

**Modélisation de la turbulence en situation instationnaire
par approches URANS et hybride RANS-LES.
Prise en compte des effets de paroi par pondération elliptique.**

ATABAK FADAI-GHOTBI

Laboratoire d'Etudes Aérodynamiques

UMR 6609 CNRS/Université de Poitiers/ENSMA, France

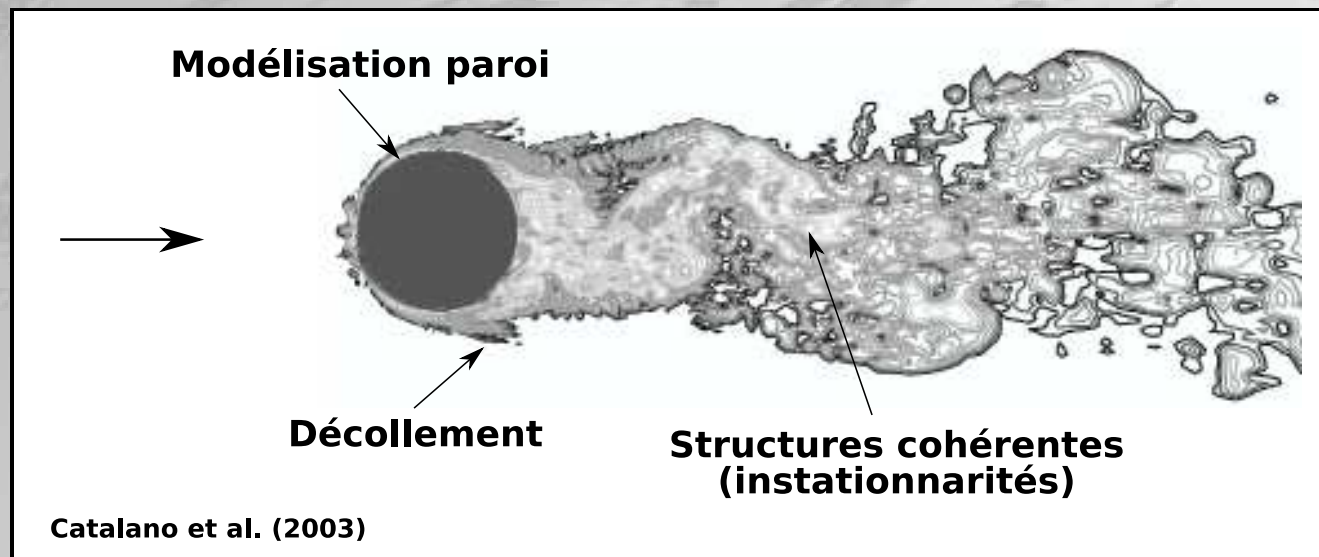
Jury :

M. Roland Schiestel, Directeur de Recherche CNRS, IRPHE, Marseille	Rapporteur
M. Patrick Chassaing, Professeur INPT-ENSEEIH, Toulouse	Rapporteur
M. Thomas Gatski, Directeur de Recherche CNRS, LEA, Poitiers	Examineur
M. Alexis Scotto d'Apollonia, Ingénieur PSA Peugeot Citroën, Vélizy	Examineur
M. Sylvain Lardeau, Chercheur Imperial College, Londres	Examineur
M. Jacques Borée, Professeur ENSMA, Poitiers	Examineur
M. Rémi Manceau, Chargé de Recherche CNRS, LEA, Poitiers	Examineur

Directeurs de thèse : Rémi Manceau & Jacques Borée

Introduction

- Turbulence : 3D, instationnaire, non-linéaire, chaotique, large gamme d'échelles spatio-temporelles \implies modèles statistiques (RANS) calibrés en écoulements académiques pour donner la solution moyenne \implies approche insuffisante
- Cadre de l'étude : écoulement turbulent à grand Re , stationnaire en moyenne + instationnarités naturelles + présence de parois



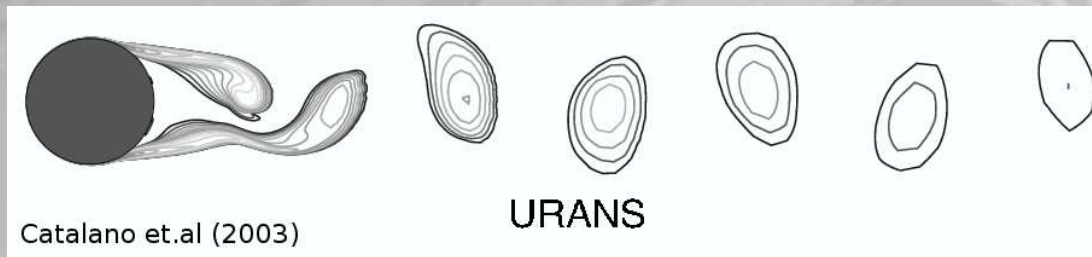
- Structure cohérente (SC) : structure organisée à grande échelle + temps de vie long devant l'agitation à petite échelle + déterministe + prédictible
 \implies différencier SC/turbulence de fond + extraire SC (infos instationnaires)

- Informations instationnaires cruciales en industrie :
 - ⇒ interaction fluide/structure, fatigue thermique, résonance, bruit, ...
 - ⇒ prédiction des fréquences caractéristiques et de l'énergie des structures dominantes
- Trois axes principaux de simulation :

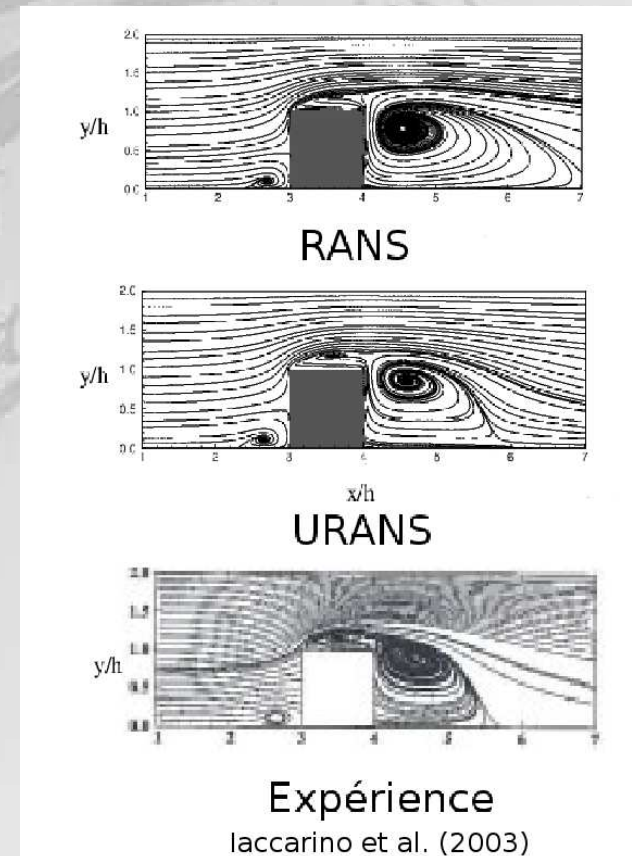
<i>Nom</i>	<i>Avantage</i>	<i>Inconvénient</i>
DNS	Solution instationnaire	Coût CPU élevé
LES	Solution instationnaire	Coût CPU élevé si paroi
RANS	Coût CPU faible	Solution stationnaire

- Problème de modélisation avec les modèles classiques RANS
 - considèrent que la turbulence est aléatoire
 - 1 seule échelle temporelle (turbulence en équilibre)
- Multitude d'approches instationnaires à faible coût, situées entre RANS et LES :
 - hybrides RANS-LES : VLES, LNS, DES, PANS, PITM, ...
 - autres approches : OES, SAS, URANS, ...

- URANS : résolution des équations RANS + $\partial/\partial t \implies$ quelle décomposition des grandeurs instantanées ?
- Franke & Rodi 1993, Iaccarino *et al.* 2003, Paik *et al.* 2004, ... :
 - capable de donner les fréquences caractéristiques à faible coût
 - meilleure prédiction des quantités moyennes



\implies URANS très répandu dans l'industrie



Objectifs

- Prendre en compte les instationnarités à grande échelle dans les écoulements décollés et à plus faible coût que la LES
 - ⇒ approches URANS et hybride RANS-LES :
 - quelles limitations ?
 - dépendance de la solution au modèle et au numérique (maillage, Δt , schémas numériques) ?
- Modéliser les effets de paroi par un modèle statistique aux tensions de Reynolds sans fonctions d'amortissement + coût de calcul raisonnable
 - ⇒ modèle EB-RSM (*Elliptic Blending Reynolds Stress Model*)
(Manceau & Hanjalić 2002, Manceau 2005)

Plan de l'exposé

- Code CFD et méthodes numériques
- Modélisation des effets de paroi
 - Présentation du modèle EB-RSM
 - Validation en canal
- Méthodologie URANS
 - Décomposition du champ instantané
 - Application à la marche descendante
- Modèle hybride RANS-LES
 - Formalisme du filtrage
 - Modèle PITM et T-PITM
 - Développement d'un modèle hybride à pondération elliptique
 - Résultats en canal
- Conclusions générales & perspectives

Plan de l'exposé

- Code CFD et méthodes numériques
- Modélisation des effets de paroi
 - Présentation du modèle EB-RSM
 - Validation en canal
- Méthodologie URANS
 - Décomposition du champ instantané
 - Application à la marche descendante
- Modèle hybride RANS-LES
 - Formalisme du filtrage
 - Modèle PITM et T-PITM
 - Développement d'un modèle hybride à pondération elliptique
 - Résultats en canal
- Conclusions générales & perspectives

Code CFD et méthodes numériques

- *Code_Saturne* :
 - Code industriel parallélisé développé par EDF (Archambeau *et al.* 2004)
 - Volumes finis, maillage structuré/non-structuré, variables colocalisées au centre de gravité des cellules
 - Etape vitesse/pression : algorithme SIMPLEC
 - Schéma temporel : Euler implicite ou Crank-Nicolson
 - Schéma spatial (termes convectifs) : décentré amont (UDS) ou centré (CDS)
 - Modèles de turbulence : $k-\varepsilon$ ou LRR avec lois de paroi
- Nécessité d'implémenter et de valider un modèle de proche paroi

Plan de l'exposé

- Code CFD et méthodes numériques
- **Modélisation des effets de paroi**
 - Présentation du modèle EB-RSM
 - Validation en canal
- Méthodologie URANS
 - Décomposition du champ instantané
 - Application à la marche descendante
- Modèle hybride RANS-LES
 - Formalisme du filtrage
 - Modèle PITM et T-PITM
 - Développement d'un modèle hybride à pondération elliptique
 - Résultats en canal
- Conclusions générales & perspectives

Présentation du modèle EB-RSM

(Manceau & Hanjalić 2002, Manceau 2005)

- Hypothèses fortes des modèles classiques (quasi-homogénéité de la vitesse et localité de la pression) + fonctions d'amortissement + validité en instationnaire ?
- Modèle de paroi plus universel \implies relaxation elliptique (Durbin 1991)
- Décomposition RANS : $U_i^* = U_i(\mathbf{x}) + u_i(\mathbf{x}, t)$
 $U_i(\mathbf{x}) =$ moyenne d'ensemble = moyenne temporelle (ergodicité)
- La résolution du champ moyen nécessite un modèle pour $R_{ij} = \overline{u_i u_j}$

$$\frac{DR_{ij}}{Dt} = D_{ij}^\nu + D_{ij}^T + \phi_{ij} + P_{ij} - \varepsilon_{ij} \quad (1)$$

$$\rho \phi_{ij} = -\overline{u_i \frac{\partial p}{\partial x_j}} - \overline{u_j \frac{\partial p}{\partial x_i}} \quad (\text{terme de pression}) \quad (2)$$

- Effet de blocage de la paroi : inviscide et non-local \implies théorie de la relaxation elliptique : 6 équations supplémentaires à résoudre pour ϕ_{ij} et numériquement instable

L'EB-RSM pondère les variables en proche paroi et en zone lointaine selon :

$$\phi_{ij} = (1 - \alpha^2)\phi_{ij}^w + \alpha^2\phi_{ij}^h \quad (3)$$

Equation elliptique sur α pour préserver la non-localité des effets de pression :

$$\boxed{\alpha - L^2 \nabla^2 \alpha = 1} \quad (4)$$

$$L = C_L \max \left(\frac{k^{3/2}}{\varepsilon}, C_\eta \frac{\nu^{3/4}}{\varepsilon^{1/4}} \right) \quad (5)$$

Comportement asymptotique à la paroi :

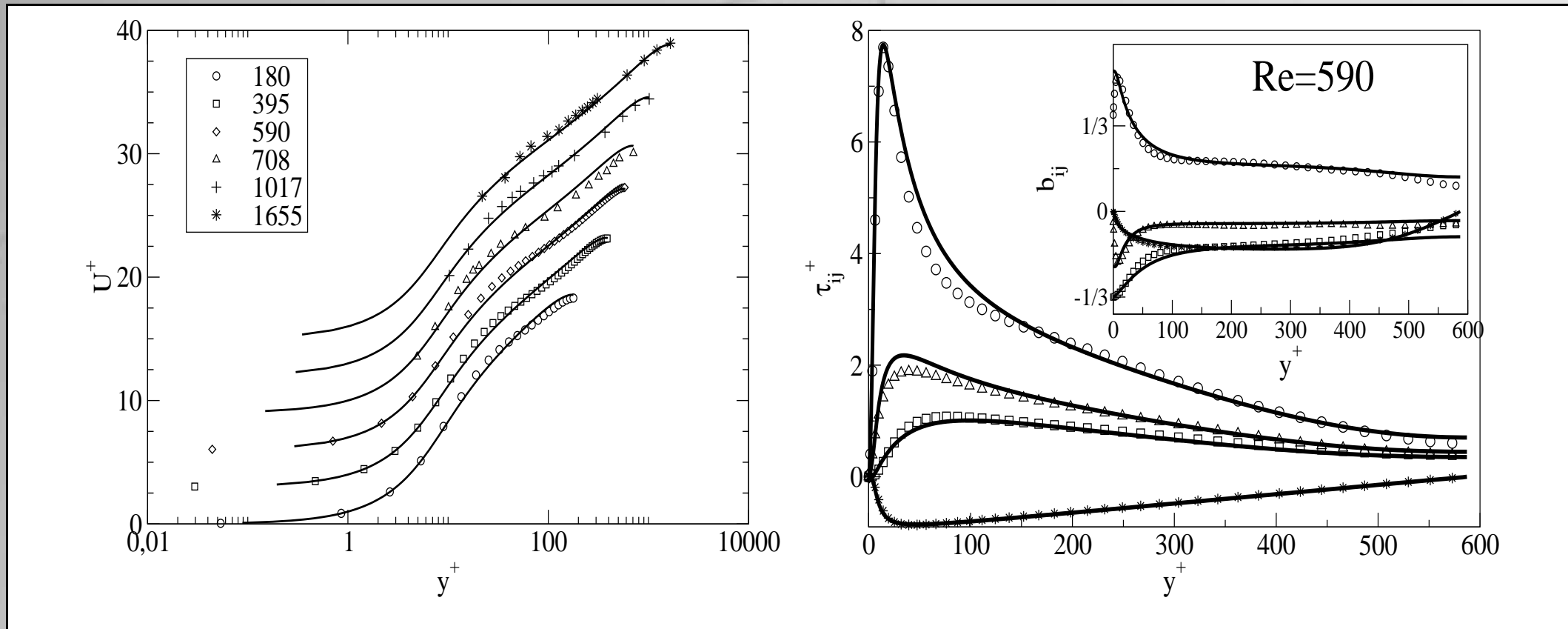
$$\phi_{ij}^w = -5 \frac{\varepsilon}{k} \left(R_{ik} n_j n_k + R_{jk} n_i n_k - \frac{1}{2} R_{kl} n_k n_l (n_i n_j + \delta_{ij}) \right) \quad \text{où} \quad \mathbf{n} = \frac{\nabla \alpha}{\|\nabla \alpha\|} \quad (6)$$

Modèle SSG pour ϕ_{ij}^h (Speziale *et al.* 1991). Modèle EB-RSM :

- pas de dépendance explicite en la distance à la paroi \implies applicable à des géométries complexes
- valable en instationnaire (même comportement asymptotique + effet non-local)
- simple à implémenter dans un code RSM pré-existant + robuste

Validation en canal

DNS de Moser *et al.* 1999. Expérience de Wei & Willmarth 1989.



- Bonne prédiction du débit en fonction de Re_τ
- Prédiction de l'anisotropie : valeur exacte de b_{22} à la paroi (limite à $2C$)

Plan de l'exposé

- Code CFD et méthodes numériques
- Modélisation des effets de paroi
 - Présentation du modèle EB-RSM
 - Validation en canal
- **Méthodologie URANS**
 - Décomposition du champ instantané
 - Application à la marche descendante
- Modèle hybride RANS-LES
 - Formalisme du filtrage
 - Modèle PITM et T-PITM
 - Développement d'un modèle hybride à pondération elliptique
 - Résultats en canal
- Conclusions générales & perspectives

Méthodologie URANS

Cadre : écoulement statistiquement stationnaire + instationnarités naturelles

$$\text{Décomposition RANS : } U_i^* = \underbrace{U_i(\mathbf{x})}_{\text{moyenne temporelle}} + \underbrace{u_i(\mathbf{x}, t)}_{\text{fluctuation}}$$

URANS = résolution des équations modèles RANS + $\partial/\partial t$

⇒ on change la nature des équations : bifurcation possible d'une solution stationnaire vers une solution instationnaire. Les expériences numériques donnent une solution instationnaire même en écoulement statistiquement stationnaire !

$$\text{Décomposition URANS : } U_i^* = \underbrace{\tilde{U}_i(\mathbf{x}, t)}_{\text{vitesse filtrée (résolue)}} + \underbrace{u_i''(\mathbf{x}, t)}_{\text{turbulence de fond (modélisée)}}$$

$$\text{Equation résolue : } \frac{\partial \tilde{U}_i}{\partial t} + \tilde{U}_j \frac{\partial \tilde{U}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tilde{\mathcal{P}}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \tilde{U}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \langle u_i'' u_j'' \rangle}{\partial x_j}$$

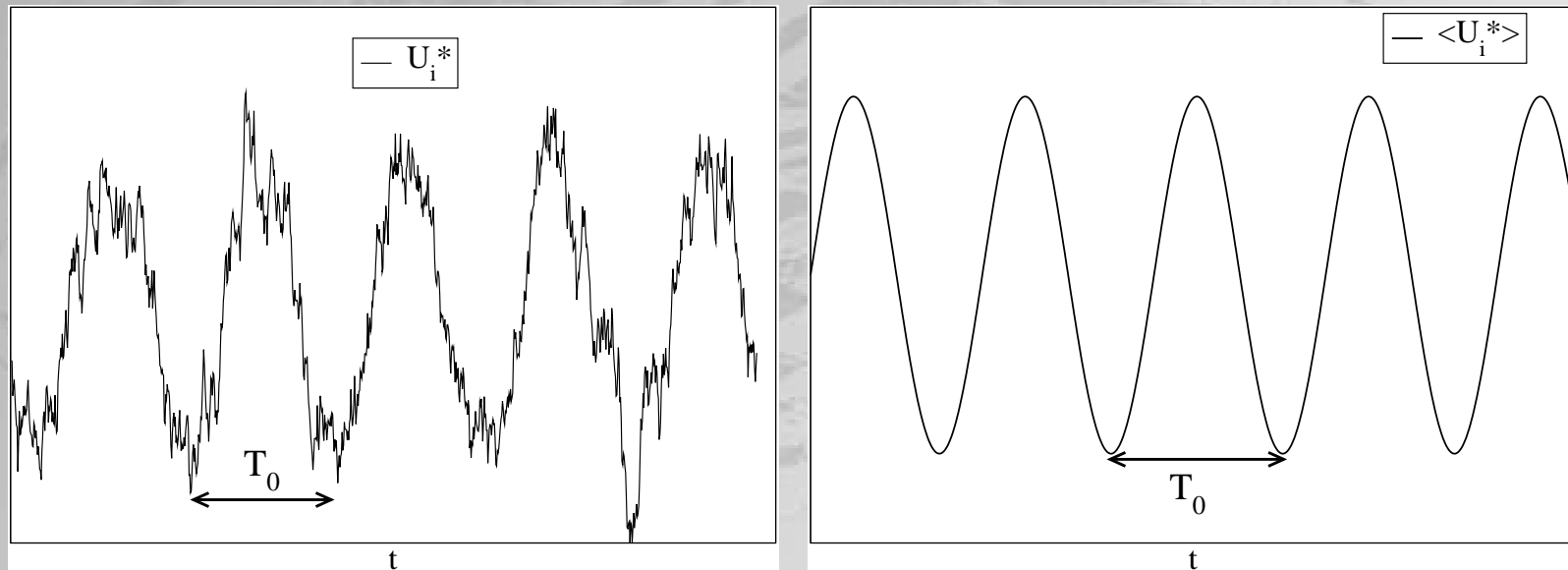
Equations formellement identiques à l'approche RANS si filtre idempotent

⇒ modèle de fermeture pour les tensions de Reynolds incohérentes $\langle u_i'' u_j'' \rangle$

Si forte composante périodique dans l'écoulement (période T_0)

\implies filtre URANS = moyenne de phase :

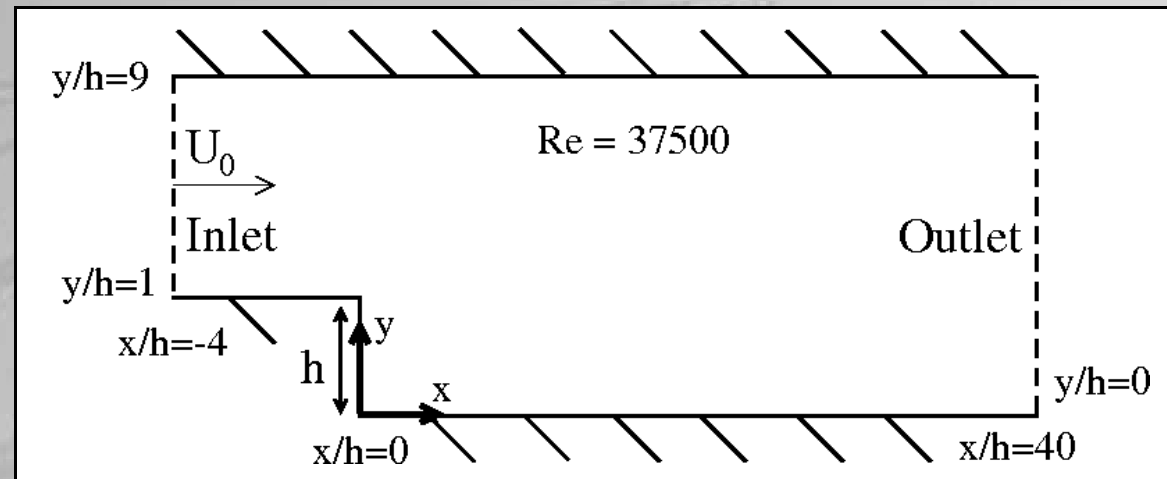
$$\tilde{U}_i(\mathbf{x}, t) = \langle U_i^* \rangle = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N+1} \sum_{n=0}^N U_i^*(\mathbf{x}, t + nT_0) \quad (7)$$



Actuellement, pas de consensus satisfaisant \implies filtre implicite capable d'extraire les structures cohérentes à grande échelle et de temps de vie long devant la turbulence de fond.

La marche descendante

(Driver & Seegmiller 1985)



Deux fréquences caractéristiques :

- Lâcher tourbillonnaire : $St \simeq 0.20$ (basé sur $U_0/2$ et δ_ω)
- Battement à basse fréquence de la couche cisailée : $St \approx 0.06$

Les modèles RSM reproduisent le lâcher tourbillonnaire sur la marche descendante (Lasher & Taulbee 1992).

Méthodes numériques

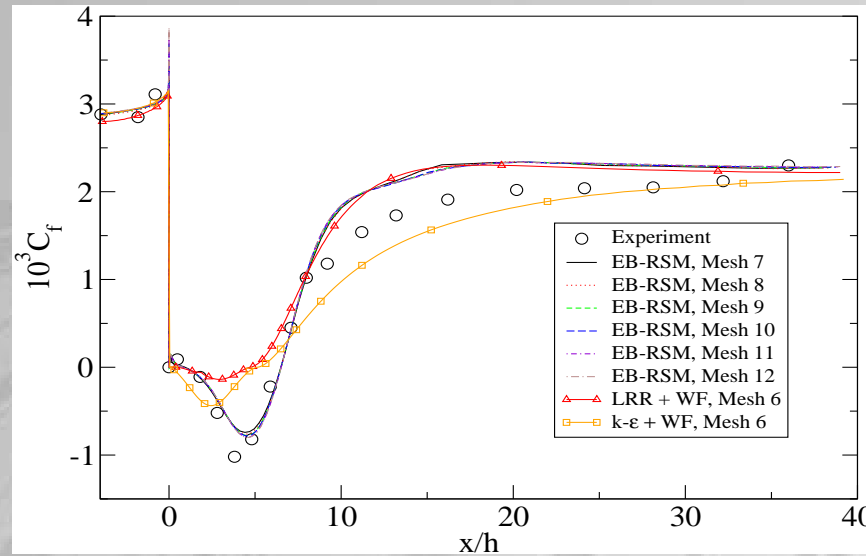
- Schéma temporel : Euler implicite. Convergence en Δt vérifiée
- Schéma spatial (termes convectifs) : CDS et comparaison avec UDS
- Modèles de turbulence :
 - lois de paroi : $k-\varepsilon$, LRR
 - modèle bas-Re : EB-RSM

Maillage	1	6
f_r	1	4
N_{cell}	1500	24000
y_1^+	150	37

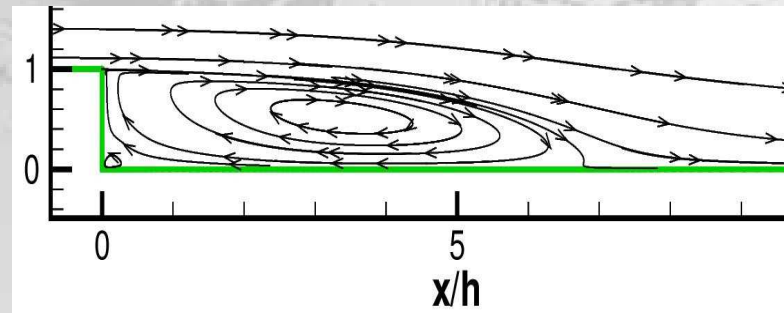
Maillage	7	12
f_r	1	2
N_{cell}	4000	16000
y_1^+	3	1.5

Rôle du modèle ? Rôle du numérique (maillage, schéma convectif) ?

Champ moyen



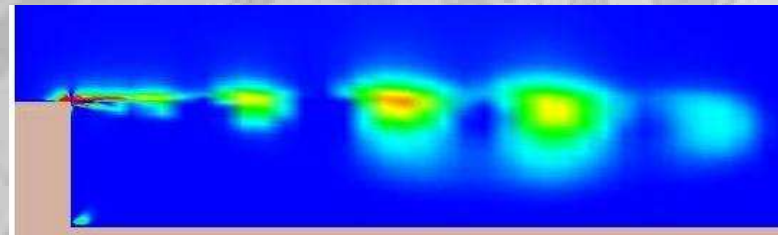
	Expérience	$k-\varepsilon$	LRR	EB-RSM
l_r/h	6.26	5.14	4.72	6.51



- Faible sensibilité à un déraffinement raisonnable en proche paroi
- EB-RSM améliore considérablement C_f et l_r

Champ instantané

- $k-\varepsilon \implies$ solution stationnaire, quel que soit le maillage ou le schéma convectif
- RSM + UDS \implies solution stationnaire, quel que soit le maillage ou le modèle utilisé. Car schéma à caractère diffusif
- RSM + CDS \implies solution instationnaire avec des maillages similaires à ceux utilisés par Lasher & Taulbee (maillage 7)



Isocontours positives du critère Q

	Experience	$k-\varepsilon$	LRR	EB-RSM
St	0.20	- -	0.16	0.21

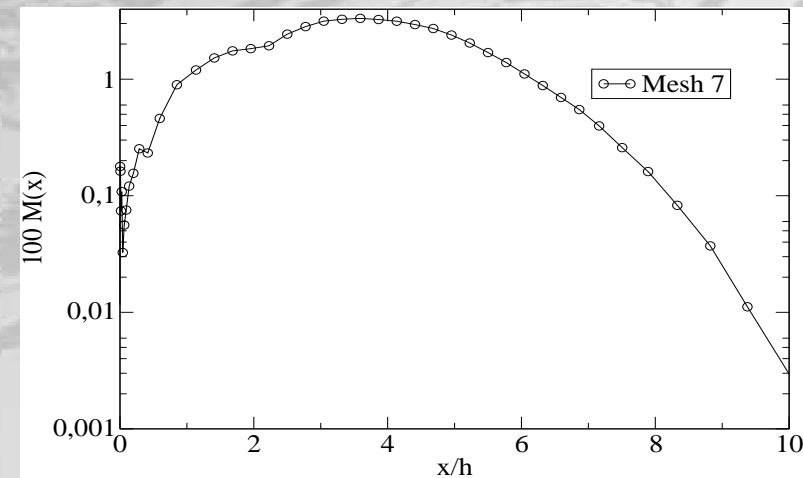
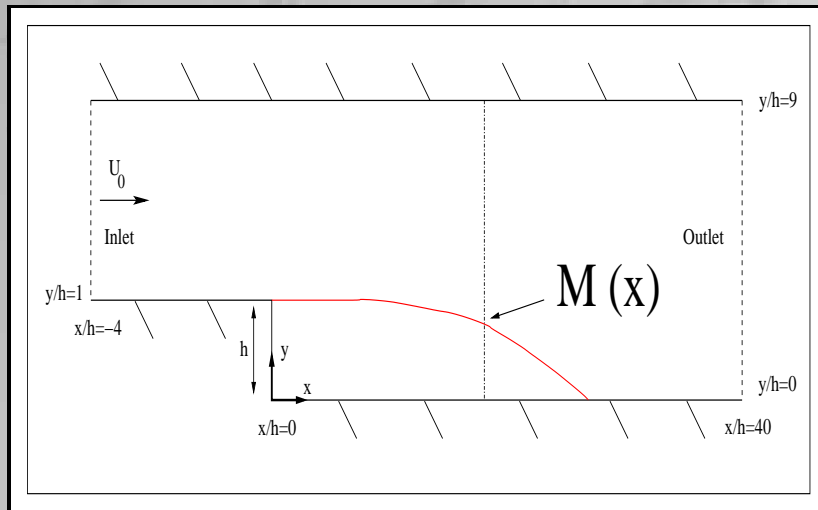
\implies Energie contenue dans les structures résolues ?

Energie fluctuante totale = Energie résolue + Energie modélisée

$$\implies k = k_r + k_m$$

Quantité importante : ratio k_r/k

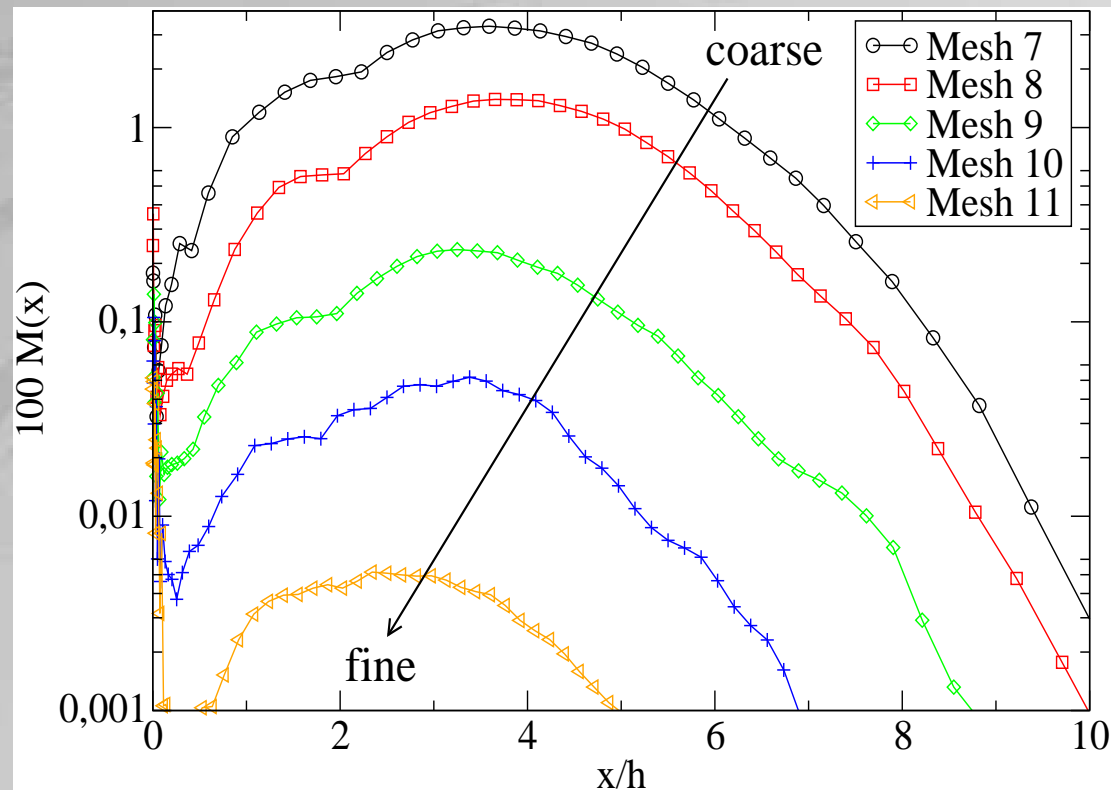
$$\implies M(x) = \max_y (k_r(x, y)/k(x, y))$$



Les structures résolues contiennent une faible part de l'énergie totale

Attendu : raffinement du maillage \implies erreurs numériques $\searrow \implies M(x) \nearrow$

Obtenu : évolution inverse !



\implies Solution stationnaire avec le maillage le plus raffiné !

Mêmes résultats qualitatifs avec le modèle LRR

A propos du schéma centré

Equation 1D de convection/diffusion : $U_c \frac{d\phi}{dx} = \Gamma \frac{d^2\phi}{dx^2}$

Equation discrétisée au nœud i :

$$(2 - Pe)\phi_{i+1} - 4\phi_i + (2 + Pe)\phi_{i-1} = 0$$

$$Pe = \frac{U_c \Delta x}{\Gamma} = \frac{\text{Convection}}{\text{Diffusion}}$$

Solution analytique de l'équation discrète : $\phi_i = C_1 + C_2 \left(\frac{2 + Pe}{2 - Pe} \right)^i$

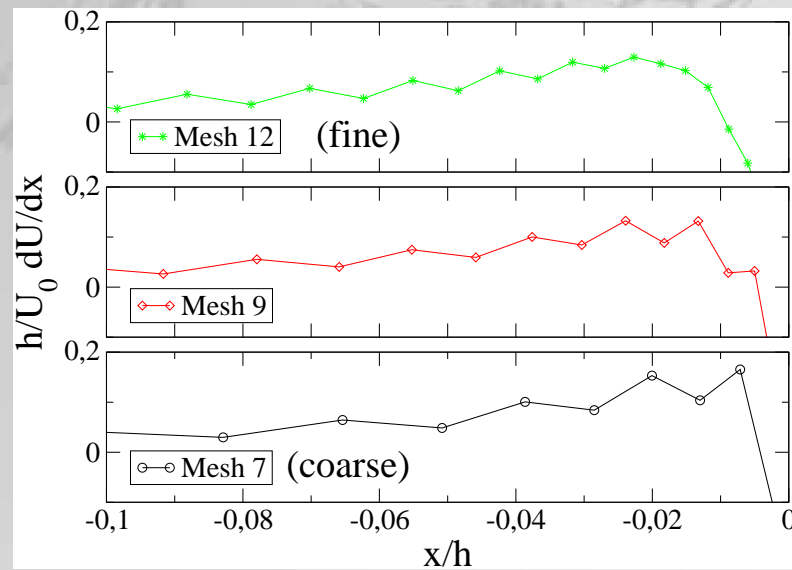
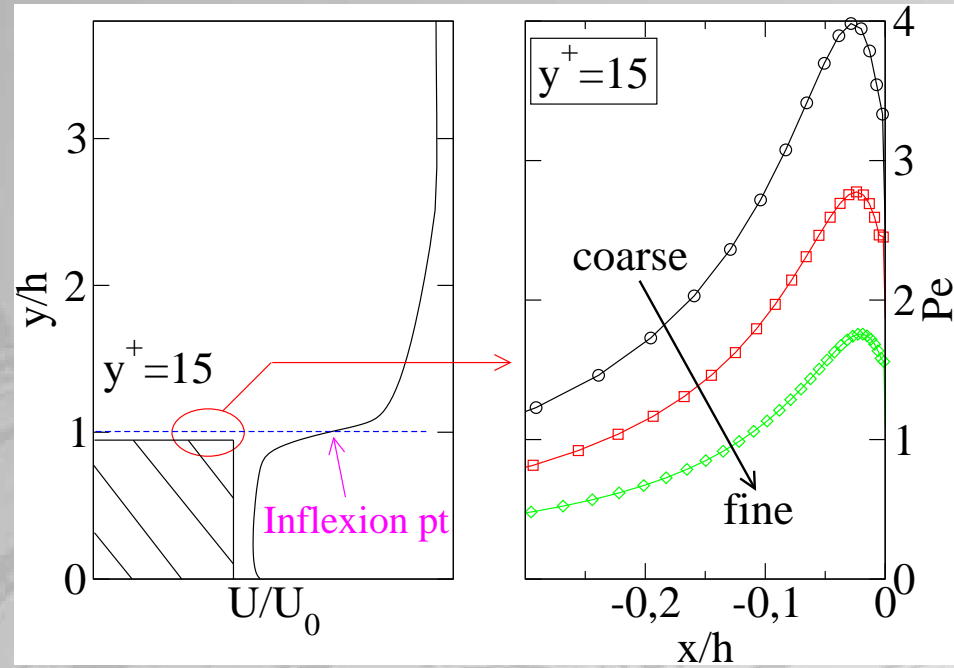
$Pe > 2 \implies$ oscillations numériques

Pour une couche limite turbulente 2D :

$$\text{Terme de convection} \approx U^2 / \Delta x$$

$$\text{Terme de diffusion} \approx \nu_{tot} U / \Delta y^2$$

$$\implies Pe(x, y) = \frac{U \Delta y^2}{\nu_{tot} \Delta x}$$



Conclusions sur l'URANS

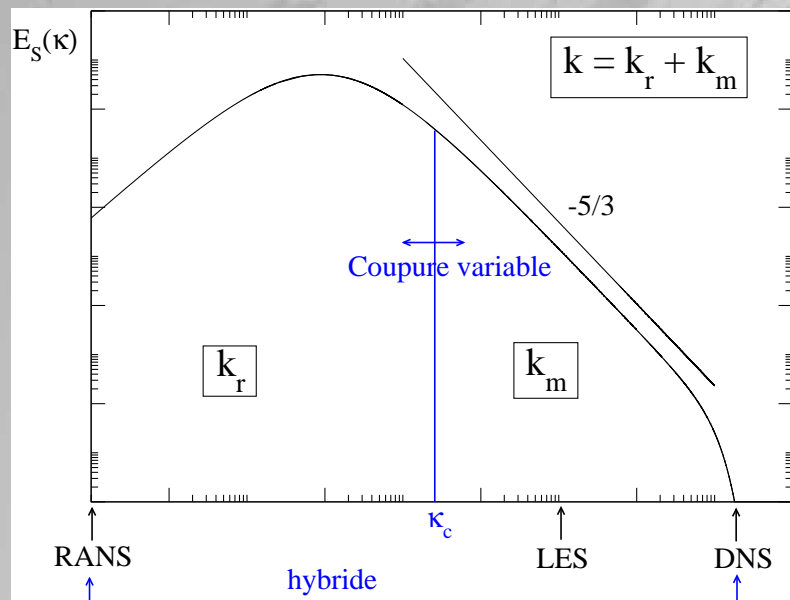
- Les oscillations numériques excitent le mode le plus instable de la couche cisailée \implies solution stationnaire en réalité
- Amplitude des oscillations à grande échelle très dépendante du numérique, contrairement au nombre de Strouhal (fréquence la plus instable de la vitesse)
- Besoin de contrôler le paramètre *énergie résolue/énergie totale*
 \implies méthodologie hybride RANS-LES
 \implies modèle PITM (*Partially Integrated Transport Model*)
(Schiestel & Dejoan 2005, Chaouat & Schiestel 2005)

Plan de l'exposé

- Code CFD et méthodes numériques
- Modélisation des effets de paroi
 - Présentation du modèle EB-RSM
 - Validation en canal
- Méthodologie URANS
 - Décomposition du champ instantané
 - Application à la marche descendante
- **Modèle hybride RANS-LES**
 - Formalisme du filtrage
 - Modèle PITM et T-PITM
 - Développement d'un modèle hybride à pondération elliptique
 - Résultats en canal
- Conclusions générales & perspectives

Modèle hybride RANS-LES

- Principe : conjuguer les avantages des approches RANS (paroi, écoulement attaché) et LES (instationnarité). Tendre vers un modèle RANS dans certaines régions de l'écoulement (proche paroi) et vers une LES dans d'autres régions
- Deux types d'approche hybride :
 - frontière imposée : couplage complexe entre les zones RANS et LES
 - transition continue : plus simple à mettre en œuvre en pratique



- Théorie spectrale de la turbulence : cadre formel consistant pour les modèles hybrides à transition continue
- Compatible avec les 2 limites extrêmes RANS et DNS : paramètres de transition ?
- Passage de la coupure dans la zone productive \implies production et redistribution
- But : diminuer le coût du calcul (maillage grossier)

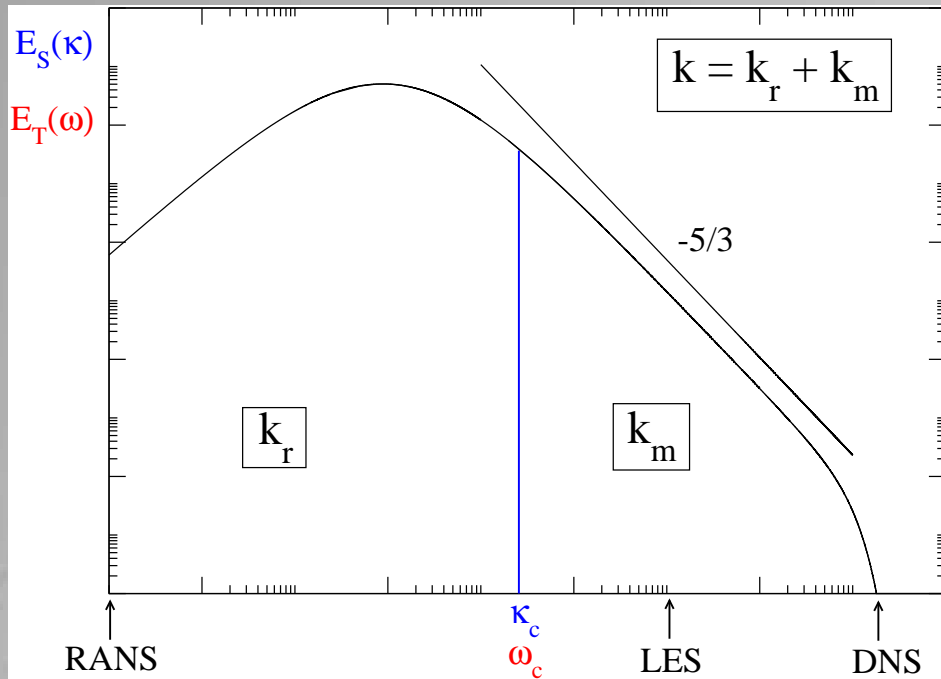
Formalisme du filtrage

- Décomposition : $U_i^* = \underbrace{\tilde{U}_i(\mathbf{x}, t)}_{\text{vitesse filtrée (résolue)}} + \underbrace{u_i''(\mathbf{x}, t)}_{\text{fluctuation résiduelle}}$
- Vitesse filtrée obtenue par produit de convolution : $\tilde{U}_i = \langle U_i^* \rangle = F_{\Delta_f} * U_i^*$
- Filtre spatial F_{Δ_S} : filtre gaussien, coupure spectrale, filtre boîte
- Filtre temporel F_{Δ_T} : filtre exponentiel, filtre boîte (Pruett *et al.* 2003)
- Quelle que soit l'approche (Germano 1992) :

$$\frac{\tilde{D}\tilde{U}_i}{\tilde{D}t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tilde{P}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \tilde{U}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ijSFS}}{\partial x_j} \quad (8)$$

$$\frac{\tilde{D}}{\tilde{D}t} \tau_{ijSFS} = D_{ijSFS}^T + D_{ijSFS}^\nu + \phi_{ijSFS} + P_{ijSFS} - \varepsilon_{ijSFS} \quad (9)$$

τ_{ijSFS} : caractérise l'influence des échelles filtrées (petites échelles, hautes fréquences) sur les échelles résolues (grandes échelles, basses fréquences)



Définition : $\kappa_c = \frac{2\pi}{\Delta_S}$ $\omega_c = \frac{2\pi}{\Delta_T}$

Choix : $\Delta_S = C_g \Delta$ $\Delta_T = ?$

Spatial	$\kappa_c \rightarrow \infty$	DNS
	$\kappa_c \rightarrow 0$	RANS si écoulement homogène
Temporel	$\omega_c \rightarrow \infty$	DNS
	$\omega_c \rightarrow 0$	RANS si écoulement stationnaire

Conceptuellement, approche temporelle plus consistante pour les écoulements inhomogènes et statistiquement stationnaires

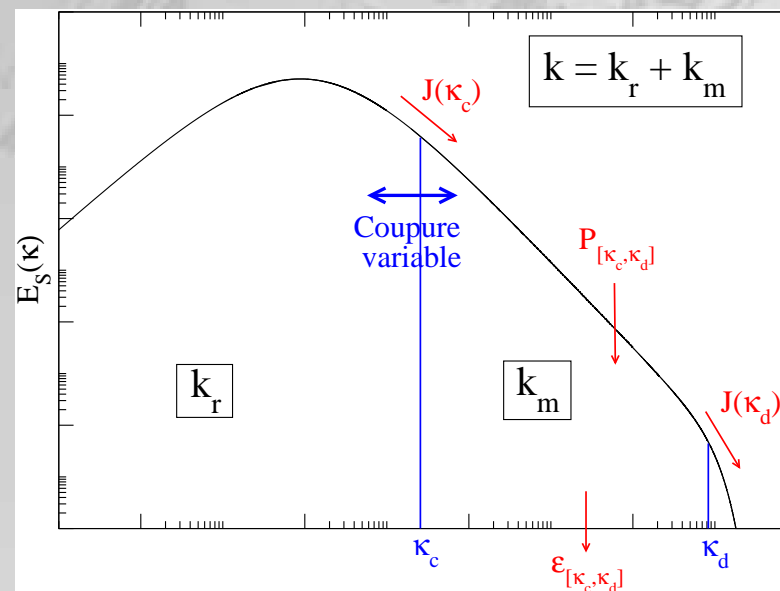
Modèle PITM (en THA)

(Schiestel & Dejoan 2005, Chaouat & Schiestel 2005)

Coupure spectrale pour séparer échelles résolues $[0, \kappa_c]$ et échelles modélisées $[\kappa_c, \infty]$.

Trois zones : $[0, \kappa_c]$, $[\kappa_c, \kappa_d]$, $[\kappa_d, \infty]$. L'intégration de l'équation du spectre spatial d'énergie sur $[\kappa_c, \kappa_d]$ donne l'équation de k_m :

$$\frac{\partial k_m}{\partial t} = \underbrace{P_{[\kappa_c, \kappa_d]}}_{\text{production}} - \underbrace{\varepsilon_{[\kappa_c, \kappa_d]}}_{\text{dissipation}} + \underbrace{\mathcal{J}(\kappa_c) - \mathcal{J}(\kappa_d)}_{\text{flux net}} \quad (10)$$



But : retrouver la forme classique de l'équation de ε , mais modifier l'échelle de temps pour caractériser les échelles modélisées, par l'intermédiaire du coefficient C_{ε_2}

Hypothèse (Schiestel 1983) :

$$\kappa_d = \kappa_c + \gamma \frac{\varepsilon}{k_m^{3/2}} \quad (11)$$

La dérivée temporelle de (11) donne :

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = C_{\varepsilon_1} \frac{P_m \varepsilon}{k_m} - C_{\varepsilon_2}^* \frac{\varepsilon^2}{k_m} \quad \text{où} \quad P_m = P_{[\kappa_c, \kappa_d]} + \mathcal{J}(\kappa_c) \quad (12)$$

$$C_{\varepsilon_2}^* = C_{\varepsilon_1} + f_k (C_{\varepsilon_2} - C_{\varepsilon_1}) \quad (13)$$

$$C_{\varepsilon_1} = 1.44, \quad C_{\varepsilon_2} = 1.83, \quad f_k = \frac{k_m}{k}$$

	DNS	RANS
f_k	0	1

Loi de Kolmogorov : $f_k = \frac{1}{\beta_0 \eta_c^{2/3}} \quad \text{où} \quad \eta_c = \kappa_c L$

\Rightarrow Inconsistant avec la limite RANS !

Dérivation du modèle T-PITM

(*Temporal Partially Integrated Transport Model*)

Effectué pendant la thèse : définition et équation d'évolution du spectre temporel d'énergie cinétique fluctuante \implies similaire à l'approche spatiale

3 zones : $[0, \omega_c]$, $[\omega_c, \omega_d]$, $[\omega_d, \infty]$. L'intégration de l'équation du spectre temporel sur $[\omega_c, \omega_d]$ donne l'équation de k_m .

Hypothèse : $\boxed{\omega_d = \omega_c + \chi \frac{\varepsilon}{k_m}}$

Sa dérivée convective par le champ moyen donne :

$$U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_{\varepsilon_1} \frac{P_m \varepsilon}{k_m} - C_{\varepsilon_2}^* \frac{\varepsilon^2}{k_m} + D_m \quad (14)$$

$$\boxed{C_{\varepsilon_2}^* = C_{\varepsilon_1} + f_k (C_{\varepsilon_2} - C_{\varepsilon_1})} \quad (15)$$

\implies Formulation similaire à l'approche spatiale

- Choix de f_k : forme du spectre temporel (Tennekes 1975, Kaneda 1993)

$$E_T(\omega) \propto \varepsilon^{2/3} k^{1/3} \omega^{-5/3} \quad (16)$$

$$f_k = \frac{1}{\beta_0} \xi_c^{-2/3} \quad \text{où} \quad \xi_c = \omega_c T \quad (17)$$

$\implies f_k$ inconsistant avec la limite RANS ($f_k = 1$) !

- Choix de la coupure : $\omega_c \propto \kappa_c \sqrt{k}$ (Tennekes 1975)

$$\kappa_c = \frac{2\pi}{\Delta_S} = \frac{2\pi}{C_g \Delta} \quad (18)$$

\implies formulation de f_k similaire à l'approche spatiale

Au final, approches PITM et T-PITM identiques

Utilisation d'un modèle RANS pour modéliser les corrélations inconnues dans l'équation de $\tau_{ij_{SFS}}$ ($D_{ij_{SFS}}^T$, $\phi_{ij_{SFS}}$ et $\varepsilon_{ij_{SFS}}$)

Développement d'un modèle hybride à pondération elliptique en canal ($Re_\tau = 395$)

- Discrétisation temporelle : Crank-Nicolson
- Discrétisation spatiale pour les termes convectifs : CDS pour la vitesse, UDS pour les variables turbulentes

Maillage	N_{cell}	Δx^+	y_1^+	Δy_c^+	Δz^+
1 (grossier)	56000	100	1.5	40	50
2 (raffiné)	172000	50	3	40	25

- Dans l'équation de $\tau_{ij_{SFS}}$, on moyenne les termes sources dans les directions homogènes

Quels problèmes de modélisation ?

- Valeur théorique $f_k = \frac{1}{\beta_0 \eta_c^{2/3}}$. Choix empirique de f_k en proche paroi ($f_k = 1$) ?

$$f_k(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{1 + \beta_0 \eta_c^{2/3}} \quad (\text{Schiestel \& Dejoan 2005}) \quad (19)$$

Au centre du canal, on n'a pas $\beta_0 \eta_c^{2/3} \gg 1$. On propose :

$$f_k(\mathbf{x}, t) = (1 - \alpha^2) + \alpha^2 \frac{1}{\beta_0 \eta_c^{2/3}} \quad (20)$$

- Théorie classique de la turbulence : les petites échelles retournent à l'isotropie plus vite que les grandes \implies modification du terme lent de pression ? Peu d'influence en pratique sur la redistribution
- Effet de blocage : choix de l'échelle de corrélation des effets de paroi ?

Formulation hybride du modèle EB-RSM

Effet de blocage : conséquence de l'incompressibilité du champ fluctuant

⇒ en hybride, effet de blocage à imposer uniquement sur les échelles modélisées

⇒ $L \searrow$

$$\alpha - L_{SFS}^2 \nabla^2 \alpha = 1 \quad (21)$$

- EB-RSM dans la méthodologie RANS :

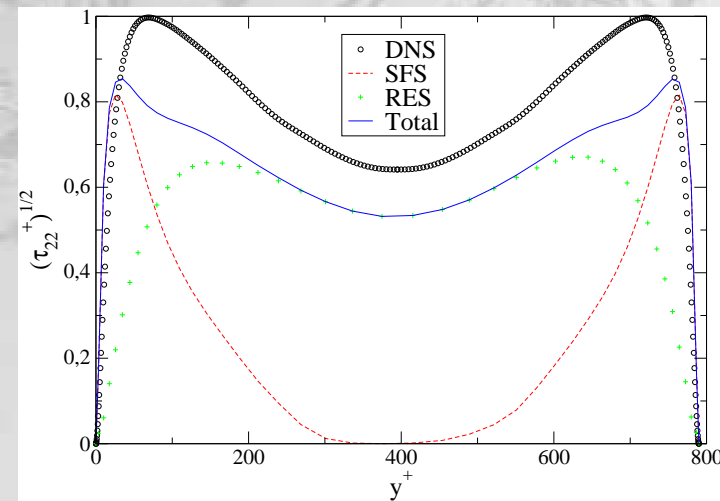
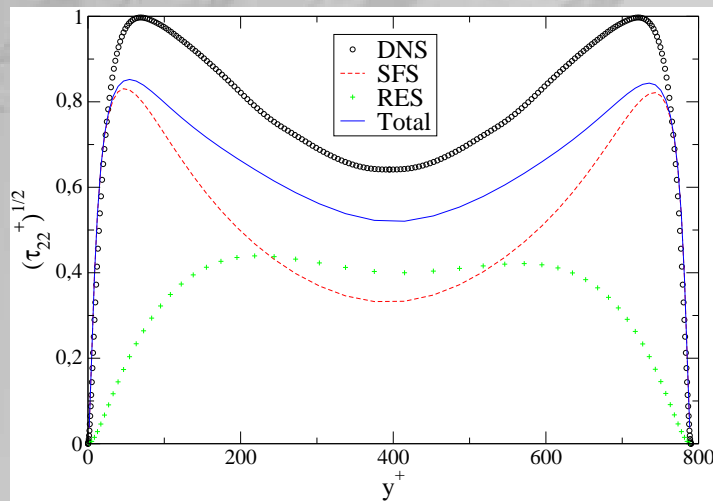
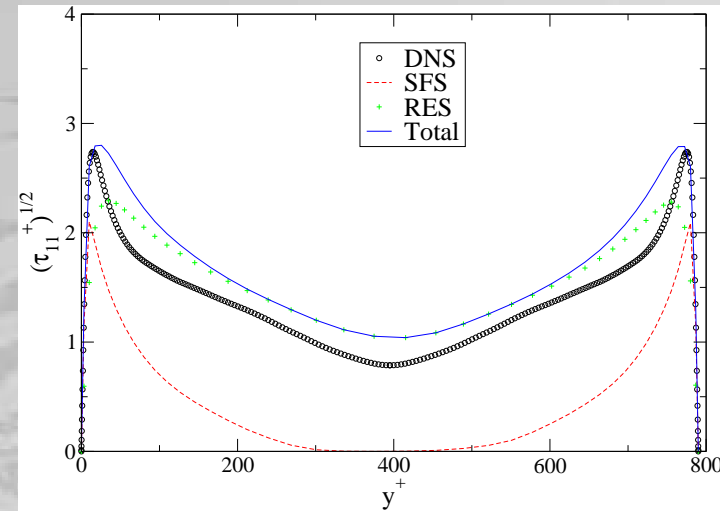
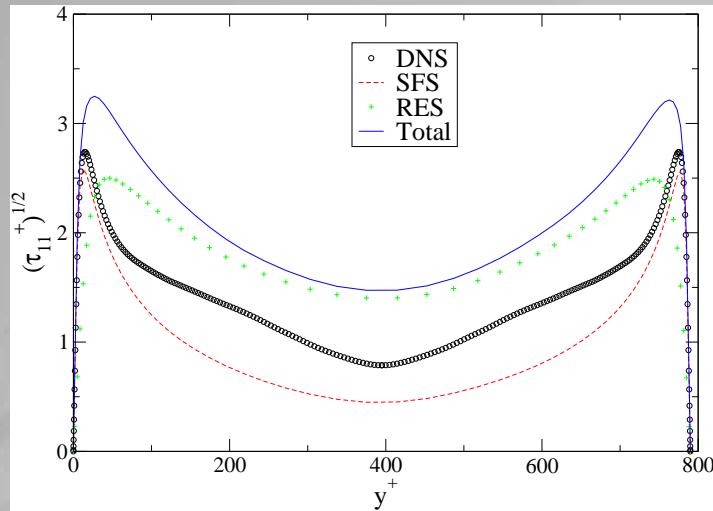
$$L = C_L \max \left(\frac{k^{3/2}}{\varepsilon}, C_\eta \frac{\nu^{3/4}}{\varepsilon^{1/4}} \right) \quad (22)$$

- EB-RSM dans la méthodologie hybride :

$$L_{SFS} = C_L \max \left(\frac{k_{SFS}^{3/2}}{\varepsilon}, C_\eta f_k^{3/2} \frac{\nu^{3/4}}{\varepsilon^{1/4}} \right) \quad (23)$$

⇒ consistant avec la limite DNS ($L_{SFS} \rightarrow 0$)

Resultats en canal

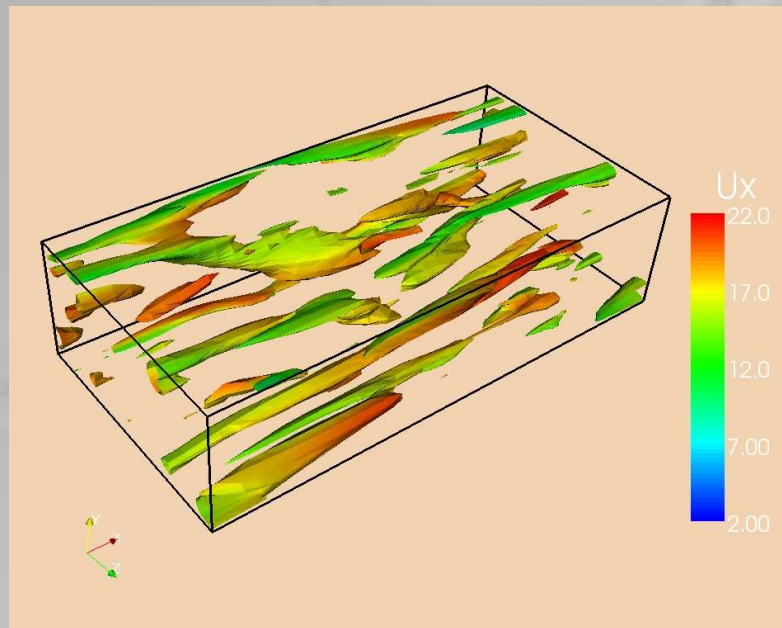


Maillage grossier

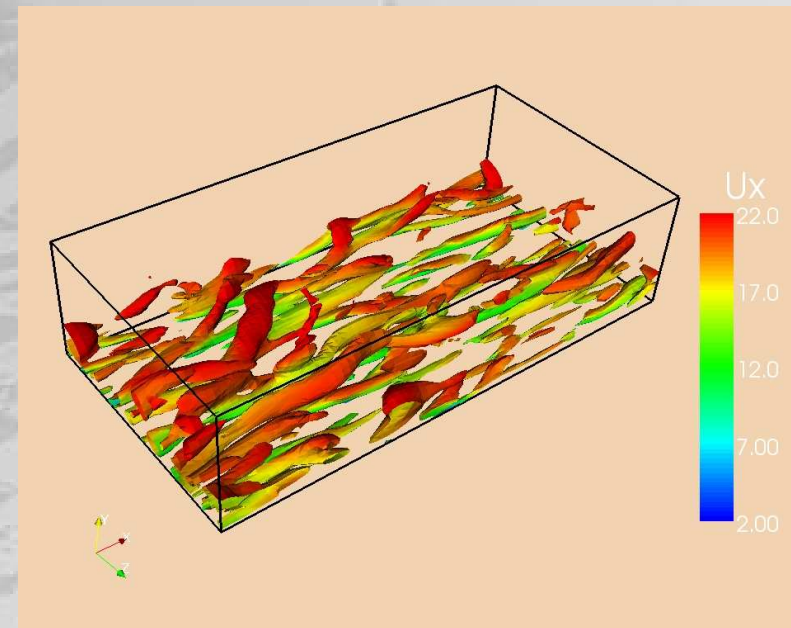
Maillage raffiné

Structures pariétales : stries, tourbillons en fer à cheval inclinés à 45° par rapport à la paroi

Isocontours du critère Q coloriés par la vitesse résolue

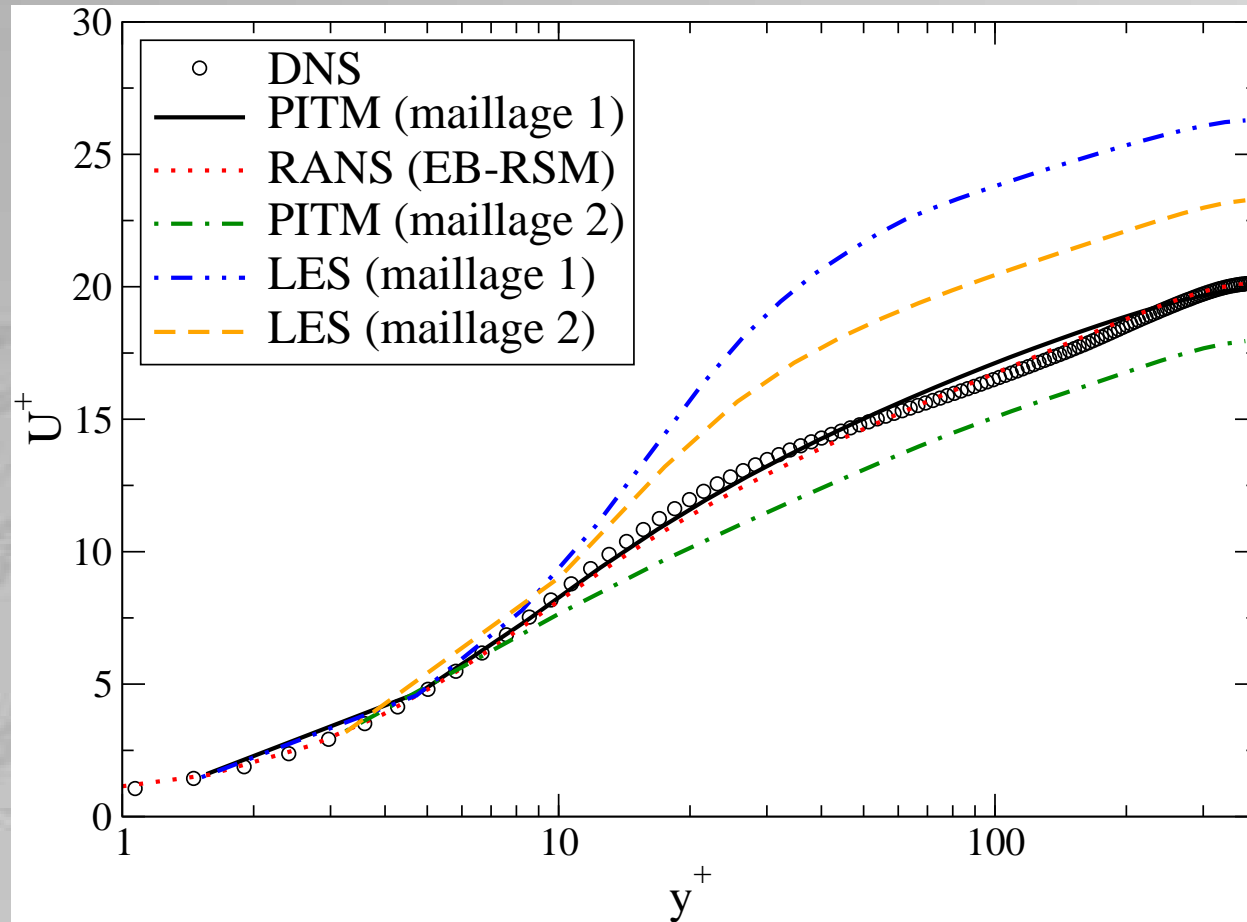


Maillage grossier



Maillage raffiné

\implies le raffinement permet de résoudre plus de structures



LES (Smagorinsky dynamique) : résultat insatisfaisant sur maillage grossier car coupure en dehors de la zone inertielle

Modèle hybride : besoin d'améliorer le choix de l'échelle de longueur des effets de paroi

Plan de l'exposé

- Code CFD et méthodes numériques
- Modélisation des effets de paroi
 - Présentation du modèle EB-RSM
 - Validation en canal
- Méthodologie URANS
 - Décomposition du champ instantané
 - Application à la marche descendante
- Modèle hybride RANS-LES
 - Formalisme du filtrage
 - Modèle PITM et T-PITM
 - Développement d'un modèle hybride à pondération elliptique
 - Résultats en canal
- Conclusions générales & perspectives

Conclusions générales

- Modèle RANS EB-RSM :
 - faible coût + robuste + applicable à des géométrie complexes
 - amélioration des quantités pariétales (C_f, l_r)
- Méthodologie URANS : solution très dépendante du numérique
 - fréquence caractéristique correcte (mode le plus instable de la vitesse)
 - amplitude des oscillations à grande échelle peu fiable
- Méthodologies PITM et T-PITM :
 - Le partitionnement spectral donne un cadre formel consistant pour passer du RANS à la DNS de façon continue
 - Les approches PITM et T-PITM sont identiques
 - ⇒ approche temporelle plus consistante pour les écoulements inhomogènes
 - Utilisation d'équations de transport pour $\tau_{ij_{SFS}}$ pour prendre en compte la production et la redistribution quand la coupure est dans la zone productive du spectre ⇒ LES sur maillage grossier

Perspectives

- Application à l'écoulement de marche descendante
- Moyenne des termes sources dans l'équation de $\tau_{ij_{SFS}}$
 \implies artifice purement numérique ou problème de modélisation ?
- Validité des modèles RANS dans un cadre hybride ?
- Approche du filtrage temporelle récente : choix de ω_c ? Relation de dispersion ?

Remerciements

Merci à Rémi Manceau et Jacques Borée pour leur encadrement de grande qualité et le temps consacré ;

Merci à Thomas Gatski, Eric Lamballais, Sofiane Benhamadouche et Bruno Chaouat pour leur aide précieuse et les discussions enrichissantes ;

Merci à Yannick Lecocq pour son apport à l'implémentation de l'EB-RSM dans *Code_Saturne* ;

Merci aux informaticiens du LEA et du CEAT : Vincent Hurtevent, Francis Boissonneau, Baptiste Nguyen et Michel Bachelier.