

COUCHES DE MÉLANGE COMPRESSIBLES ANALYSE DES DONNÉES ET MODÉLISATION

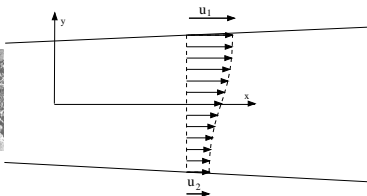
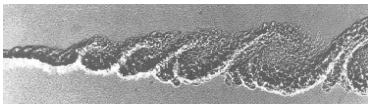
Bertrand AUPOIX & Hervé BÉZARD

B. Aupoix, *Modelling of Compressibility Effects in Mixing Layers* Journal of Turbulence 5, 2004
B. Aupoix, H. Bézard, *Compressible Mixing Layers: Data Analysis and Modelling* ERCOFTAC Bulletin 70, 2006

GdR Turbulence
15-17 Octobre 2012, Poitiers

COUCHE DE MÉLANGE

- Couche de mélange : deux écoulements parallèles, à vitesses différentes
- Très répandu
 - Atmosphère
 - Jets (mélange, combustion, SIR)



- Évolue rapidement vers état auto-similaire (moments)
- Auto-similitude :
$$\frac{u - u_2}{u_1 - u_2} = f\left(\frac{y}{\delta(x)}\right)$$
- Épaisseurs caractéristiques

$$\text{Visuelle} \quad \delta_{1\%} \quad \delta_{10\%} \quad \delta_S(\sqrt{0,1}; \sqrt{0,9}) \quad \delta_\omega = \frac{u_1 - u_2}{\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_{\max}}$$

- Taux de croissance (taux d'ouverture) :
$$\delta'_\omega = \frac{d\delta_\omega}{dx}$$

Taux de Croissance – INCOMPRESSIBLE

- Référentiel lié aux structures

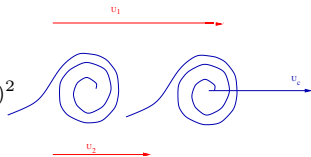
$$\frac{d\delta}{dt} \propto u_1 - u_2$$

- Référentiel fixe

$$\delta' \propto \frac{u_1 - u_2}{u_c}$$

- Équilibre au point d'arrêt (incompressible)

$$p_{\text{stag}} = p + \frac{1}{2} \rho_1 (u_1 - u_c)^2 = p + \frac{1}{2} \rho_2 (u_c - u_2)^2$$



- Vitesse de convection

$$u_c = u_1 \frac{1 + r\sqrt{s}}{1 + \sqrt{s}} \quad r = \frac{u_2}{u_1} \quad s = \frac{\rho_2}{\rho_1}$$

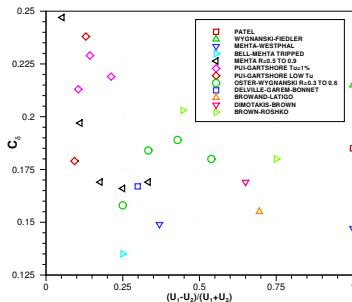
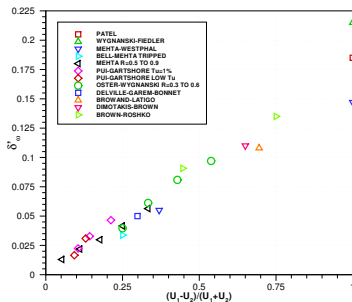
- Taux de croissance

$$\delta' = C_\delta \frac{(1-r)(1+\sqrt{s})}{2(1+r\sqrt{s})}$$

TAUX DE CROISSANCE – INCOMPRESSIBLE

- Taux de croissance

$$\delta' = C_{\delta} \frac{(1-r)(1+\sqrt{s})}{2(1+r\sqrt{s})} \quad r = \frac{u_2}{u_1} \quad s = \frac{\rho_2}{\rho_1}$$



- Amplificateur, sensible au bruit, aux conditions initiales. . .
- δ'_{ω} $C_{\delta_{\omega}} \approx 0,17 - 0,18$

Taux de Croissance – COMPRESSIBLE

- Équilibre au point d'arrêt $p_{\text{stag}} = p \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_c^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}$

- Même γ

$$M_{c1} = M_{c2} = \frac{u_1 - u_c}{a_1} = \frac{u_c - u_2}{a_2} \Rightarrow u_c = \frac{u_1 a_2 + u_2 a_1}{a_1 + a_2}$$

- Nombre de Mach convectif

$$M_c = M_{c1} = M_{c2} = \frac{u_1 - u_2}{a_1 + a_2}$$

- Taux de croissance

$$\delta' = C_\delta f(M_c) \frac{(1-r)(1+\sqrt{s})}{2(1+r\sqrt{s})}$$

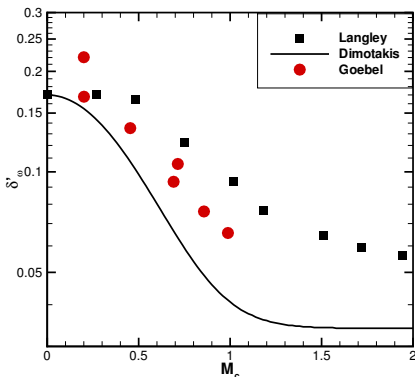
- Courbe "de Langley"

- Dimotakis

$$\frac{\delta'}{\delta'_0} = 0,8 \exp(-3M_c^2) + 0,2$$

TAUX DE CROISSANCE – COMPRESSIBLE

- Analyse des données expérimentales
- Comparer données différentes
- Suppose effet installation constant



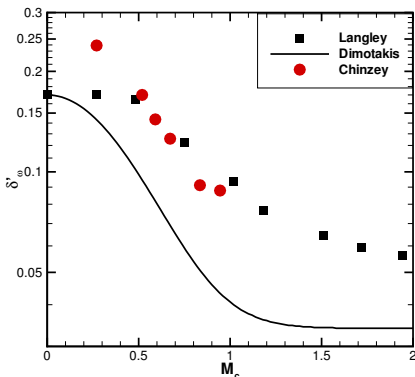
$$M_1 = 1,91 \rightarrow 2,35 \quad M_2 = 0,27 \rightarrow 1,39$$

$$s = 0,57 \rightarrow 1,55$$

Donnent $\delta_{10\%}$

TAUX DE CROISSANCE – COMPRESSIBLE

- Analyse des données expérimentales
- Comparer données différentes
- Suppose effet installation constant



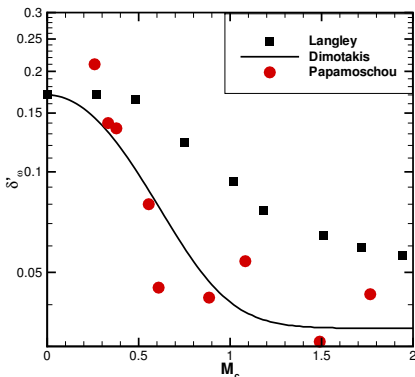
$M_1 = 2, 3$ $M_2 = 0 \rightarrow 1, 40$

Même T_i ; $s = 0, 5 \rightarrow 0, 7$

Donnent δ_S

TAUX DE CROISSANCE – COMPRESSIBLE

- Analyse des données expérimentales
- Comparer données différentes
- Suppose effet installation constant



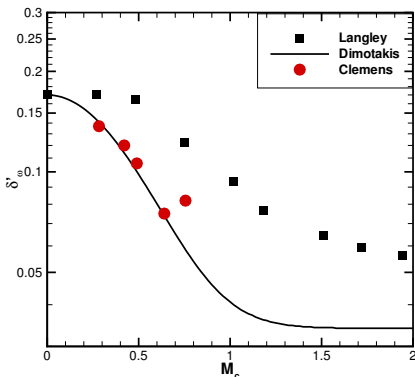
Ar, Ne, H_2

$s = 0, 24 \rightarrow 9, 20$

Donnent épaisseur Pitot $\approx 1, 4\delta_\omega$

Taux de Croissance – COMPRESSIBLE

- Analyse des données expérimentales
- Comparer données différentes
- Suppose effet installation constant



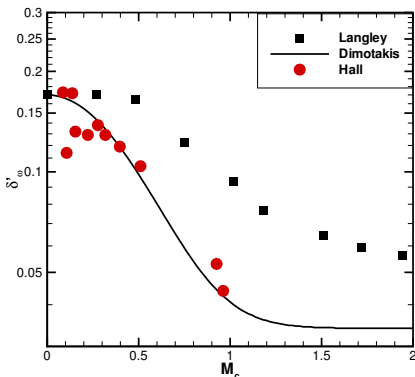
$$M_1 = 1,5 \rightarrow 2,2 \quad M_2 = 0,4 \rightarrow 0,91$$

$$s = 0,58 \rightarrow 0,77$$

Donnent épaisseur visuelle $\approx 1,8\delta_w$

Taux de Croissance – COMPRESSIBLE

- Analyse des données expérimentales
- Comparer données différentes
- Suppose effet installation constant

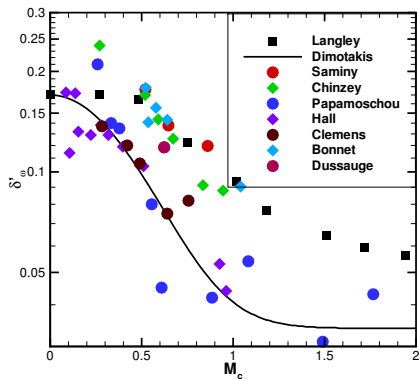


Ar, Ne, H_2

$s = 0,06 \rightarrow 5,95$

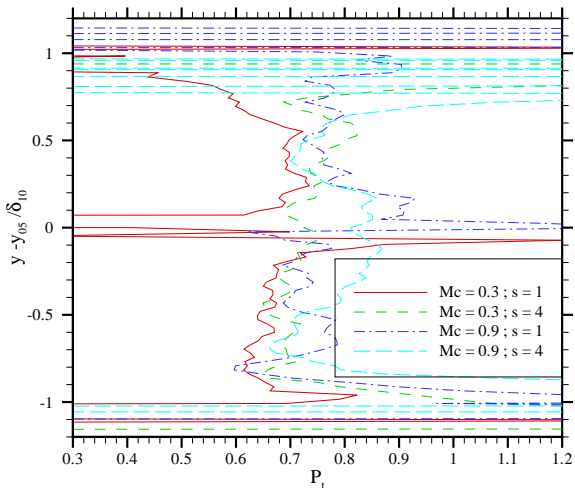
Donnent épaisseur visuelle $\approx 1,8\delta_\omega$

Taux de Croissance – COMPRESSIBLE



- Dimotakis plus crédible que Langley
- Plateau ?
- Slessor et al.

NOMBRE DE PRANDTL TURBULENT



- DNS (E. Lamballais)
- $P_t \approx 0,7$

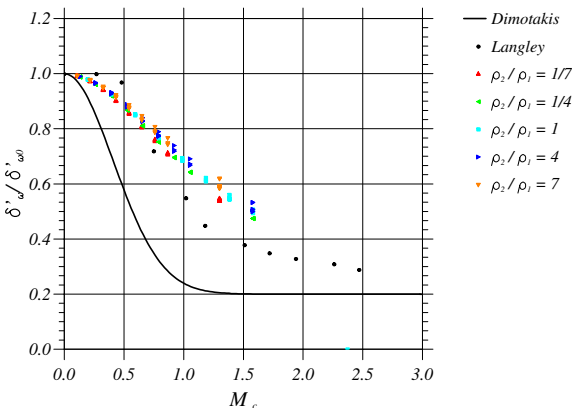
MODÉLISATION

Pourquoi y-a-t'il réduction du taux de croissance ?

- Analyse de stabilité : écoulement plus stable, passage de modes 2D à 3D
- Expériences, DNS : turbulence amortie, principalement $\widetilde{v''^2}$
- Changement de structure de la turbulence ?
- DNS
 - Contribution des "shocklets" négligeable
 - Réduction des fluctuations de pression, de la redistribution
- Cycle énergétique
 - Production de $\widetilde{u''^2}$: $-\widetilde{u''v''} \frac{\partial u}{\partial y}$
 - Production de $-\widetilde{u''v''}$: $\widetilde{v''^2} \frac{\partial u}{\partial y}$
 - Transfert d'énergie $\widetilde{u''^2} \rightarrow \widetilde{v''^2}$: **Redistribution**

MODÉLISATION – SARKAR

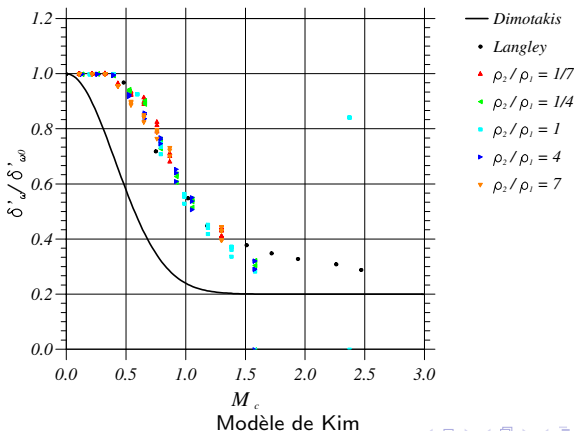
$$\varepsilon^d = \alpha_1 M_t^2 \varepsilon^s$$



DNS infirment le rôle de ε^d et $\langle p'd' \rangle$

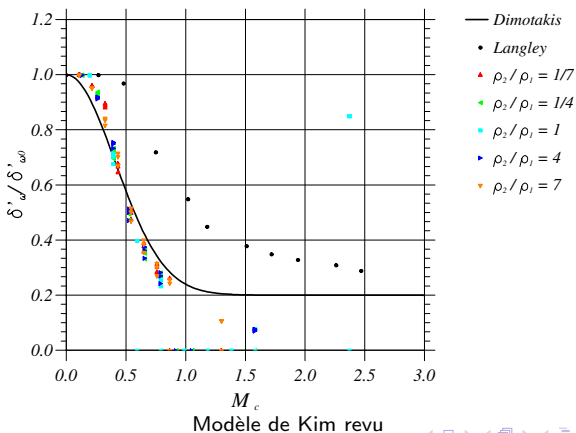
MODÉLISATION – KIM

- Breidenthal : sonic eddy
- Kim - Schéma de longueur de mélange : $\mu_t = \rho l^2 \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right| \quad l = C \delta_{1\%}$
- Limite : $u \left(x, y + \frac{c}{2} \right) - u \left(x, y - \frac{c}{2} \right) < 2c(x, y)$



MODÉLISATION – KIM

- Breidenthal : sonic eddy
- Kim - Schéma de longueur de mélange : $\mu_t = \rho l^2 \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right| \quad l = C\delta_{1\%}$
- Limite : $u\left(x, y + \frac{C}{2}\right) - u\left(x, y - \frac{C}{2}\right) < c(x, y)$



MODÉLISATION – EXTENSION DE KIM

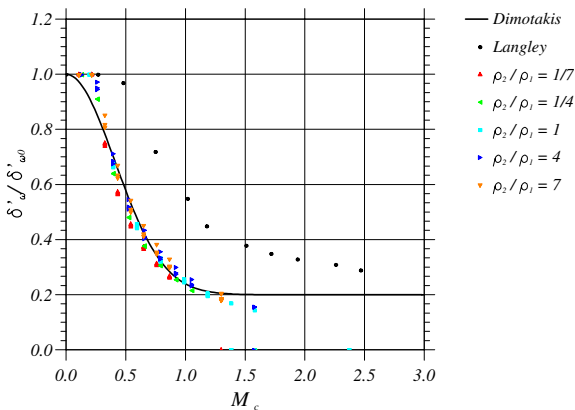
- Équation de transport pour l'échelle de longueur $l \propto \frac{k^{3/2}}{\varepsilon}$

$$\rho \frac{1}{l} \frac{Dl}{Dt} = \left(\frac{3}{2} - C_{\varepsilon_1} \right) \frac{P_k}{k} - \left(\frac{3}{2} - C_{\varepsilon_2} \right) \frac{\rho \varepsilon}{k} + \text{diff}$$

- Limiteur (actif si $l > l_0$) : $-\rho \frac{C}{\tau} \max \left(0; 1 - \frac{l_0}{l} \right)$
- Échelle de longueur limite $l_0 \propto \frac{c}{\frac{\partial u}{\partial y}} \Rightarrow \frac{l_0}{l} \propto \frac{c}{\frac{k^{3/2}}{\varepsilon} \frac{\partial u}{\partial y}} = \frac{1}{M_g}$
- Couche limite $M_g = \underbrace{(2a_1)^{3/2}}_{\approx 0,1643} \sqrt{\frac{\rho_p}{\rho} \frac{u_\tau}{c}}$ (ne s'active pas)
- Correction pour ε

$$\rho C_1 \max \left(0; 1 - C_2 \frac{c \varepsilon}{k^{3/2} \frac{\partial u}{\partial y}} \right) \frac{\varepsilon^2}{k} \quad C_1 = 0,9 \quad C_2 = 0,32$$

MODÉLISATION – EXTENSION DE KIM



- Coefficients optimisés pour le modèle $k - \varepsilon$ de Bézard
- Sans doute à retoucher légèrement pour d'autres modèles

CONCLUSIONS

- Effet du nombre de Mach convectif : réduction du taux de croissance
- Analyse des données : courbe de Dimotakis
- Concept de tourbillon sonique revu
- Étendu à modèles à équations de transport : nombre de Mach de gradient
- Préviation du nombre de Prandtl turbulent ?