

Séance 6 de MF2 :

Modélisation des écoulements turbulents

1 Rappels : équations de Reynolds. Modèles de fermeture

Décomposition de Reynolds

Équations et tenseur de Reynolds

Hypothèse de viscosité turbulente de Boussinesq

Modèle de longueur de mélange de Prandtl

2 Modèle $k - \varepsilon$

3 TD

Suite et fin du pb 5.1 *Turbulence en proche paroi*

ou « *Couche limite turbulente* »

↪ conditions limites pour les modèles de turbulence

<http://emmanuelplaut.perso.univ-lorraine.fr/mf>

Rappels : équations de Reynolds

Décomposition en **champs moyens** $\bar{\mathbf{V}} = \langle \bar{\mathbf{v}} \rangle$, $P = \langle p \rangle$ + **fluctuations** :

$$\bar{\mathbf{v}} = \bar{\mathbf{V}} + \bar{\mathbf{v}}', \quad p = P + p'$$

Moyenne de l'équation d'incompressibilité

$$\operatorname{div} \bar{\mathbf{v}} = 0 \quad \implies \quad \operatorname{div} \bar{\mathbf{V}} = 0. \quad (1)$$

Moyenne de l'équation de Navier-Stokes

$$\rho \left[\frac{\partial \bar{\mathbf{v}}}{\partial t} + \overline{\operatorname{div}(\bar{\mathbf{v}} \otimes \bar{\mathbf{v}})} \right] = - \bar{\nabla} p + \eta \bar{\Delta} \bar{\mathbf{v}}$$

\implies **équation de Reynolds**

$$\rho \left[\frac{\partial \bar{\mathbf{V}}}{\partial t} + \overline{\operatorname{div}(\bar{\mathbf{V}} \otimes \bar{\mathbf{V}})} \right] = - \bar{\nabla} P + \eta \bar{\Delta} \bar{\mathbf{V}} + \overline{\operatorname{div}(\bar{\bar{\tau}}^t)} \quad (2)$$

avec le **tenseur de Reynolds** $\bar{\bar{\tau}}^t = -\rho \langle \bar{\mathbf{v}}' \otimes \bar{\mathbf{v}}' \rangle$

$$\tau_{xx}^t = -\rho \langle v_x' v_x' \rangle \text{ est } -\rho \times \text{la variance de } v_x'$$

$$\tau_{xy}^t = -\rho \langle v_x' v_y' \rangle \text{ est } -\rho \times \text{la covariance de } v_x' \text{ et } v_y'$$

Rappels : équations de Reynolds

Décomposition en **champs moyens** $\bar{\mathbf{V}} = \langle \bar{\mathbf{v}} \rangle$, $P = \langle p \rangle$ + **fluctuations** :

$$\bar{\mathbf{v}} = \bar{\mathbf{V}} + \bar{\mathbf{v}}', \quad p = \hat{p} = P + p'$$

Moyenne de l'équation d'incompressibilité

$$\operatorname{div} \bar{\mathbf{v}} = 0 \quad \Longrightarrow \quad \operatorname{div} \bar{\mathbf{V}} = 0. \quad (1)$$

Moyenne de l'équation de Navier-Stokes

$$\rho \left[\frac{\partial \bar{\mathbf{v}}}{\partial t} + \overline{\operatorname{div}(\bar{\mathbf{v}} \otimes \bar{\mathbf{v}})} \right] = - \bar{\nabla} p + \eta \bar{\Delta} \bar{\mathbf{v}}$$

\Longrightarrow **équation de Reynolds**

$$\rho \left[\frac{\partial \bar{\mathbf{V}}}{\partial t} + (\bar{\mathbf{V}} \cdot \bar{\nabla}) \bar{\mathbf{V}} \right] = - \bar{\nabla} P + \eta \bar{\Delta} \bar{\mathbf{V}} + \overline{\operatorname{div}(\bar{\bar{\tau}}^t)} \quad (2)$$

avec le **tenseur de Reynolds** $\bar{\bar{\tau}}^t = -\rho \langle \bar{\mathbf{v}}' \otimes \bar{\mathbf{v}}' \rangle$.

Dans l'équation des moments d'ordre 1

apparaissent des **moments d'ordre 2...** inconnus !?

Modèle de Boussinesq du tenseur de Reynolds

$$\overline{\overline{\tau}}^t = -\rho \langle \overline{\mathbf{v}}' \otimes \overline{\mathbf{v}}' \rangle$$

- Écriture en partie sphérique + déviateur de trace nulle :

$$\overline{\overline{\tau}}^t = \overline{\overline{\tau}}_{\text{iso}}^t + \overline{\overline{\tau}}_{\text{déviateur}}^t = \alpha \overline{\mathbf{1}} + \overline{\overline{\tau}}_{\text{déviateur}}^t$$

- Identification de la trace :

$$\text{tr} \overline{\overline{\tau}}^t = -2\rho k \quad \text{avec} \quad k(\overline{\mathbf{x}}, t) = \frac{1}{2} \langle \overline{\mathbf{v}}'(\overline{\mathbf{x}}, t) \cdot \overline{\mathbf{v}}'(\overline{\mathbf{x}}, t) \rangle = \frac{1}{2} \langle v_i'(\overline{\mathbf{x}}, t) v_i'(\overline{\mathbf{x}}, t) \rangle$$

l'énergie cinétique turbulente moyenne,

$$\text{tr} \overline{\overline{\tau}}^t = \text{tr} \overline{\overline{\tau}}_{\text{iso}}^t = 3\alpha \implies \alpha = -\frac{2}{3}\rho k$$

- Déviateur proport. au tenseur des taux de déformat^o de l'écoulement moyen, qui dicterait toute anisotropie :

$$\overline{\overline{\tau}}_{\text{déviateur}}^t = 2\eta^t \overline{\overline{\mathbf{D}}}(\overline{\mathbf{V}})$$

avec η^t la **viscosité turbulente**.

Modèle de Boussinesq du tenseur de Reynolds

$$\overline{\tau}^t = -\frac{2}{3}\rho k \overline{\mathbf{1}} + 2\eta^t \overline{\mathbf{D}}(\overline{\mathbf{V}})$$

Injection dans l'équation de Reynolds

⇒ équation de Reynolds - Boussinesq :

$$\rho \left[\frac{\partial \overline{\mathbf{V}}}{\partial t} + (\overline{\mathbf{V}} \cdot \nabla) \overline{\mathbf{V}} \right] = -\nabla \left(P + \frac{2}{3}\rho k \right) + 2 \overline{\mathbf{div}} \left[(\eta + \eta^t) \overline{\mathbf{D}}(\overline{\mathbf{V}}) \right] \quad (2)$$

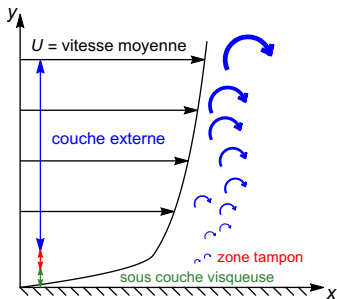
- $\frac{2}{3}\rho k =$ **terme de « Bernoulli » turbulent** augmentant la pression P
- $\eta^t =$ **viscosité turbulente** qui **augmente** la viscosité moléculaire η , car la **diffusion turbulente augmente** les effets de la diffusion moléculaire !

Modèle de **longueur de mélange** de Prandtl si **écoulement fortement cisailé** :

$$\eta^t = \rho \ell_m^2 \left| \frac{\partial V_1}{\partial x_2} \right|$$

avec ℓ_m la **longueur de mélange** à définir !

Exemple d'écoulement fortement cisailé : la « couche limite turbulente » étudiée dans le pb. 5.1 !..



$$\bar{\mathbf{V}} = U(y) \bar{\mathbf{e}}_x \quad \Longrightarrow \quad \overline{\nabla(\bar{\mathbf{V}})} = \frac{dU}{dy} \bar{\mathbf{e}}_x \otimes \bar{\mathbf{e}}_y$$

$$\eta^t = \rho \ell_m^2 \frac{dU}{dy} \dots$$

Critiques de l'approche de Reynolds - Boussinesq - Prandtl

- Que fait-on si l'écoulement moyen n'est pas fortement cisailé ?
- Comment de toute façon définir la longueur de mélange ℓ_m si la géométrie de l'écoulement - du domaine fluide est complexe ?
- La **turbulence** n'est caractérisée que par la viscosité turbulente η^t , cependant son lien avec des quantités comme l'énergie cinétique turbulente moyenne k est « flou » !..

Modèle plus sophistiqué et riche : modèle $k - \varepsilon$

On veut calculer deux quantités qui caractérisent l'**état de turbulence local** :

- l'**énergie cinétique turbulente moyenne**

$$k(\bar{\mathbf{x}}, t) = \frac{1}{2} \langle \bar{\mathbf{v}}'(\bar{\mathbf{x}}, t) \cdot \bar{\mathbf{v}}'(\bar{\mathbf{x}}, t) \rangle = \frac{1}{2} \langle v_i'(\bar{\mathbf{x}}, t) v_i'(\bar{\mathbf{x}}, t) \rangle$$

- la **pseudo-dissipation turbulente massique moyenne**

$$\varepsilon(\bar{\mathbf{x}}, t) = \nu \left\langle \overline{\overline{\nabla \mathbf{v}}'(\bar{\mathbf{x}}, t)} : \overline{\overline{\nabla \mathbf{v}}'(\bar{\mathbf{x}}, t)}^T \right\rangle = \nu \left\langle \frac{\partial v_i'(\bar{\mathbf{x}}, t)}{\partial x_j} \frac{\partial v_i'(\bar{\mathbf{x}}, t)}{\partial x_j} \right\rangle$$

dont on a vu qu'elle est « liée » à la **dissipation turbulente massique moyenne** ϵ

Principe : la **viscosité turbulente** $\eta^t = \rho \nu^t$ dépend de ces 2 quantités seulement

$$\nu^t = \nu^t(k, \varepsilon) = C_\nu k^\alpha \varepsilon^\beta = C_\nu k^2 \varepsilon^{-1}$$

puisque $\nu^t \equiv \ell^2 t^{-1}$, $k \equiv \ell^2 t^{-2}$, $\varepsilon \equiv \ell^2 t^{-3}$.

Équation d'évolution pour k

Un calcul (notamment tensoriel) montre que

$$\frac{\partial k}{\partial t} + V_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{1}{\rho} \langle \rho' v_j' \rangle + \frac{1}{2} \langle v_i' v_i' v_j' \rangle \right) + \frac{\partial V_i}{\partial x_j} \frac{\tau_{ij}^t}{\rho} - \varepsilon.$$

- Injection du modèle de Boussinesq $\rho^{-1} \tau_{ij}^t = -\frac{2}{3} k \delta_{ij} + 2\nu^t D_{ij}(\bar{\mathbf{V}})$

$$\implies P = \frac{\partial V_i}{\partial x_j} \frac{\tau_{ij}^t}{\rho} = 2\nu^t \frac{\partial V_i}{\partial x_j} D_{ij}(\bar{\mathbf{V}})$$

$$\frac{\partial V_i}{\partial x_j} \frac{\tau_{ij}^t}{\rho} = 2\nu^t D_{ij}(\bar{\mathbf{V}}) D_{ij}(\bar{\mathbf{V}}) + 2\nu^t \omega_{ij}(\bar{\mathbf{V}}) D_{ij}(\bar{\mathbf{V}})$$

$$P = \frac{\partial V_i}{\partial x_j} \frac{\tau_{ij}^t}{\rho} = 2\nu^t D_{ij}(\bar{\mathbf{V}}) D_{ij}(\bar{\mathbf{V}})$$

terme > 0 , les gradients de l'écoulement moyen **créent la turbulence**,
 terme $P =$ **terme de « production »**.

Équation d'évolution pour k

Un calcul (notamment tensoriel) montre que

$$\frac{\partial k}{\partial t} + V_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{1}{\rho} \langle p' v_j' \rangle + \frac{1}{2} \langle v_i' v_i' v_j' \rangle \right) + 2\nu^t \frac{\partial V_i}{\partial x_j} D_{ij}(\bar{\mathbf{V}}) - \varepsilon.$$

- Dans l'éq. de moments d'ordre 2 apparaissent **des moments d'ordre 3**.

Nécessité de **modéliser ces moments d'ordre supérieur** :

$$-\frac{1}{\rho} \langle p' v_j' \rangle - \frac{1}{2} \langle v_i' v_i' v_j' \rangle = \frac{\nu^t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j}$$

$$\implies \frac{\partial k}{\partial t} + V_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu^t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2\nu^t \frac{\partial V_i}{\partial x_j} D_{ij}(\bar{\mathbf{V}}) - \varepsilon.$$

Modèle $k - \varepsilon$ Équation d'évolution modélisée de k :

$$\frac{\partial k}{\partial t} + V_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu^t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2\nu^t \frac{\partial V_i}{\partial x_j} D_{ij}(\bar{\mathbf{V}}) - \varepsilon \quad (3)$$

Équation d'évolution modélisée de ε , par analogie et analyse dimensionnelle :

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + V_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu^t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + 2C_1 \nu^t \frac{\varepsilon}{k} \frac{\partial V_i}{\partial x_j} D_{ij}(\bar{\mathbf{V}}) - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

Viscosité turbulente :

$$\nu^t = \nu^t(k, \varepsilon) = C_\nu k^2 \varepsilon^{-1} \quad (5)$$

Constantes adimensionnelles du modèle

$$\sigma_k, \sigma_\varepsilon, C_\nu, C_1, C_2$$

ajustées grâce à des expériences...

Calage des coefficients du modèle $k - \varepsilon$

- (Ex 5.4) Turbulence de grille \rightarrow

$$C_2 = \dots$$

- Couche de mélange en expansion \rightarrow

$$\frac{C_2 - 1}{C_1 - 1} = \frac{P}{\varepsilon} = \frac{\text{production}}{\text{dissipation}} \rightarrow C_1 = \dots$$

- (Pb. 5.1) Couche limite turbulente \rightarrow

$$C_\nu = \dots$$

$$\sigma_\varepsilon = \dots$$

- A priori ou par « simplicité », $\sigma_k = 1...$

$$\Rightarrow$$

Coefficient	σ_k	σ_ε	C_1	C_2	C_ν
Valeur « universelle » (?) standard	1	1,3	1,44	1,92	0,09

[Launder & Spalding 1974 The numerical computation of turbulent flows.
Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.]

Modèle $k - \varepsilon$

Généralisation des équations de Navier-Stokes incluant des **effets de turbulence** :

$$\operatorname{div} \bar{\mathbf{V}} = 0, \quad (1)$$

$$\rho \left[\frac{\partial \bar{\mathbf{V}}}{\partial t} + \left(\overline{\nabla \mathbf{V}} \right) \cdot \bar{\mathbf{V}} \right] = - \bar{\nabla} P - \frac{2}{3} \rho \bar{\nabla} k + 2 \operatorname{div} \left[(\eta + \eta^t) \bar{\bar{\mathbf{D}}}(\bar{\mathbf{V}}) \right], \quad (2)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \left(\bar{\nabla} k \right) \cdot \bar{\mathbf{V}} = \operatorname{div} \left[\left(\nu + \frac{\nu^t}{\sigma_k} \right) \bar{\nabla} k \right] + 2 \nu^t \overline{\nabla \mathbf{V}} : \bar{\bar{\mathbf{D}}}(\bar{\mathbf{V}}) - \varepsilon, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \left(\bar{\nabla} \varepsilon \right) \cdot \bar{\mathbf{V}} = \operatorname{div} \left[\left(\nu + \frac{\nu^t}{\sigma_\varepsilon} \right) \bar{\nabla} \varepsilon \right] + 2 C_1 \nu^t \frac{\varepsilon}{k} \overline{\nabla \mathbf{V}} : \bar{\bar{\mathbf{D}}}(\bar{\mathbf{V}}) - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (4)$$

$$\nu^t = C_\nu k^2 \varepsilon^{-1}. \quad (5)$$

Il faut résoudre maintenant un système type « Navier-Stokes » (1), (2) mais aussi 2 EDP supplémentaires (3), (4) pour calculer k et ε !

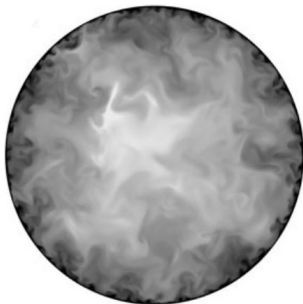
Qu'y gagne t'on ?

Modèle $k - \varepsilon$

Il faut résoudre maintenant un système type « Navier-Stokes » (1), (2)
mais aussi 2 EDP supplémentaires (3), (4) pour calculer k et ε !

Qu'y gagne t'on ? De ne calculer que des **champs moyens** + « doux » !

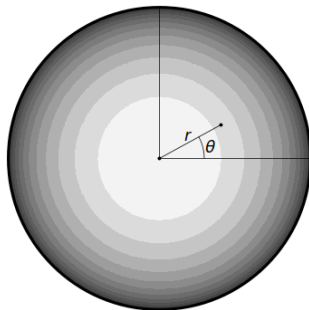
Vitesse axiale totale
dans éc. en tuyau turbulent :



$$v_z = V_z(r) + v'_z(r, \theta, z, t)$$

[El Khoury et al. 2013 *FTC*]

Vitesse axiale moyenne
dans éc. en tuyau turbulent :



$$V_z = V_z(r)$$

[Gisselbrecht & Plaut 2015 *CFM*]

Modèle $k - \varepsilon$

Généralisation des équations de Navier-Stokes incluant des **effets de turbulence** :

$$\operatorname{div} \bar{\mathbf{V}} = 0, \quad (1)$$

$$\rho \left[\frac{\partial \bar{\mathbf{V}}}{\partial t} + (\overline{\nabla \mathbf{V}}) \cdot \bar{\mathbf{V}} \right] = - \nabla \hat{P} - \frac{2}{3} \rho \nabla k + 2 \operatorname{div} [(\eta + \eta^t) \overline{\mathbf{D}}(\bar{\mathbf{V}})], \quad (2)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + (\nabla k) \cdot \bar{\mathbf{V}} = \operatorname{div} \left[\left(\nu + \frac{\nu^t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + 2\nu^t \overline{\nabla \mathbf{V}} : \overline{\mathbf{D}}(\bar{\mathbf{V}}) - \varepsilon, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + (\nabla \varepsilon) \cdot \bar{\mathbf{V}} = \operatorname{div} \left[\left(\nu + \frac{\nu^t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + 2C_1 \nu^t \frac{\varepsilon}{k} \overline{\nabla \mathbf{V}} : \overline{\mathbf{D}}(\bar{\mathbf{V}}) - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (4)$$

$$\nu^t = C_\nu k^2 \varepsilon^{-1}. \quad (5)$$

ODG des **effets de turbulence** ?

Estimations en **turbulence homogène isotrope** « à la Kolmogorov » :

$$k \sim v^2, \quad \varepsilon \sim v^3 \ell^{-1} \quad \Longrightarrow \quad \frac{\eta^t}{\eta} = \frac{\nu^t}{\nu} \sim \frac{v \ell}{\nu}, \quad \frac{\rho \overline{\nabla k}}{\eta \overline{\Delta \mathbf{V}}} \sim \frac{v \ell}{\nu}.$$

Modèle $k - \varepsilon$

Généralisation des équations de Navier-Stokes incluant des effets de turbulence :

$$\operatorname{div} \bar{\mathbf{V}} = 0, \quad (1)$$

$$\rho \left[\frac{\partial \bar{\mathbf{V}}}{\partial t} + (\overline{\nabla \mathbf{V}}) \cdot \bar{\mathbf{V}} \right] = - \bar{\nabla} P - \frac{2}{3} \rho \bar{\nabla} k + 2 \operatorname{div} [(\eta + \eta^t) \bar{\mathbf{D}}(\bar{\mathbf{V}})], \quad (2)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + (\bar{\nabla} k) \cdot \bar{\mathbf{V}} = \operatorname{div} \left[\left(\nu + \frac{\nu^t}{\sigma_k} \right) \bar{\nabla} k \right] + 2 \nu^t \overline{\nabla \mathbf{V}} : \bar{\mathbf{D}}(\bar{\mathbf{V}}) - \varepsilon, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + (\bar{\nabla} \varepsilon) \cdot \bar{\mathbf{V}} = \operatorname{div} \left[\left(\nu + \frac{\nu^t}{\sigma_\varepsilon} \right) \bar{\nabla} \varepsilon \right] + 2 C_1 \nu^t \frac{\varepsilon}{k} \overline{\nabla \mathbf{V}} : \bar{\mathbf{D}}(\bar{\mathbf{V}}) - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (4)$$

$$\nu^t = C_\nu k^2 \varepsilon^{-1}. \quad (5)$$

« Nombre de Reynolds turbulent »

$$Re^t = \frac{\eta^t}{\eta} = \frac{\nu^t}{\nu}.$$

Modèle $k - \varepsilon$

Généralisation des équations de Navier-Stokes incluant des **effets de turbulence** :

$$\operatorname{div} \bar{\mathbf{V}} = 0, \quad (1)$$

$$\rho \left[\frac{\partial \bar{\mathbf{V}}}{\partial t} + (\overline{\nabla \mathbf{V}}) \cdot \bar{\mathbf{V}} \right] = - \bar{\nabla} P - \frac{2}{3} \rho \bar{\nabla} k + 2 \operatorname{div} [(\eta + \eta^t) \bar{\mathbf{D}}(\bar{\mathbf{V}})], \quad (2)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + (\bar{\nabla} k) \cdot \bar{\mathbf{V}} = \operatorname{div} \left[\left(\nu + \frac{\nu^t}{\sigma_k} \right) \bar{\nabla} k \right] + 2\nu^t \overline{\nabla \mathbf{V}} : \bar{\mathbf{D}}(\bar{\mathbf{V}}) - \varepsilon, \quad (3)$$

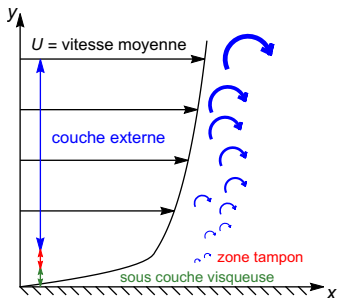
$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + (\bar{\nabla} \varepsilon) \cdot \bar{\mathbf{V}} = \operatorname{div} \left[\left(\nu + \frac{\nu^t}{\sigma_\varepsilon} \right) \bar{\nabla} \varepsilon \right] + 2C_1 \nu^t \frac{\varepsilon}{k} \overline{\nabla \mathbf{V}} : \bar{\mathbf{D}}(\bar{\mathbf{V}}) - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (4)$$

$$\nu^t = C_\nu k^2 \varepsilon^{-1}. \quad (5)$$

Conditions limites sur une paroi ?

Ne pas aller jusqu'à la paroi (où (4) pose problème, $k \rightarrow 0$ par adhérence !), mais, par exemple, utiliser des **lois de paroi** près de la paroi, cf. le pb 5.1.

TD : Pb. 5.1 Couche limite turbulente



$$\bar{\mathbf{V}} = U(y) \bar{\mathbf{e}}_x \implies \overline{\nabla}(\bar{\mathbf{V}}) = \frac{dU}{dy} \bar{\mathbf{e}}_x \otimes \bar{\mathbf{e}}_y$$

Fin de la partie 1 : modèle de Prandtl,

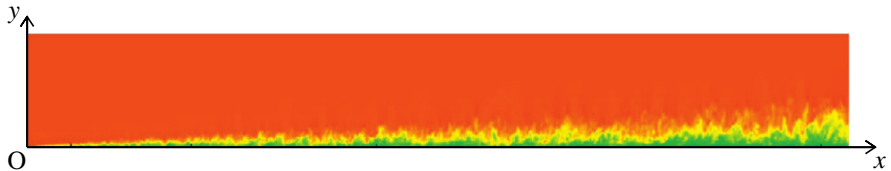
$$\eta^t = \rho \ell_m^2 \frac{dU}{dy}, \quad \ell_m = \dots$$

\implies loi pour $U(y)$ en **couche externe**, en fonction de c^{tes} inconnues χ et C .

TD : Pb. 5.1 Couche limite turbulente

Partie 2 : « fouille » avec **Matlab**

dans la **base de données de simulations numériques** réalisées à KTH



⇒ mesures de χ et C

détermination des limites (approximatives) des

- **couche externe**
- **zone tampon**
- **sous couche visqueuse...**

[Eitel-Amor et al. 2014

Simulation and validation of a spatially evolving turbulent boundary layer...

Int. J. Heat Fluid Flow]

TD : Pb. 5.1 Couche limite turbulente

Partie 3 : application du modèle $k - \varepsilon$ en **couche externe**

⇒ détermination de « lois de paroi » pour k et ε

⇒ relations contraignant les valeurs des coefficients du modèle...

Chargé de TD	Salle
Mathieu Jenny	P303-305
Hervé Combeau	P306
Jean-Sébastien Kroll-Rabotin	P304

<http://emmanuelplaut.perso.univ-lorraine.fr/mf>