

C13

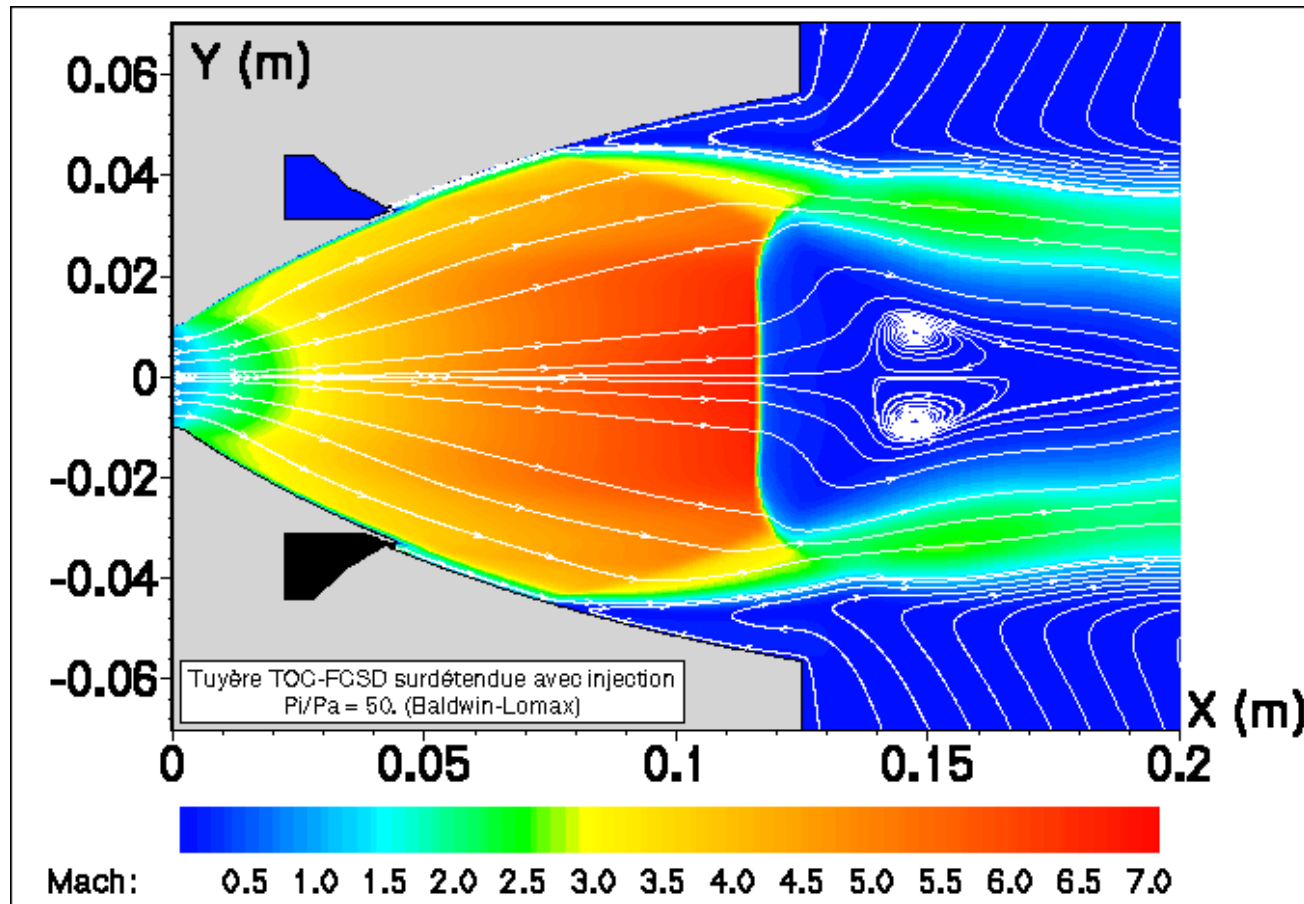
Décollement en supersonique*

*: Cours ENSMA pp78-80 et ENSICA pp118-135

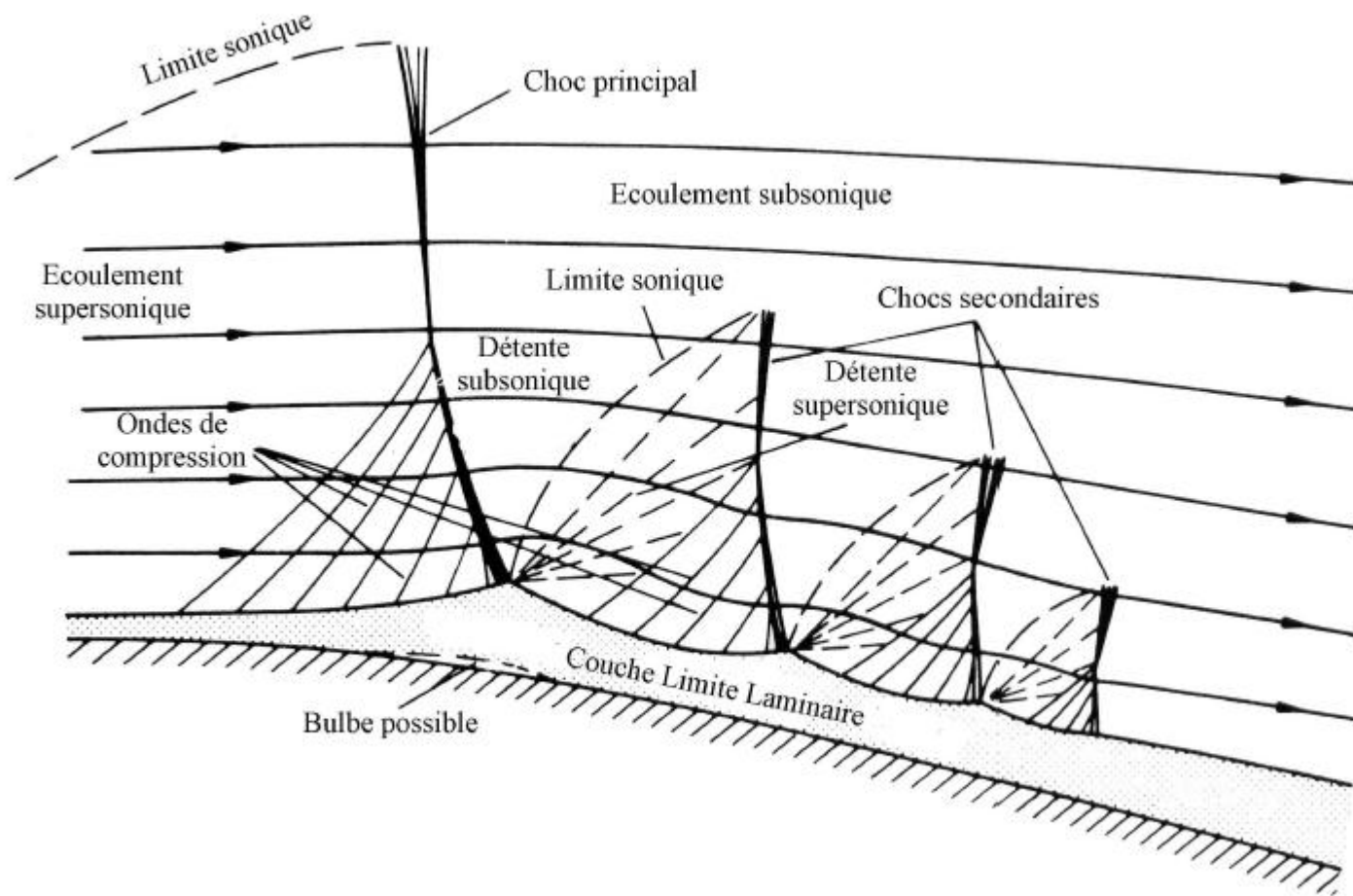
J. Délery / J. Gressier

UF Energétique et Propulsion
gressier@isae.fr

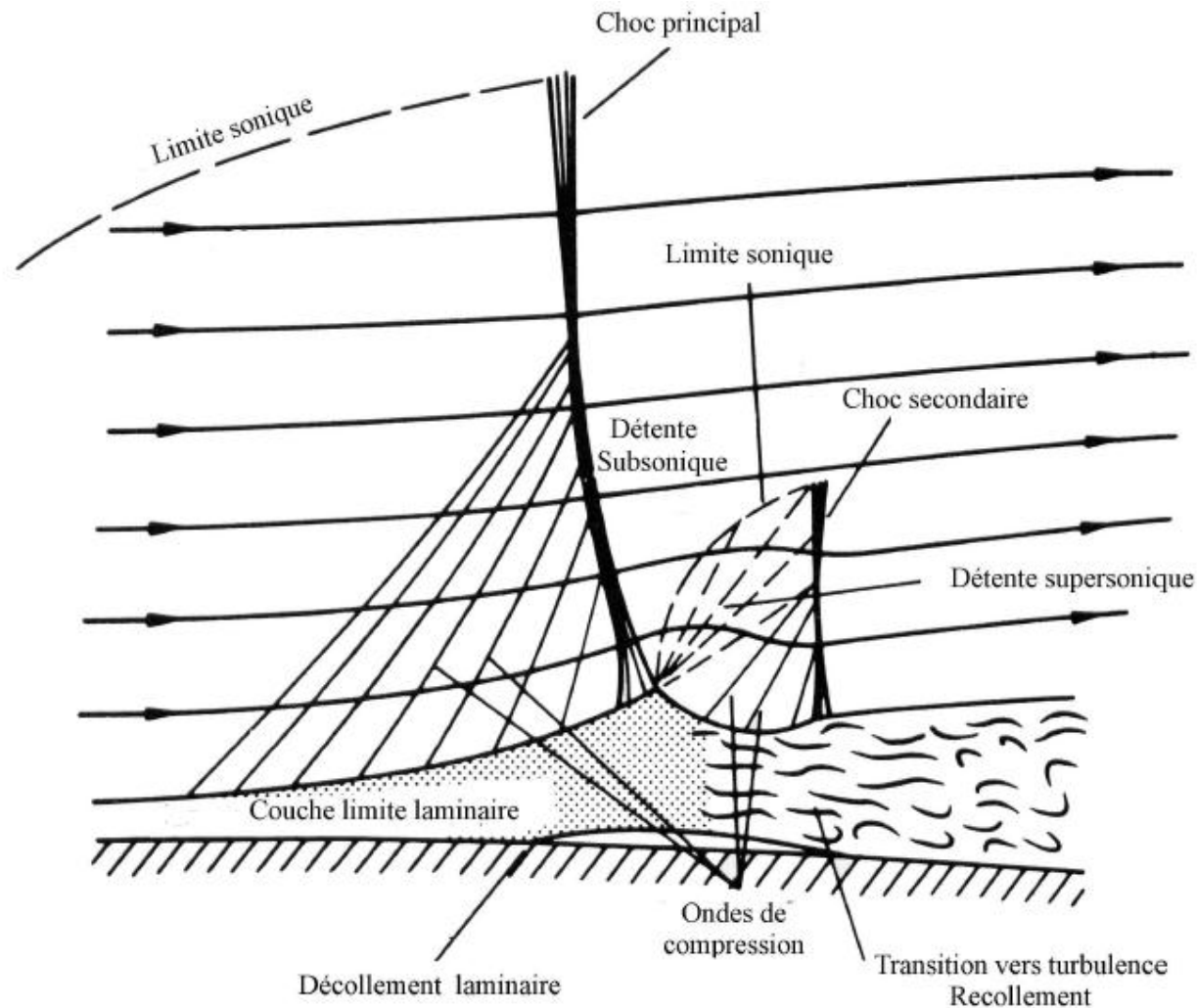
Décollement en supersonique: exemples et physique (1)



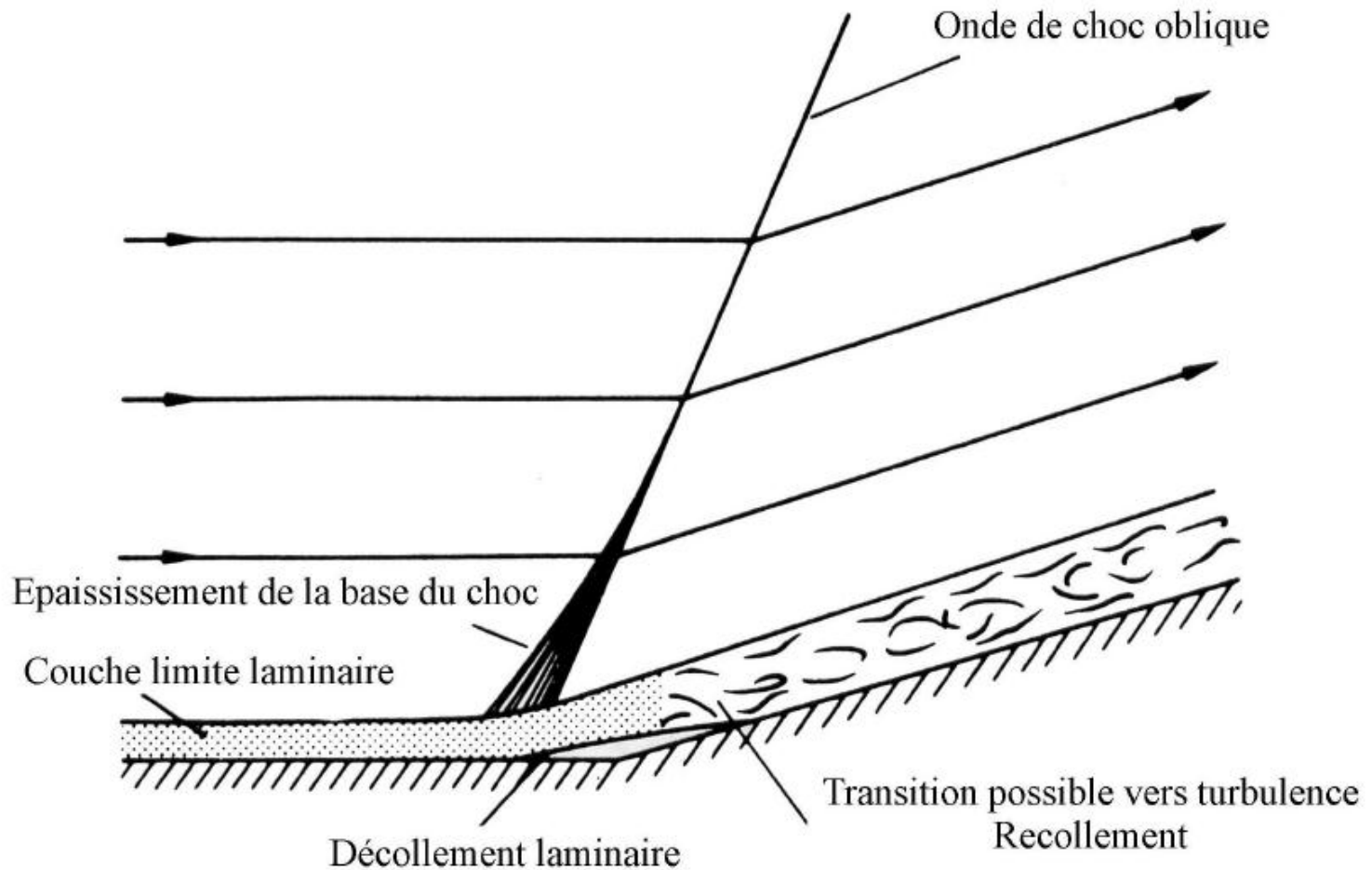
Décollement en supersonique: exemples et physique (2)



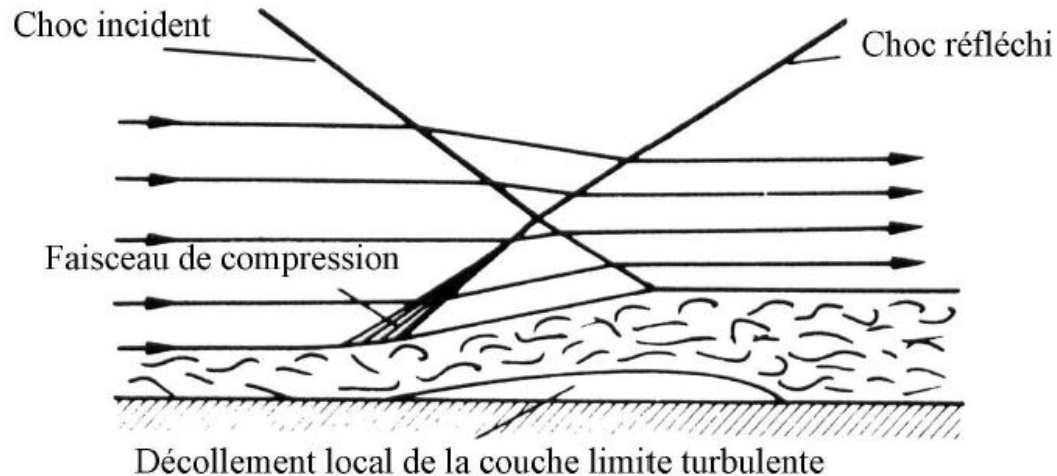
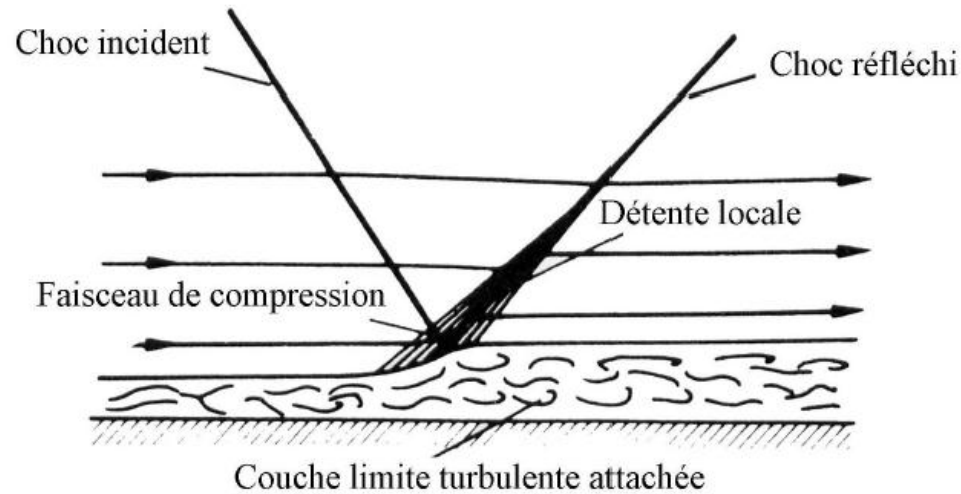
Décollement en supersonique: exemples et physique (3)



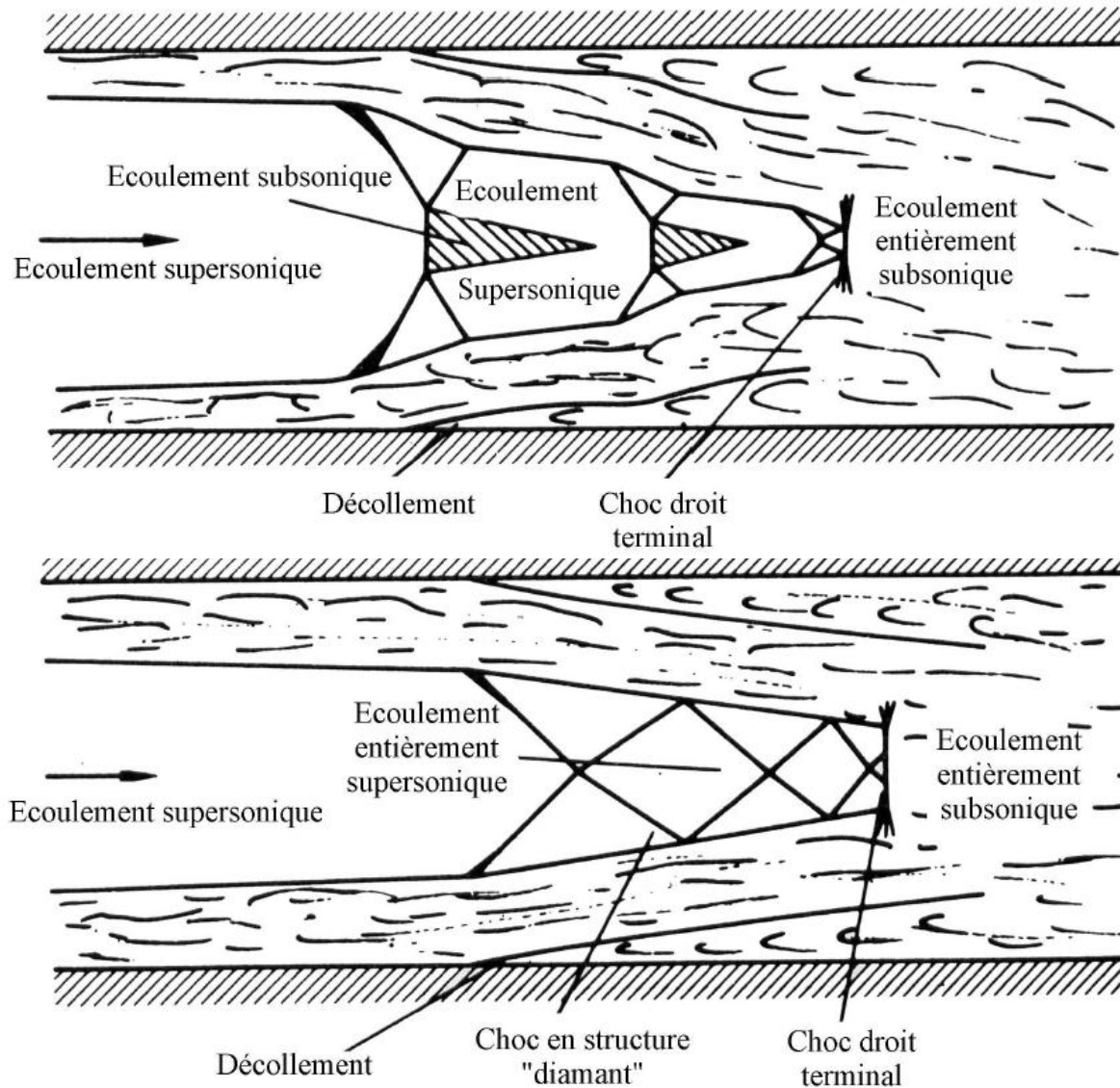
Décollement en supersonique: exemples et physique (4)



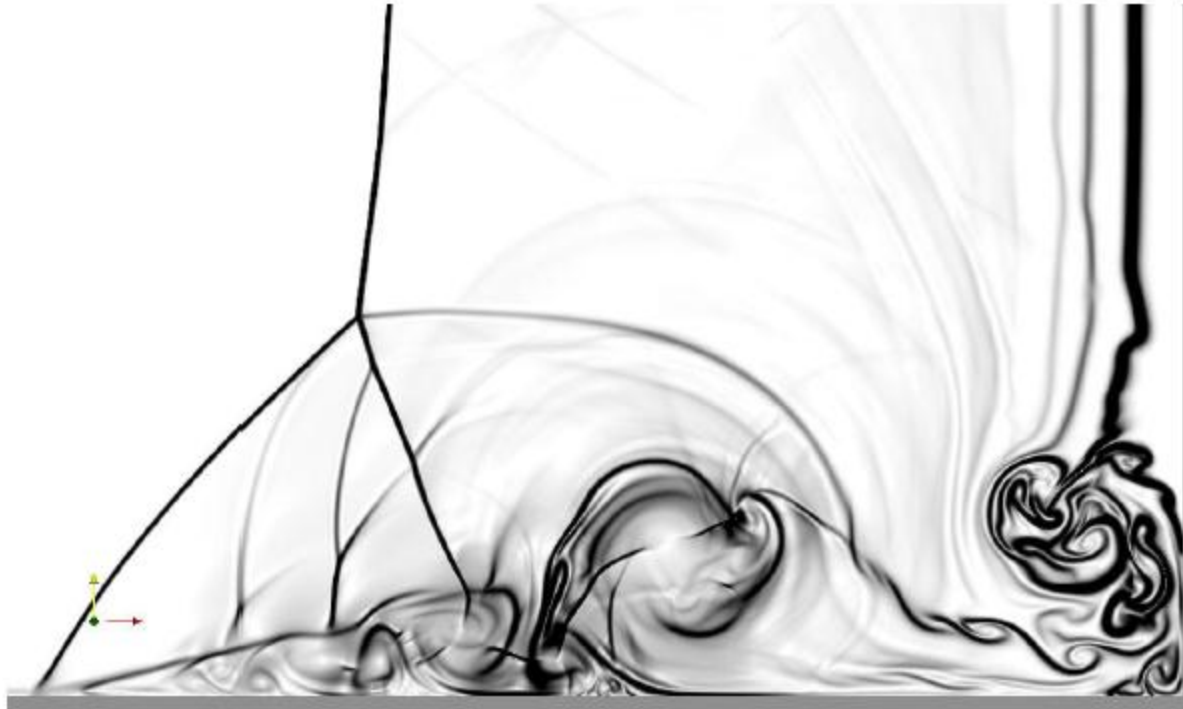
Décollement en supersonique: exemples et physique (5)



Décollement en supersonique: exemples et physique (6)

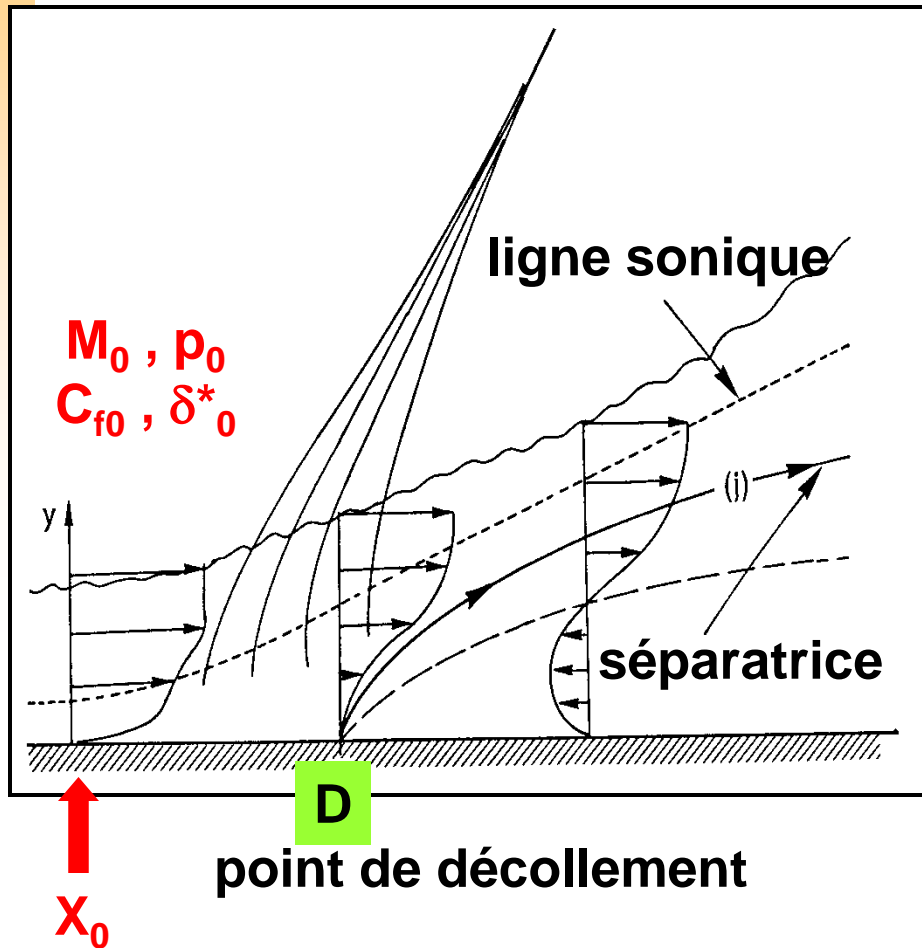


Décollement en supersonique: exemples et physique (7)

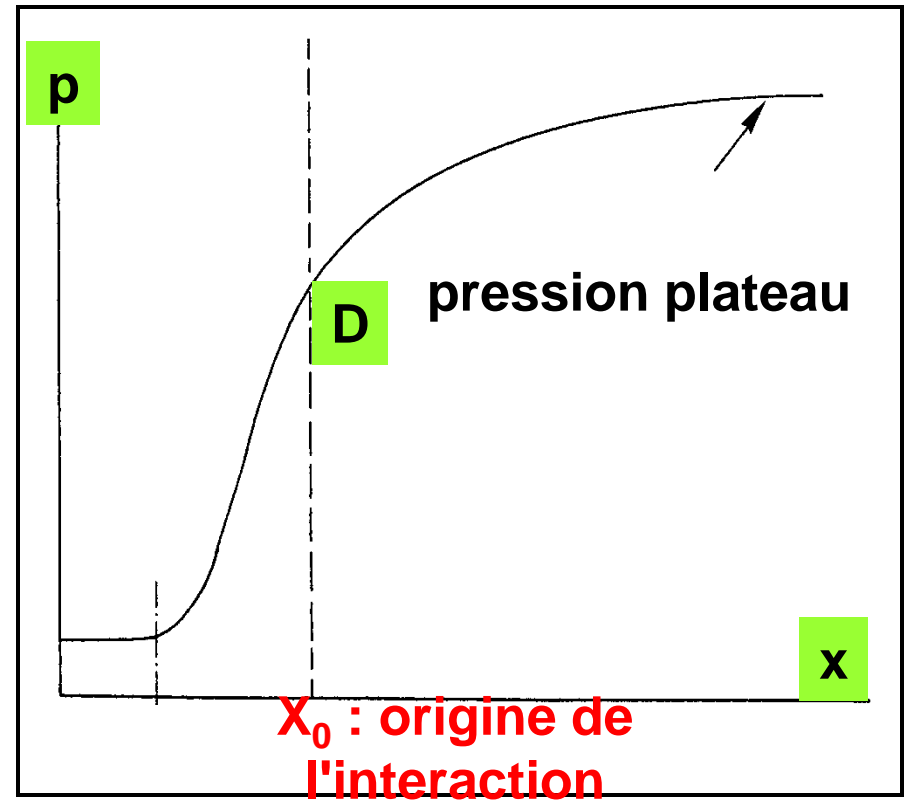


Simulations Prof. J. Gréssier (ISAE)

Décollement en supersonique: modélisation (1)



région du décollement



pression à la paroi

Décollement en supersonique: modélisation (2)

les bases de l'analyse théorique



équation du mouvement (approximation couche limite)

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{dp}{dx} + \frac{\partial \tau}{\partial y}$$

à la paroi $\rightarrow u = v = 0 \rightarrow \frac{dp}{dx} = \left(\frac{\partial \tau}{\partial y} \right)_P$

introduction d'échelles caractéristiques

$$\bar{x} = \frac{x - x_0}{L}$$

$$\bar{y} = \frac{y}{\delta_0^*}$$

$$\bar{\tau} = \frac{\tau}{\tau_{P_0}}$$

$$\bar{p} = \frac{p - p_0}{1/2 \gamma p_0 M_0^2}$$

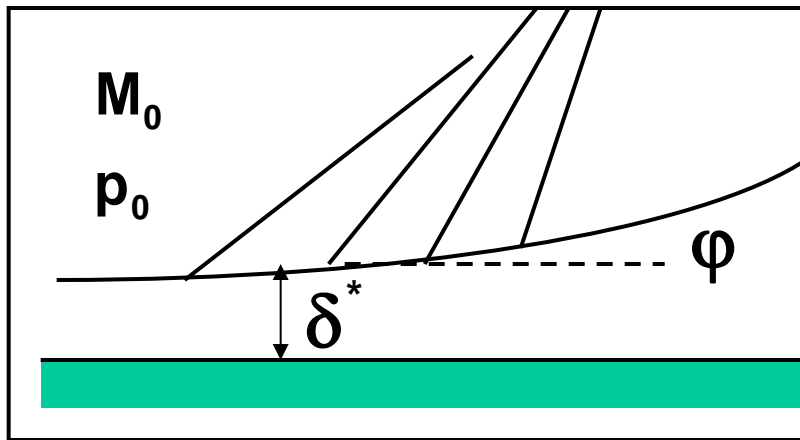


$$\frac{1/2 \gamma p_0 M_0^2}{L} \frac{d\bar{p}}{d\bar{x}} = \frac{\tau_{P_0}}{\delta_0^*} \left(\frac{\partial \bar{\tau}}{\partial \bar{y}} \right)_0 \rightarrow \frac{d\bar{p}}{d\bar{x}} = \frac{L}{1/2 \gamma p_0 M_0^2} \frac{\tau_{P_0}}{\delta_0^*} \left(\frac{\partial \bar{\tau}}{\partial \bar{y}} \right)_0$$

Décollement en supersonique: modélisation (3)

intégration $\rightarrow \bar{p}(\bar{x}) = \frac{L}{1/2\gamma p_0 M_0^2} \frac{\tau_{P_0}}{\delta_0^*} \int_0^{\bar{x}} \left(\frac{\partial \bar{\tau}}{\partial \bar{y}} \right)_0 d\bar{x} \quad (1)$

équation d'interaction ou de couplage



δ^* \rightarrow effet de déplacement de la couche limite

$$\tan \phi \cong \phi = \delta \phi = \frac{d\delta^*}{dx}$$

relation caractéristique linéarisée

$$\rightarrow \frac{\sqrt{M_0^2 - 1}}{\gamma M_0^2} \frac{dp}{p_0} - d\phi = 0$$



$$\frac{\sqrt{M_0^2 - 1}}{\gamma M_0^2} \frac{dp}{p_0} = \frac{d\delta^*}{dx}$$

Décollement en supersonique: modélisation (4)

introduction des échelles caractéristiques

$$\rightarrow \frac{\sqrt{M_0^2 - 1}}{\gamma M_0^2} \frac{dp}{p_0} = \frac{d\delta^*}{dx} \rightarrow \boxed{d\bar{p} = \frac{2}{\sqrt{M_0^2 - 1}} \frac{\delta_0^*}{L} \frac{d\bar{\delta}^*}{d\bar{x}}}$$

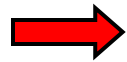
intégration $\rightarrow \bar{p}(\bar{x}) = \frac{2}{\sqrt{M_0^2 - 1}} \frac{\delta_0^*}{L} \int_0^{\bar{x}} \frac{d\bar{\delta}^*}{d\bar{x}} d\bar{x} \quad (2)$

produit $(1) \times (2) \rightarrow$

$$\bar{p}(\bar{x})^2 = \frac{L}{1/2\gamma p_0 M_0^2} \frac{\tau_{P_0}}{\delta_0^*} \frac{2}{\sqrt{M_0^2 - 1}} \frac{\delta_0^*}{L} \left(\int_0^{\bar{x}} \left(\frac{\partial \bar{\tau}}{\partial \bar{y}} \right)_0 d\bar{x} \right) \left(\int_0^{\bar{x}} \frac{d\bar{\delta}^*}{d\bar{x}} d\bar{x} \right)$$

Décollement en supersonique: modélisation (5)

fonction de corrélation sans dimension



$$F(\bar{x}) = \sqrt{\left(\int_0^{\bar{x}} \left(\frac{\partial \bar{\tau}}{\partial \bar{y}} \right)_0 d\bar{x} \right) \left(\int_0^{\bar{x}} \frac{d\bar{\delta}^*}{d\bar{x}} d\bar{x} \right)}$$

coefficient de frottement pariétal

$$C_{f_0} = \frac{\tau_{P_0}}{1/2 \gamma p_0 M_0^2}$$



$$\frac{p(\bar{x})}{p_0} = 1 + \frac{\gamma}{2} M_0^2 \sqrt{\frac{2C_{f_0}}{\beta_0}} F(\bar{x})$$

Décollement en supersonique: modélisation (6)

conséquence  durant le décollement la compression obéit à la relation :

$$\frac{p(\bar{x})}{p_0} = 1 + \frac{\gamma}{2} M_0^2 \sqrt{\frac{2C_{f0}}{\beta_0}} F(\bar{x})$$

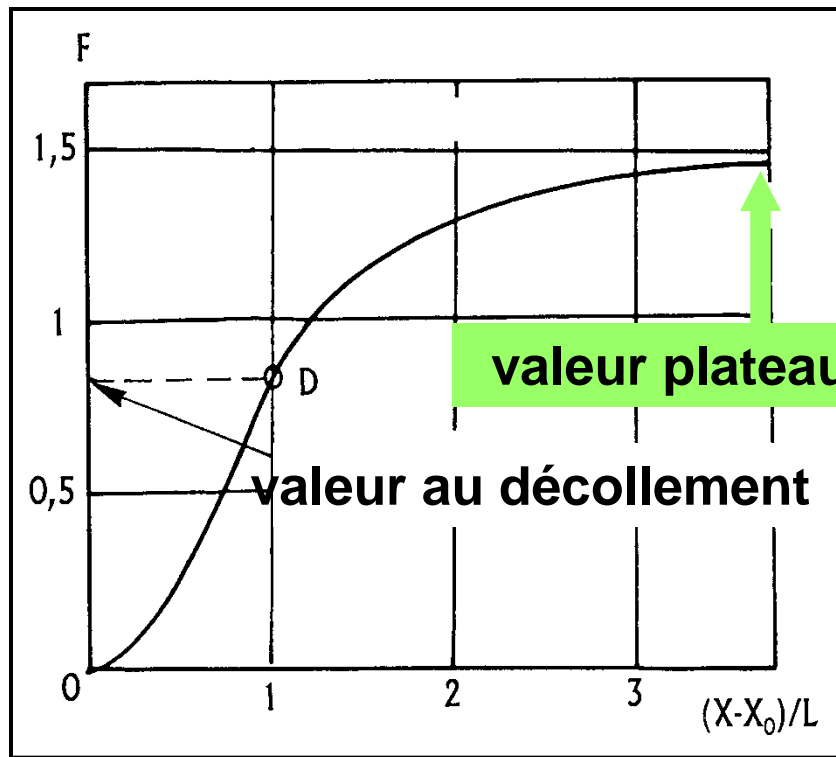
où : $\beta_0 = \sqrt{M_0^2 - 1}$

\bar{x} est l'abscisse normalisée $\bar{x} = (x - x_0)/L$ avec $L = x_D - x_0$

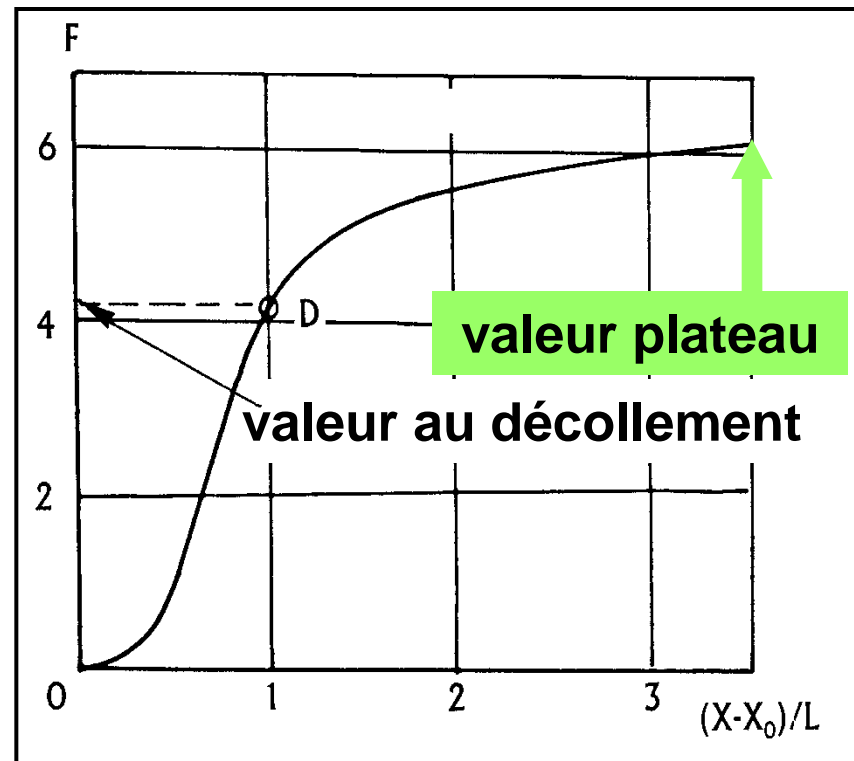
$F(\bar{x})$ est une **fonction de corrélation** ne dépendant que de \bar{x}
pour un état laminaire ou turbulent de la couche limite donné

Décollement en supersonique: modélisation (7)

fonction de corrélation pour la pression



écoulement laminaire



écoulement turbulent



un écoulement laminaire décolle beaucoup plus facilement qu'un écoulement turbulent

Critères de décollement (1)

 *prédire la valeur limite du rapport de pression p_K/p_E produisant le décollement de la couche limite*

interaction libre $\frac{p_K}{p_E} = 1 + 6 \frac{\gamma}{2} M_E^2 \sqrt{\frac{2C_{f_E}}{\beta_E}}$

critère de Zukoski $\frac{p_K}{p_E} = 1 + 0,5 M_E$

critère de Green $\frac{M_K}{M_E} = 0,78$

critère de Schmucker $\frac{p_E}{p_K} = (1,88 M_E - 1)^{-0,64}$

Critères de décollement (2)

Méthode de calcul de la poussée d'une tuyère avec décollement

1. calculer l'écoulement dans la tuyère amorcée jusqu'en sortie

2. appliquer un critère de décollement en sortie tuyère

★ $p_K > p_a$ pas de décollement

★ $p_K < p_a$ décollement

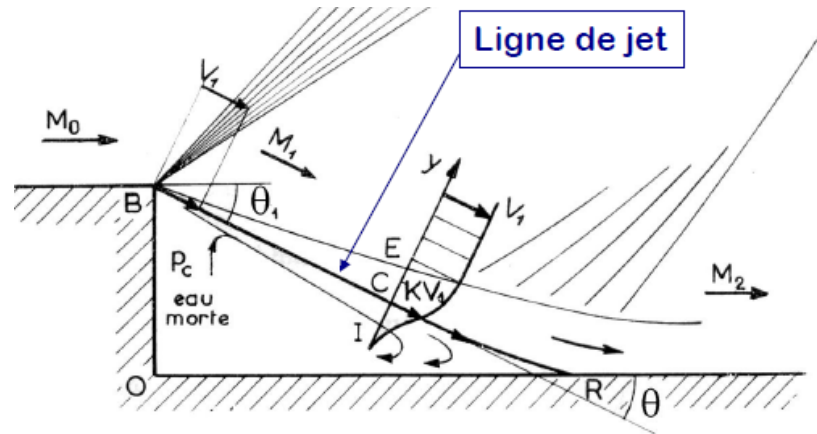
3. déterminer la position du décollement dans la tuyère

section X_D telle que le critère appliqué en $X_D \rightarrow p_K = p_a$

4. poussée = poussée de la partie non décollée +
poussée de la partie décollée

Critères de décollement (3)

- Alternative: approche de Korst (1955)
- Modèle physique:



- Hypothèses:

Couche limite en (0) négligée

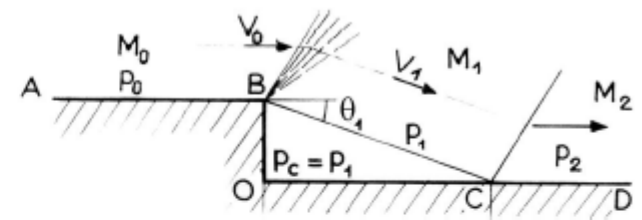
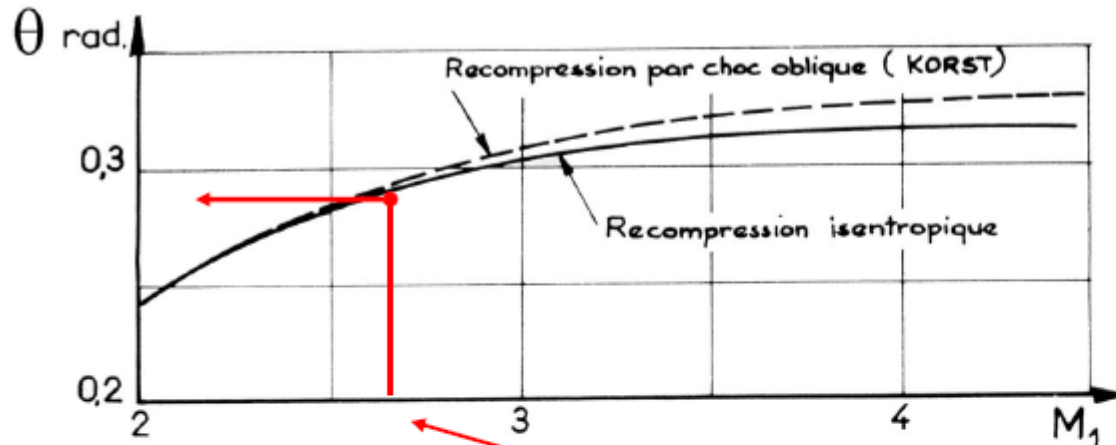
La vitesse sur la ligne de jet proportionnelle à KV_1

La recompression = choc oblique

$$\theta = \theta(M_1)$$

Critères de décollement (4)

➤ Résultats avec l'approche de Korst (1955)



$$0.65 < K < 0.70$$

Méthode de calcul

$$\omega_1 = \omega_0 - \theta_1 \longrightarrow M_1$$

$$\theta_1^{Korst} = f(M_1)$$

$$\theta_1^{Korst} \stackrel{?}{=} \theta_1$$