limite.



**Figure III.1- Configuration de l'écoulement subsonique dans un diffuseur de turboréacteur.**

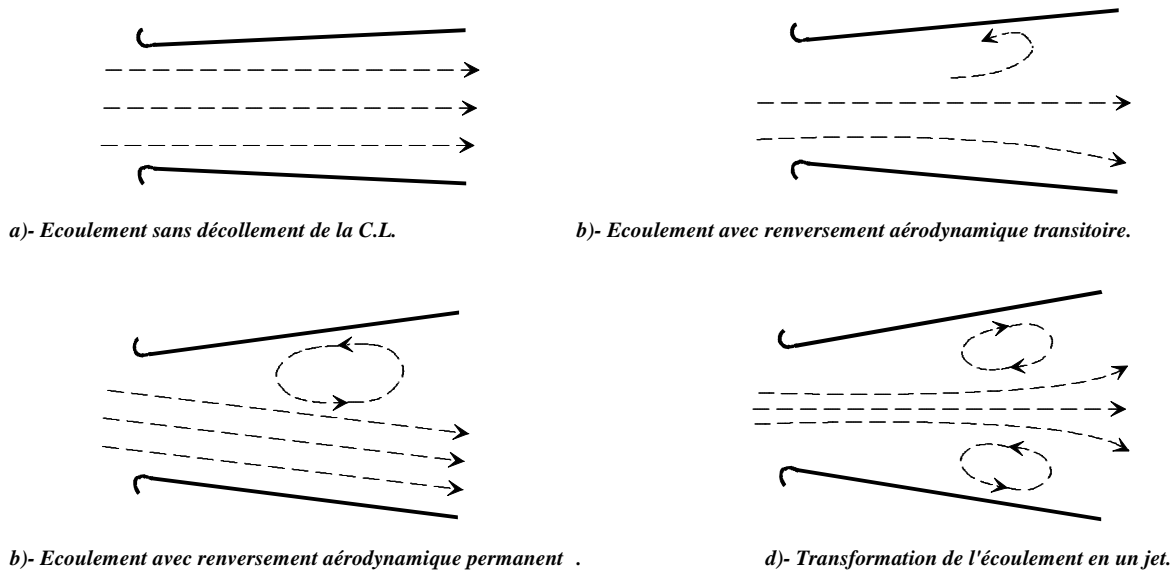
**(a) : Grande vitesse ou faible débit massique.**

**(b) : Faible vitesse ou grand débit massique.**

On conclut donc que la section d'entrée du diffuseur doit être choisie de telle sorte qu'elle minimise l'accélération extérieure pendant le décollage et produit une décélération extérieure durant le vol en croisière.

### **III.1.2- CONFIGURATION DE L'ÉCOULEMENT INTÉRIEUR**

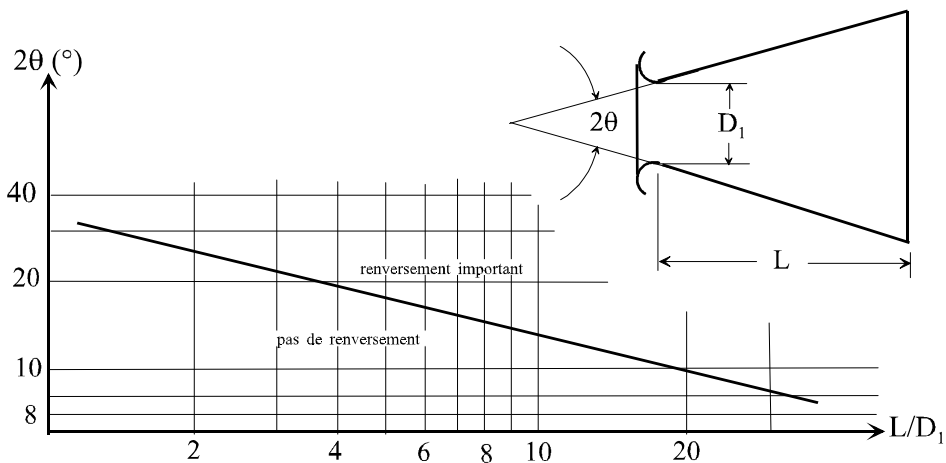
L'écoulement dans le diffuseur subit encore une décélération irréversible à cause des frottements entre les parois et le fluide. Le type d'écoulement à obtenir dans un diffuseur donnée dépend largement du taux d'accroissement de la section transversale. Si cette section ne s'agrandit pas rapidement dans la direction de l'écoulement la couche limite ne décolle pas et l'écoulement aura un bon comportement dans le diffuseur. Tandis que si le taux de divergence du diffuseur dépasse une certaine limite, l'écoulement va subir des décollements et un renversement aérodynamique qui sont transitoires ou permanents selon le cas (fig. III.2).



**Figure III.2- Différents types d'écoulements dans les diffuseurs.**

Dans le cas (d) le diffuseur ne joue aucun rôle dans la compression du fluide et l'écoulement traverse cet élément d'entrée comme un jet.

Pour avoir un bon comportement de l'écoulement dans un diffuseur, l'angle de divergence ne doit pas dépasser la valeur critique qui est indiquée sur la figure (III.3).



**Figure III.3- Limite d'apparition du renversement aérodynamique [1].**

### **III.1.3- PERFORMANCES D'UN DIFFUSEUR**

Parmi les paramètres définissant les performances relatives d'un diffuseur on distingue:

#### **a- Rendement adiabatique:**

En se référant à la figure (III.1.a) on définit le rendement adiabatique du diffuseur par:

$$\eta_d = \frac{h_{02s} - h_a}{h_{02} - h_a} \approx \frac{T_{02s} - T_a}{T_{02} - T_a} \quad (3.1)$$

L'état (02s) est défini comme un état qu'on peut atteindre si l'air est comprimé isentropiquement jusqu'à la pression totale qui existe à la sortie du diffuseur. Nous avons :

$$\frac{T_{02s}}{T_a} = \left( \frac{P_{02}}{P_a} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

et en combinant avec la relation (2.23), l'équation (3.1) devient alors:

$$\eta_d = \frac{\left( \frac{P_{02}}{P_a} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1}{\frac{\gamma-1}{2} M_a^2} \quad (3.2)$$

**b- Rapport des pressions totales:** Il est défini par:

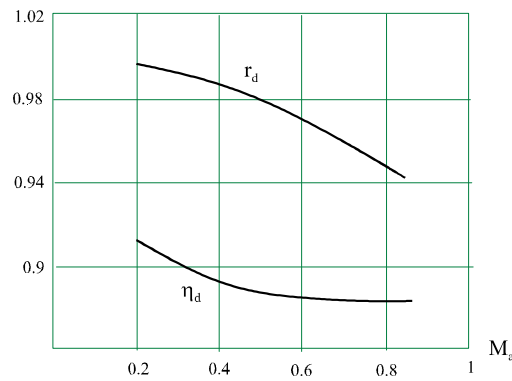
$$r_d = \frac{P_{02}}{P_{0a}} \quad (3.3)$$

on a: 
$$\frac{P_{02}}{P_a} = \frac{P_{02}}{P_{0a}} \frac{P_{0a}}{P_a} = \frac{P_{02}}{P_{0a}} \left( \frac{T_{0a}}{T_a} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} = \frac{P_{02}}{P_{0a}} \left[ 1 + \frac{\gamma-1}{2} M_a^2 \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

En combinant cette relation avec les équations (3.2) et (3.3) on aura:

$$\eta_d = \frac{\left( 1 + \frac{\gamma-1}{2} M_a^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} r_d^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1}{\frac{\gamma-1}{2} M_a^2} \quad (3.4)$$

Les variations de  $r_d$  et  $\eta_d$  en fonction du nombre de Mach  $M_a$  sont représentées sur la figure (III.4).



**Figure III.4- Performances d'un diffuseur subsonique typique [1].**

### **III.2- CANALISATION DE SORTIE D'AIR (TUYÈRE)**

Le rôle de la tuyère est de produire la poussée nécessaire à la propulsion en détendant les gaz brûlés de température et de pression élevées. Elle peut être simplement convergente, convergente-divergente ou convergente avec le col juste à la sortie.

On donne au convergent un profil arrondi assurant la convergence rapide jusqu'au col, la partie divergente étant constituée d'un tronc de cône de 7 à 8° d'ouverture au sommet. En utilisant des tuyères de sections réglables, on améliore les performances du turboréacteur.

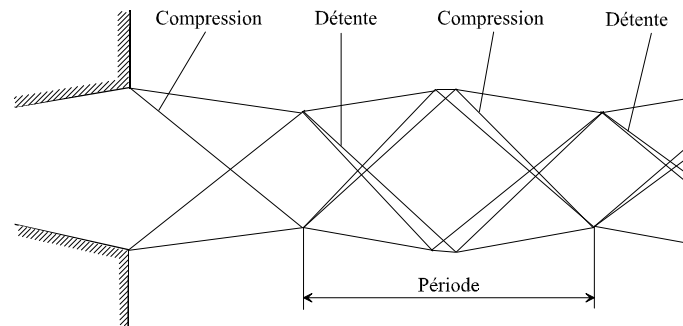
#### **III.2.1- ETUDE DE L'ÉCOULEMENT**

Une tuyère fonctionne dans les meilleures conditions lorsqu'elle est dimensionnée "adaptée", c-à-d lorsque la pression d'éjection  $P_e$  est égale à la pression ambiante  $P_a$ . Dans ce cas l'écoulement n'est pas perturbé ni à l'intérieur, ni à l'aval de la tuyère.

\* **Si  $P_e < P_a$ :** Il se produit une onde de recompression (onde oblique) à la sortie, provoquant une élévation de température. Si le rapport  $P_a/P_e$  est suffisamment grand, l'augmentation de température peut être assez élevée pour que la vitesse locale du son devienne plus grande que celle de l'extrémité de la tuyère. L'onde de recompression remonte alors le divergent. Si son taux de compression diminue (ainsi que sa température et sa vitesse), elle s'arrête alors avant le col en une section où sa vitesse est égale à celle du courant. On obtient alors une onde de recompression stationnaire. Si l'onde atteint le col, tout l'écoulement devient subsonique (puisque derrière l'onde  $M < 1$ ): la tuyère fonctionne alors comme avec un fluide incompressible, c-à-d qu'il y a une détente dans le convergent et une compression dans le divergent.

\* **Si  $P_e > P_a$ :** En général, le jet se dilate à la sortie et crée une onde de dépression dont la vitesse est inférieure à celle du son à l'extrémité de la tuyère. Mais  $P_e$  peut prendre différentes

valeurs très voisines de  $P_a$  à l'extrémité de la tuyère qui font apparaître quelques phénomènes importants (fig.III.5).



**Figure III.5- Apparition d'ondes de recompression et de détente à la sortie de la tuyère.**

De plus, on note que le risque de décollement rapide du jet et l'apparition des ondes de choc droites et obliques difficiles à maîtriser se feraient sentir à faible altitude.

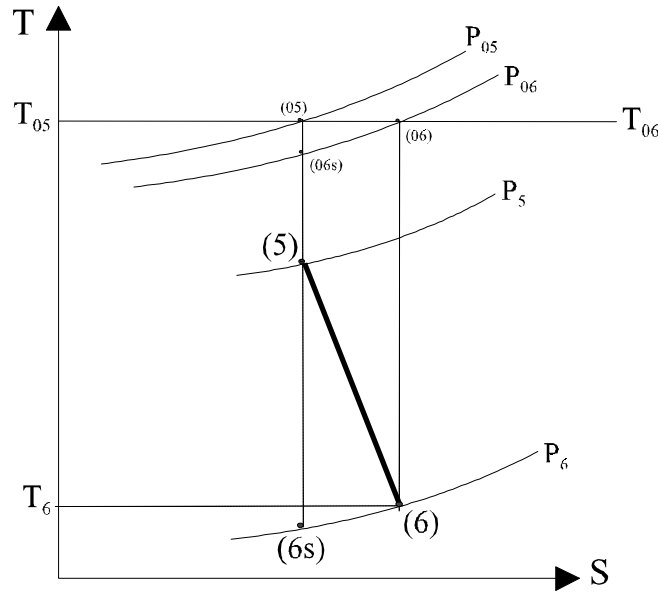
### **III.2.2- PERFORMANCES D'UNE TUYÈRE**

Le processus de la détente dans la tuyère est également adiabatique comme celui de compression dans le diffuseur. Ceci est dû au fait que le transfert de la chaleur par unité de masse du fluide est beaucoup plus faible que la différence d'enthalpie entre l'entrée et la sortie de la tuyère. D'autre part, ce transfert n'a pas le temps de s'effectuer vu que la vitesse est très élevée. La détente dans la tuyère peut être décrite, en première approximation, par les équations d'un écoulement unidimensionnel.

On définit le rendement adiabatique par rapport à l'isentropique d'une tuyère par:

$$\eta_R = \frac{h_{05} - h_6}{h_{05} - h_{6s}} \quad (3.5)$$

où l'état (6s) est celui qu'on obtient si les gaz sont accélérés isentropiquement jusqu'à la pression de sortie (fig.III.6).



**Figure III.6- Définition des états du fluide dans une tuyère.**

La vitesse d'éjection est donnée par la relation suivante:

$$q_e = \sqrt{2 \frac{\gamma R}{\gamma - 1} T_{05} \eta_R \left[ 1 - \left( \frac{P_6}{P_{05}} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right]} \quad (3.6)$$

En introduisant le nombre de Mach nous aurons:

$$M_6^2 = \frac{2}{\gamma - 1} \eta_R \left[ 1 - \left( \frac{P_6}{P_{05}} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right] \left\{ 1 - \eta_R \left[ 1 - \left( \frac{P_6}{P_{05}} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right] \right\}^{-1} \quad (3.7)$$

Le débit massique peut être déterminé par:

$$D = \rho_6 A_6 q_6 = \rho_6 A_6 M_6 \sqrt{\frac{\gamma R T_{05}}{1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_6^2}} \quad (3.8)$$

\* Si la détente est complète:  $P_6 = P_{atm}$

$$\frac{A_6}{A_5} = \frac{P_{05} M_5}{P_{06} M_6} \left[ \frac{1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_6^2}{1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_5^2} \right]^{\frac{\gamma + 1}{2(\gamma - 1)}} \quad (3.9)$$

Le rapport  $P_{05}/P_{06}$  peut être obtenu par:



$$\frac{P_{05}}{P_{06}} = \frac{P_{05}}{P_6} \frac{P_6}{P_{06}} = \frac{P_{05}}{P_6} \left\{ 1 - \eta_R \left[ 1 - \left( \frac{P_6}{P_{05}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \right\} \quad (3.10)$$

Nous pouvons exprimer ces relations en fonction de  $T_{04}$ ,  $\eta_T$ ,  $P_{03}/P_{02}$  ... en utilisant le même raisonnement que dans le chapitre précédent.