

Simulations numériques directes du contrôle d'écoulements turbulents par forçages électromagnétiques

Stéphane MONTESINO

Directeurs de thèse : **Jean-Paul THIBAUT**
Sedat TARDU

LEGI, Grenoble, France



Soutenance de thèse 10/06/2009



Domaine d'applications

- Applications navales

- Prévention de séparation de couches limites
- Contrôle de sillage
- Réduction de traînée (fort intérêt économique)



- Recherche académique

- Manipulation de couches limites
- Génération ou destruction de structures vorticitaires

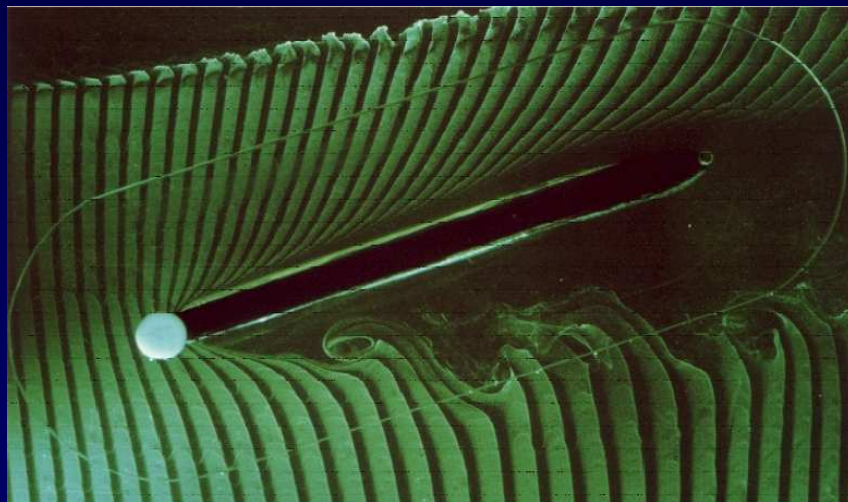


Rossi & Thibault PoF 2003

Etat de l'art

- **Démonstration de faisabilité expérimentale:**

- Nosenchuck & Brown → réseaux d'actionneurs « normaux »
(*Int. Conf. on Near Wall Turbulent Flows, 1993*)
- Rossi & Thibault (*JoT 2002*) → actionneur « normal »
- Breuer et al (*PoF - 2004*) → actionneur « parallèle » transverse
- Henoch & Stace (*PoF - 1995*) → actionneur « parallèle » longitudinal



- Weier et al (*Flow, Turbulence & Combustion - 2003*)

Etat de l'art au LEGI

- **Développement et validation d'un modèle de force**
 - Lindquist, Rossi & Thibault (*CFM - 2003*)
- **D.N.S. / Outils d'exploration de schéma de contrôle**
 - Bouillon (*Thèse 2004*)
 - Doche (*Thèse 2006*)
 - Nacerredine (*Thèse 2007*)

Objectifs ?

- Mieux comprendre l'impact d'un forçage EM sur la production de **structures turbulentes**.
- Optimiser la géométrie des actionneurs EM et proposer des cycles d'activation permettant de **réduire la traînée**.
- Tester des schémas de contrôle présentant une bonne **réalisabilité**.
- Contourner les **limites expérimentales** (mesures, bulles) en utilisant les D.N.S. comme un outil exploratoire.
- Utiliser une **modélisation** des actionneurs **plus précise** que la littérature.

Contrôle d'écoulement turbulent par forçage EM

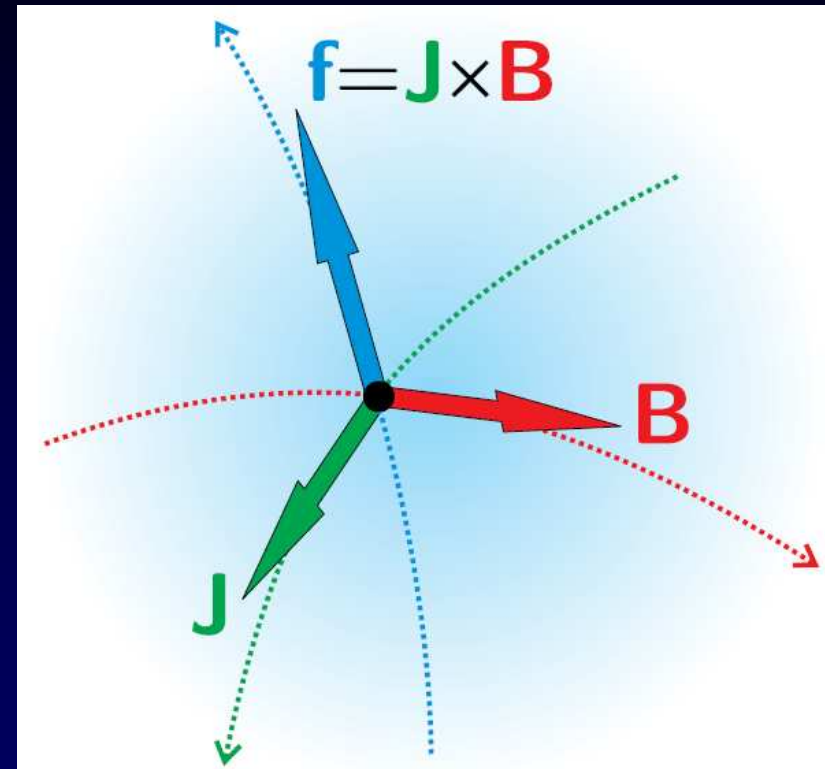
- *I - Modélisation & Simulation*
 - *Modélisation contrôle d'écoulement par forçage électromagnétique*
 - *Outils de simulation numérique*

- *II - Résultats de simulation numérique d'écoulement turbulent*
 - *Écoulement turbulent non forcé*
 - *Forçage EM transverse oscillant*
 - *Forçage EM longitudinal*

Modélisation du contrôle d'écoulement par forçage électromagnétique

Principe physique du forçage E.M.

- J = densité de courant électrique [A/m^2]
- B = induction magnétique [T]
- f = force de Lorentz [N/m^3]
Source de quantité de mvt
Rot F = Source de vorticité

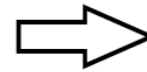
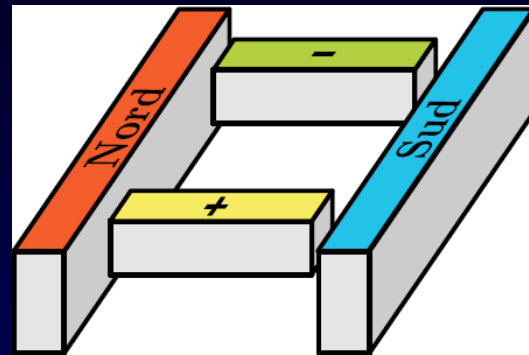


L'eau de mer est un ** lectrolyte**

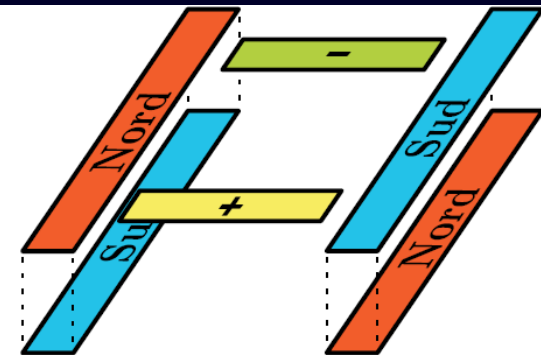
⇒ Hypothèse de fluide **conducteur incompressible**

Modélisation des actionneurs

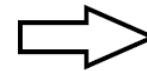
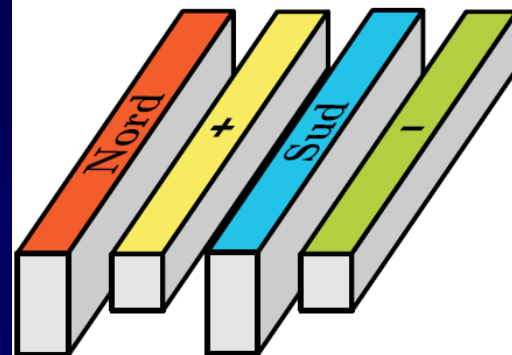
Actionneur
« normal »



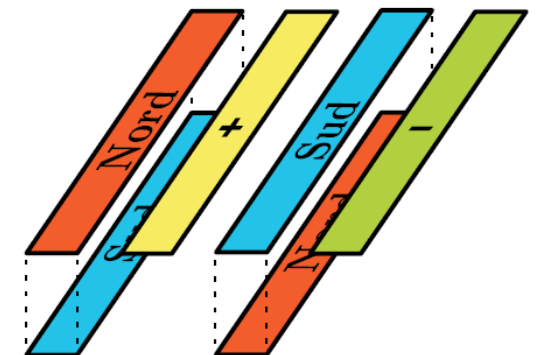
(a)



Actionneur
« parallèle »



(b)

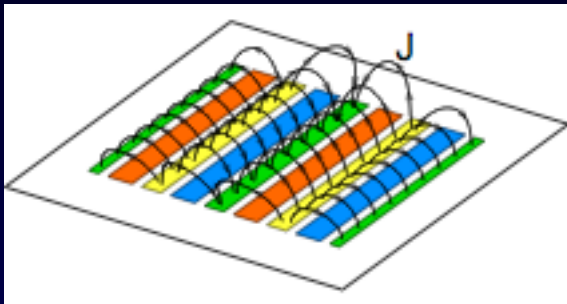


Aimants permanents
sous la paroi

Electrodes affleurant la paroi

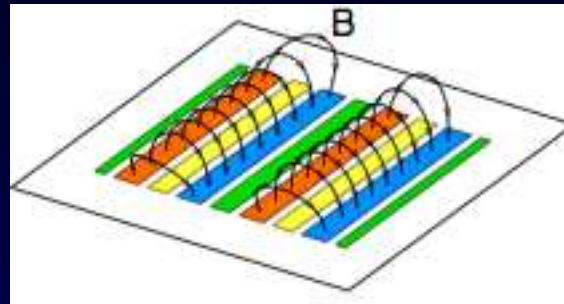
Actionneur E.M. parallèle

Électrodes: source uniforme de densité de courant

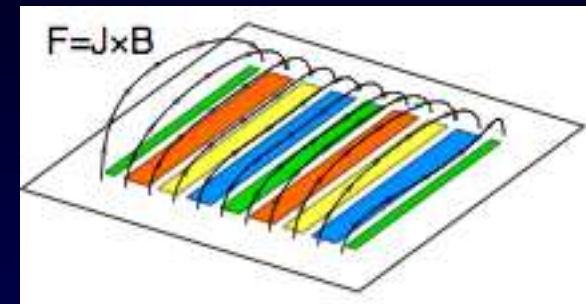


$$\vec{J} = J_{\text{pole}} \vec{J}_{\text{distrib}}$$

Aimants: source uniforme d'induction magnétique

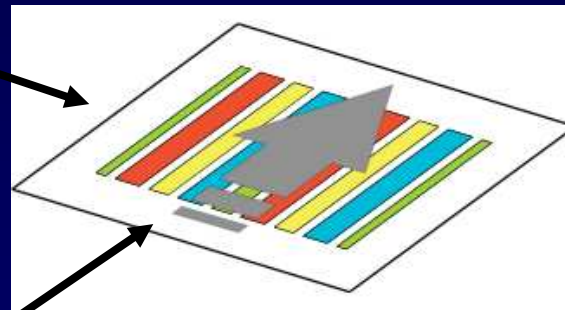


$$\vec{B} = B_{\text{pole}} \vec{B}_{\text{distrib}}$$



$$\vec{F} = J_{\text{pole}} B_{\text{pole}} \vec{J}_{\text{distrib}} \wedge \vec{B}_{\text{distrib}}$$

U
Forçage transverse



U Forçage longitudinal

La **polarité** et le **signe** du **courant** imposé aux électrodes pilotent l'**intensité** du forçage
La **distribution** des forces est fixée par la **géométrie**

Forçage électromagnétique

- *Production directe de quantité de mouvement dans un écoulement*
 - Sans parties mobiles, trous ou protubérances
 - Pas d'injection ni d'aspiration de fluide
- *Génération d'un forçage instationnaire*
 - Forme temporelle choisie et pilotée par le signe et l'intensité du courant aux électrodes (NB: aimant permanent)
 - Haute réponse en fréquence

Equations du modèle

Écoulement incompressible électro-conducteur

Conservation de la quantité de mouvement:

$$\frac{D \vec{u}}{Dt} = -\vec{\nabla} P + \frac{1}{Reynolds} \nabla^2 \vec{u} + Stuart \vec{J}_{\text{distrib}} \wedge \vec{B}_{\text{distrib}}$$

$$Reynolds_{\tau} = \frac{U_{\tau} h}{\nu} = 178.5 \quad Stuart_{\tau} = \frac{JBh}{\rho U_{\tau}^2} = [1, 200]$$

Forces E.M.

Conservation de la masse :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{u} = 0$$

ρ Masse volumique [kg.m⁻³]

U_{τ} Vitesse de frottement [m.s⁻¹]

h 1/2 hauteur du canal [m]

ν Viscosité cinématique [m².s⁻¹]

\vec{J} Densité de courant [A.m⁻²]

\vec{B} Induction magnétique [T]

Equations du modèle

Induction magnétique

$$\frac{\partial \vec{\mathbf{B}}}{\partial t} = \vec{\nabla} \wedge (\vec{\mathbf{u}} \wedge \vec{\mathbf{B}}) + \frac{1}{\mu_0 \sigma} \nabla^2 \vec{\mathbf{B}} \xrightarrow{R_{EM} = \mu_0 \sigma U L \ll 1} \nabla^2 \vec{\mathbf{B}} = 0$$

*Approximation des faibles
nombres de Reynolds magnétiques*

Perméabilité magnétique : $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$

Conductivité électrique : $\sigma = 5 \text{ S.m}^{-1}$

$\vec{\mathbf{B}}$ ➤ *Permanent*
➤ *Indépendant de l'écoulement*

Equations du modèle

Loi d'Ohm

$$\vec{J} = \sigma \left(\vec{E} + \vec{u} \wedge \vec{B} \right) \xrightarrow{\frac{\|\vec{u} \wedge \vec{B}\|}{\|\vec{E}\|} < 10^{-2}} \vec{J} \approx \sigma \vec{E}$$

Champ électrique imposé : \vec{E}

Champ électrique induit : $\vec{u} \wedge \vec{B}$

Conservation de la charge électrique : $\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = 0$

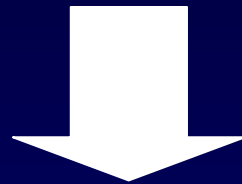
\vec{J} ➤ *Indépendant de l'écoulement*

Forces électromagnétique

$$\vec{F}_{EM} = \vec{J} \wedge \vec{B}$$

Les forces électromagnétiques
sont
indépendantes de l'écoulement

Les forces ne dépendent que de la **géométrie** de l'actionneur et de
l'**intensité** du courant



Pré-solveur :

Calcul de la **distribution** des forces E.M. basé sur un modèle **analytique**
(conservation des flux électrique et magnétique)

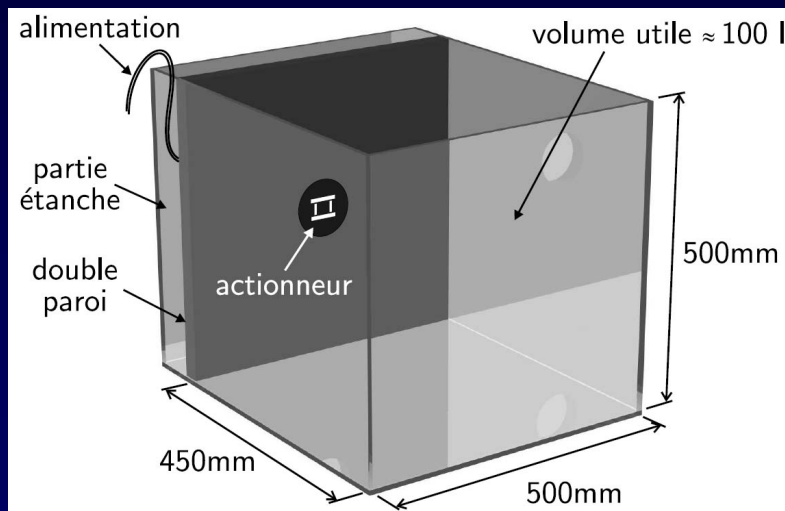
Claudio Lindquist (2005) :

Comparaison entre **simulation** et **expérience** validant le modèle
de force **analytique** et le modèle de fluide **conducteur**

Validation du modèle de force et du modèle électrolyte/fluide conducteur

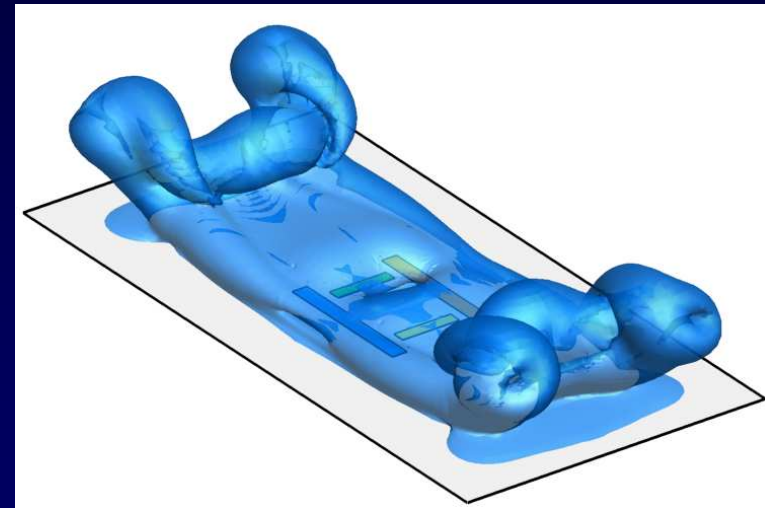
Écoulement initialement au repos (*Lindquist -Thèse 2005*)

- Expériences en aquarium



Mesures P.I.V. et visualisation

- Simulations numériques



Isosurface de vorticité

Comparaison expériences et simulations

Écoulement initialement au repos (*Lindquist -Thèse 2005*)

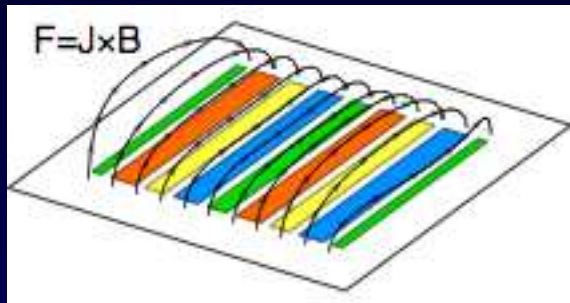


Validation du modèle de **force** et du modèle **électrolyte/fluide conducteur**.

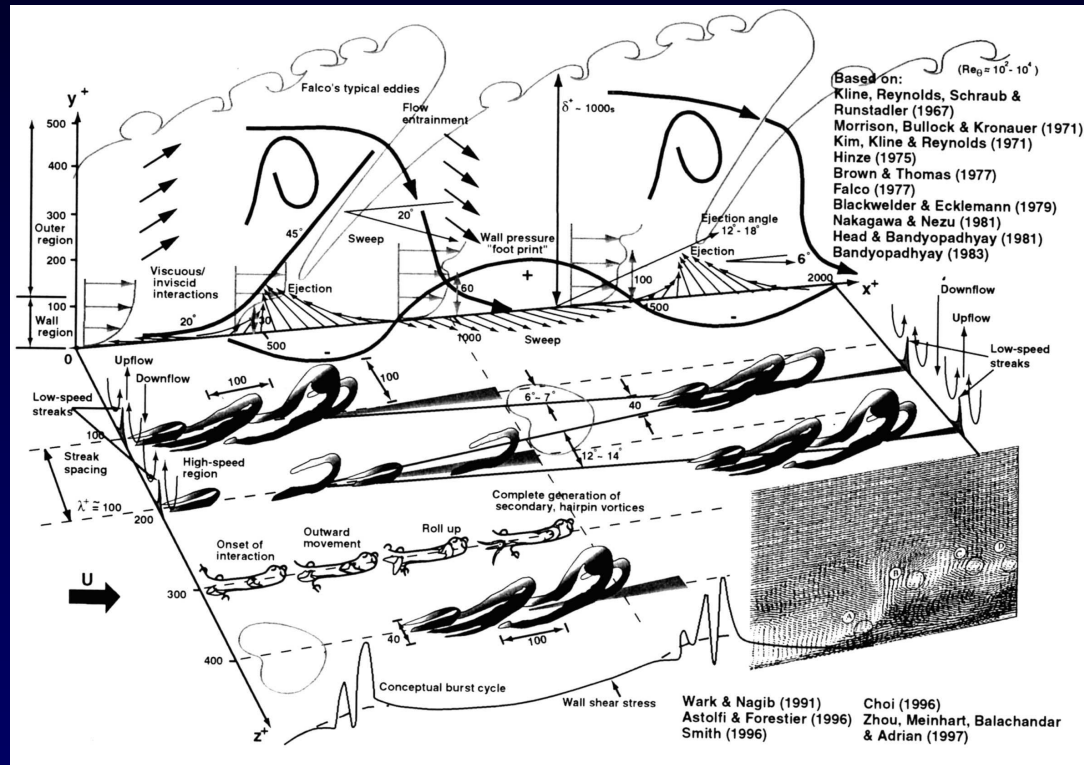
Influence des **bulles** négligeable dans un écoulement en **canal** (*Lindquist -Thèse 2005*)

Ajustement des échelles du forçage aux échelles de l'écoulement

Quelle dimension d'actionneur ?



Grande étendue des échelles de la turbulence:



Echelle ≠ MEMS

Meng -1998

Proc. of the International Symposium on Seawater Drag Reduction

**Simulation Numérique Directe :
Ecoulement turbulent
en canal plan**

Grande étendue des échelles de la turbulence

Pour un canal hydrodynamique:

Viscosité cinématique : $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

Demi - hauteur : 10^{-1} m

Vitesse débitante : $2,8 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$ $\rightarrow \text{Re}_{\text{deb}} = 2800$



Vitesse de frottement : $1,8 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$

Echelle de longueur : de 0,5 mm à 10 cm

Echelle de temps : de 0,1 s à 10 s

Expériences ?

- Fortes limitations à cause de l'**étendue des échelles** à mesurer.
- L'analyse des structures vorticitaires cohérentes nécessiterait une **PIV 3D résolue en temps**
- PIV 2D en canal (*Lindquist, Rossi, Thibault CFM 2003*)
- Problème aux électrodes (bulles, électrolyse)

Pourquoi utiliser une D.N.S. ?

Quels types de simulations ?

- Solveurs commerciaux non appropriés (Fluent, Star CD)
Boîtes noires « presse bouton »
La **turbulence** est **modélisée** et les modèles sont inadaptés
- Simulations des grandes échelles (L.E.S.)
Pour les échelles inférieures à la taille de la maille, la **turbulence** est **modélisée** sans la prise en compte du forçage local
- Simulations Numériques Directes (outil exploratoire)
Toutes les échelles de la **turbulence** sont **calculées** (géométrie académique)

Solveur DNS avec forçage EM

Version LEGI du code DNS « open source » du groupe de Paolo Orlandi's :

- **Fiabilisation, lisibilité et portabilité du code**
 - Code « spaghetti » (goto, copier/coller) → normes Fortran 95 (module, objet)
 - Mutualisation du code avec Subversion (Kubicki)
- **Optimisation séquentielle du code** (gestion des accès mémoire)
- **Vectorisation du code** (supers calculateurs vectoriels NEC-SX5)
- **Parallélisation Open MP des calculs et de la visualisation jusqu'à 32 CPU**
(augmenter la résolution sur les actionneurs)
- **Visualisation et post-traitement automatisés** (implémentation I/O Paraview-Tecplot)
- **Implémentation du solveur des termes sources de forçage électromagnétique**
 - Calculs des FEM de façon modulaire
 - Conservation du débit ?
- **Implémentation des schémas de contrôle interactif**

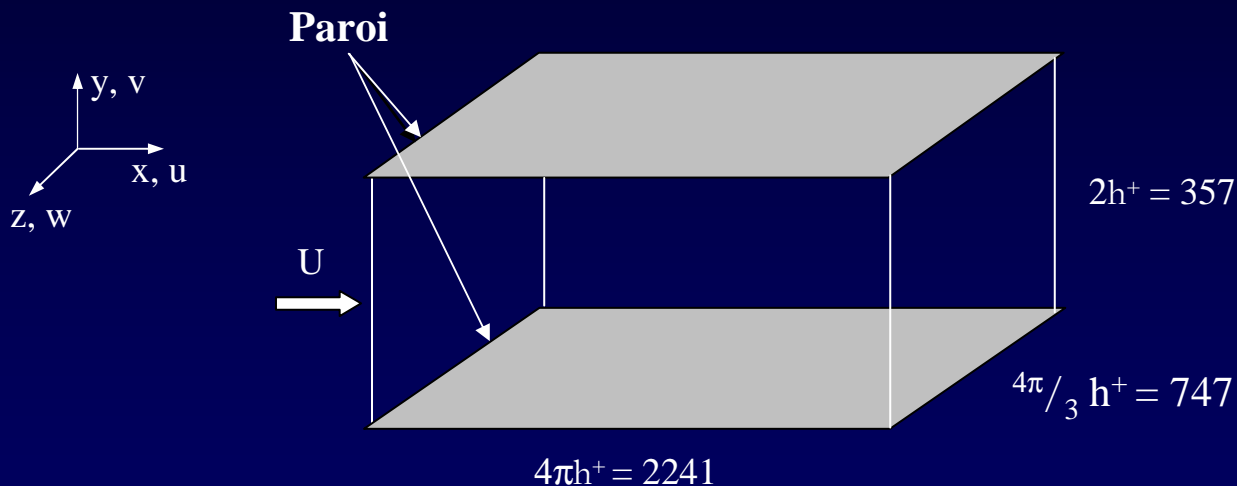
Géométrie académique : canal plan périodique

Conditions aux limites

Périodicités longitudinale (x) & transverse (z)

Adhérence à la paroi

$$\text{Re}_\tau = \frac{u_\tau h}{\nu} = h^+ \approx 178.5$$



Taille du domaine

Interaction entre plusieurs structures turbulentes
(Jimenez & Moin - JFM 1999)

Maillage

Rectiligne raffiné près des parois
512 x 128 x 256

Méthode du “Fractional Step”

1^{ère} étape :

Terme de convection traité de manière explicite

Terme de viscosité traité de manière implicite

Gradient de pression moyen ajusté pour **conserver globalement le débit**

2^{ème} étape :

Correction des champs de vitesse et des fluctuations de pression en introduisant un potentiel de vitesse

 Conservation locale du débit

Le potentiel de vitesse satisfait à une équation de Poisson résolue par :

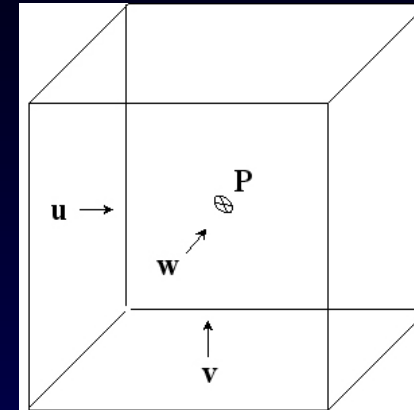
Fast Fourier Transform (direction périodique)

Solveur de matrice tridiagonale (direction normale à la paroi)

Schéma numérique

Localisation des variables :

Schéma collocatif (vitesse et FEM sur les faces)



Dérivées spatiales :

Schéma aux différences finies centrées d'ordre 2

Dérivées temporelles :

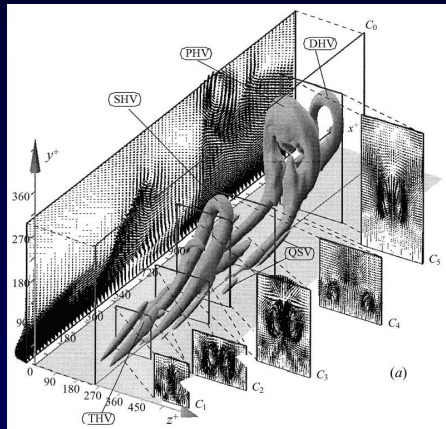
Méthode de Runge-Kutta du 3^{ème} ordre (stabilité & faible coût de stockage)

Schéma numérique **simple** permettant d'utiliser des maillages plus **fins**

Résultats de simulations numériques d'écoulement turbulent

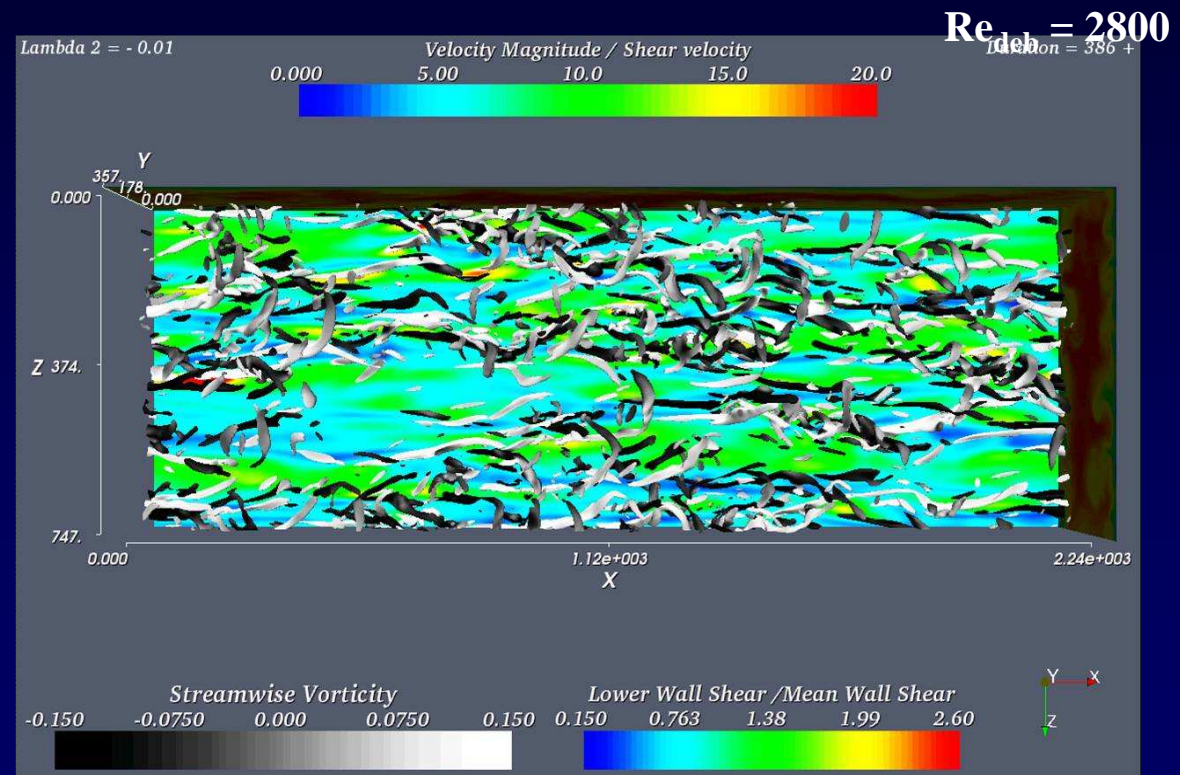
Écoulement turbulent non forcé en canal plan

Champ **turbulent** vitesse/pression :
initial aux calculs d'écoulement turbulent forcé



Zhou et al JFM 1999

λ_2 : basse pression et
vorticité concentrée.
(*Jeong & Hussain 1995*)

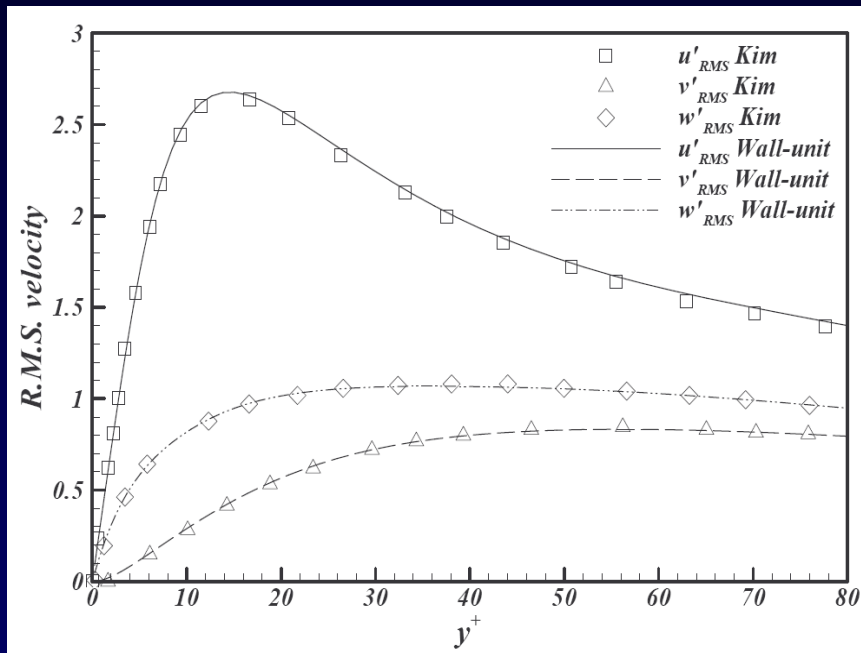


Transition à la turbulence par des fluctuations aléatoires d'amplitude 15% et Reynolds 5600

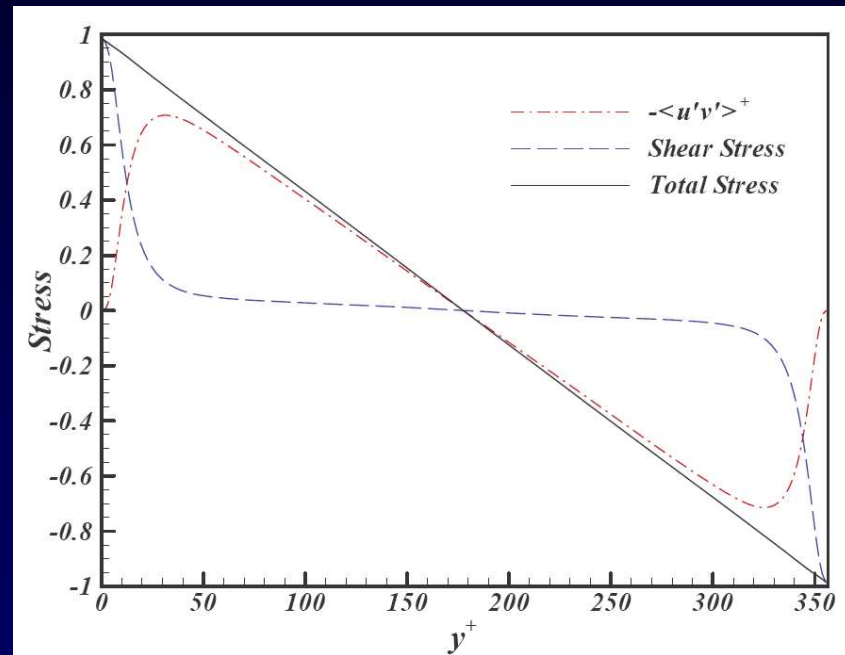
Calcul de l'écoulement initial

Bon accord avec la littérature

RMS des fluctuations de vitesse en unités pariétales (Kim & al. (1987))



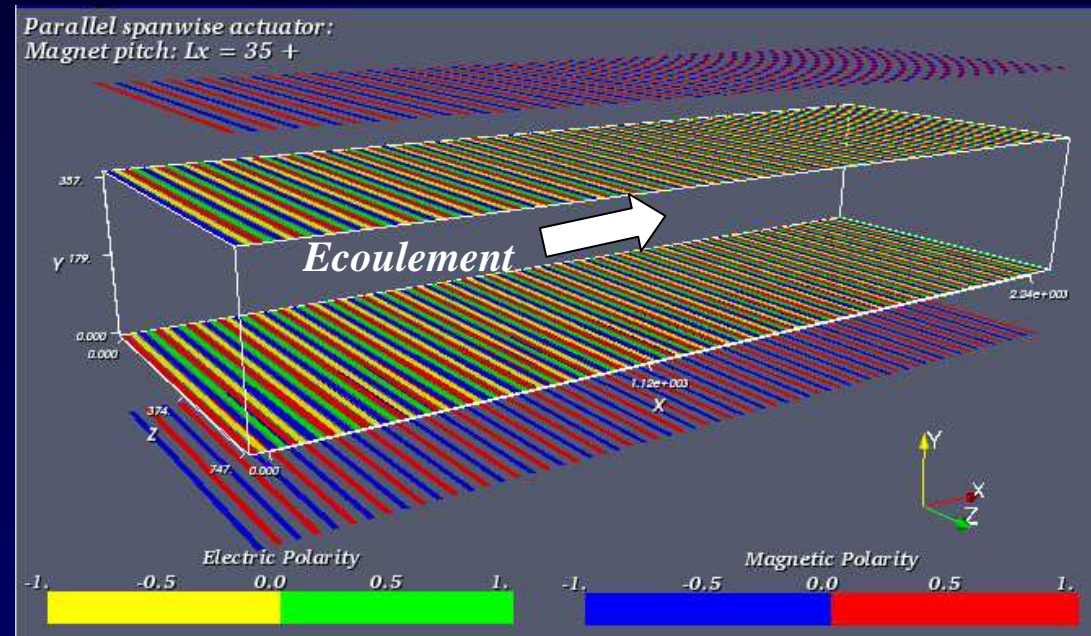
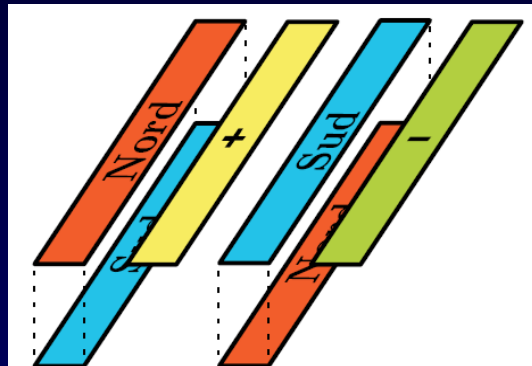
Contraintes totales normalisées par la contrainte moyenne de cisaillement pariétal



Forçage électromagnétique transverse oscillant :

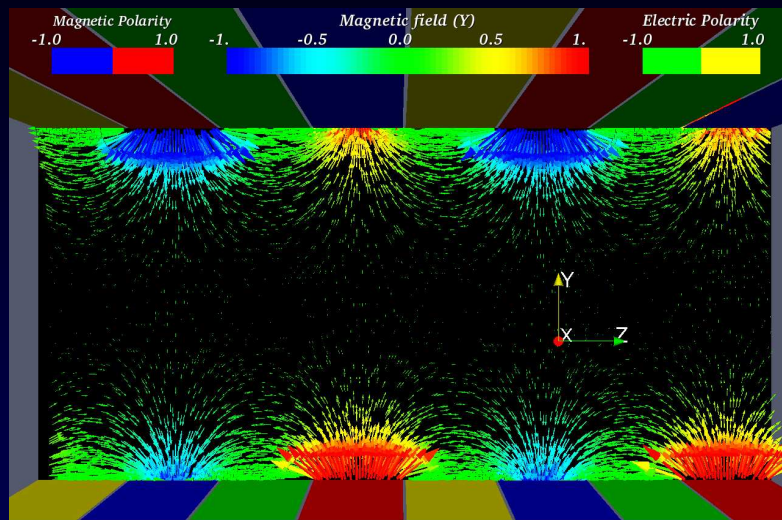
Géométrie des actionneurs pariétaux

Effets similaires à une oscillation de paroi (*Laadhari et al PoF - 1994*)
par oscillation du courant électrique (*Breuer et al - PoF 2004*)

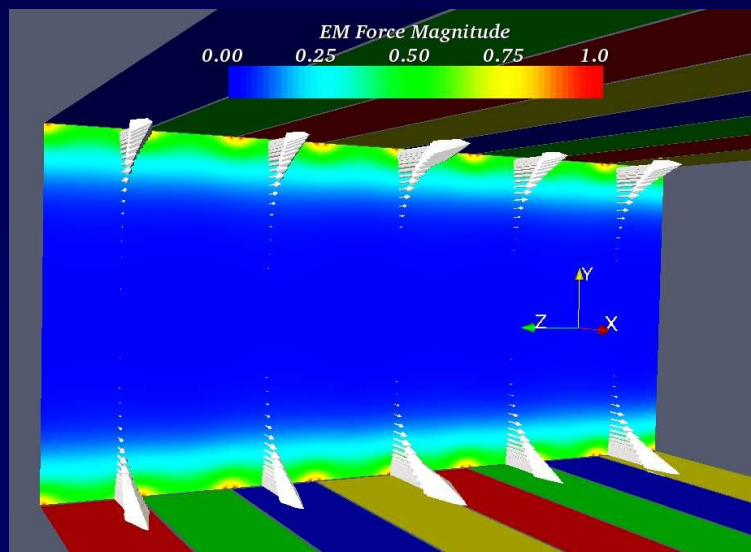
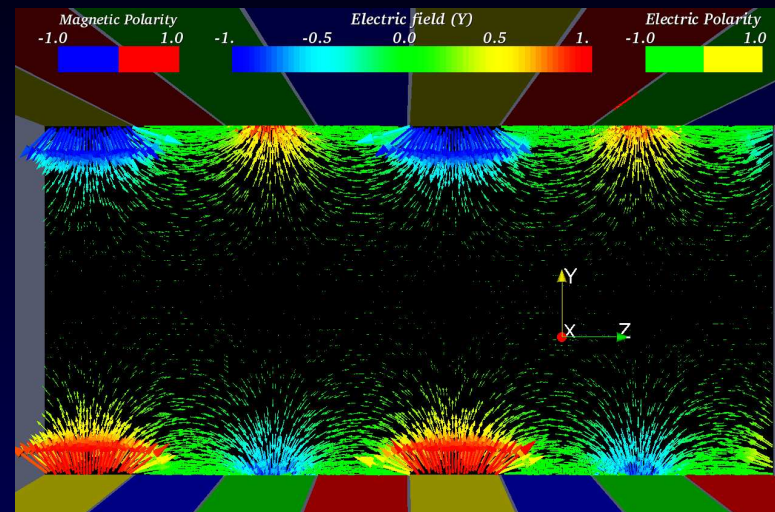


Modélisation des actionneurs générant les forces EM plus **réaliste** que *Berger et al*
(*PoF 2000*)

Induction magnétique :



Densité de courant électrique :



Champ de force :

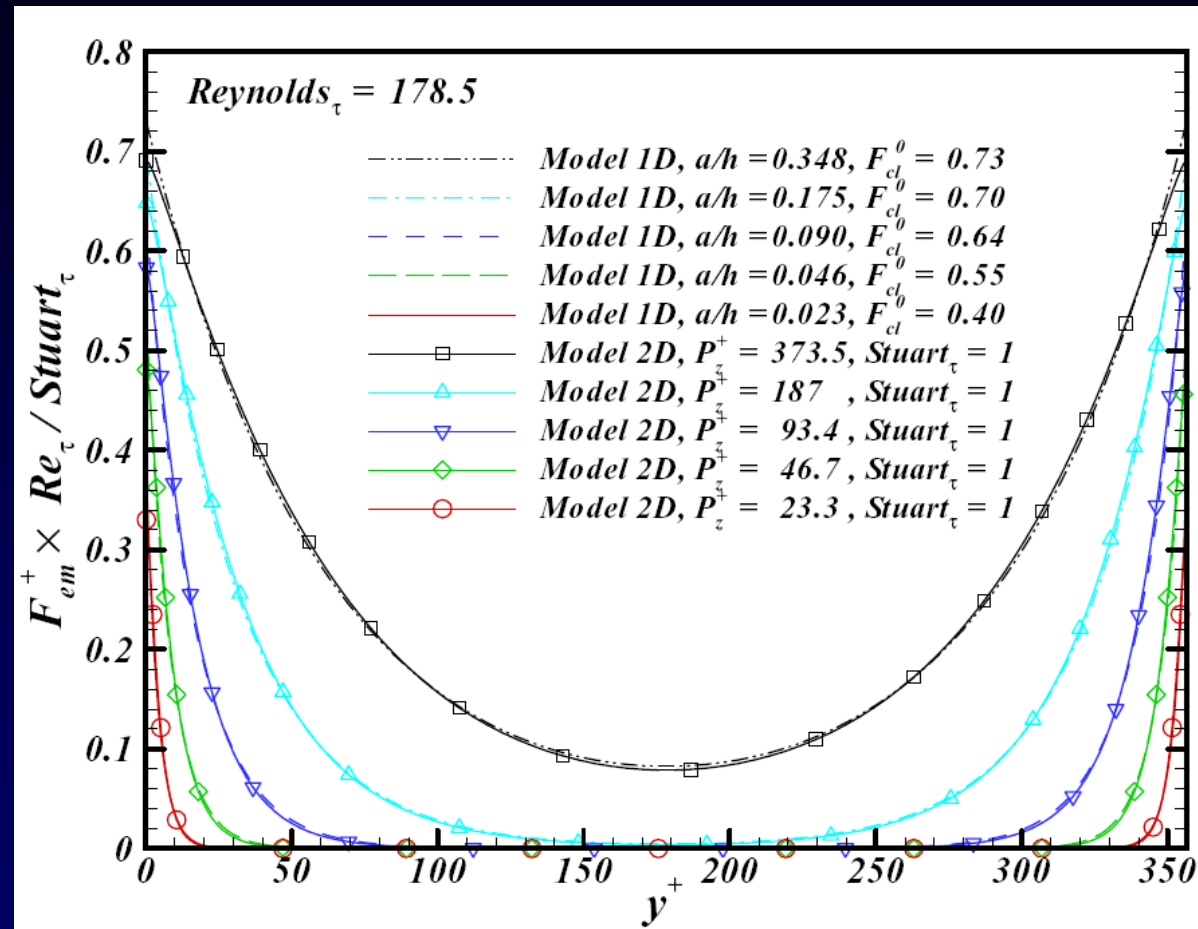
- Décroissance exponentielle
- Pics au niveau des arêtes

Originalité de l'étude :

Prise en compte des effets locaux des discontinuités de géométrie des actionneurs (modélisation des actionneurs plus précise)

Distribution moyenne des forces

Décroissance exponentielle en moyenne



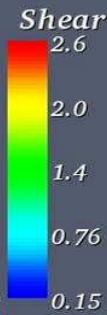
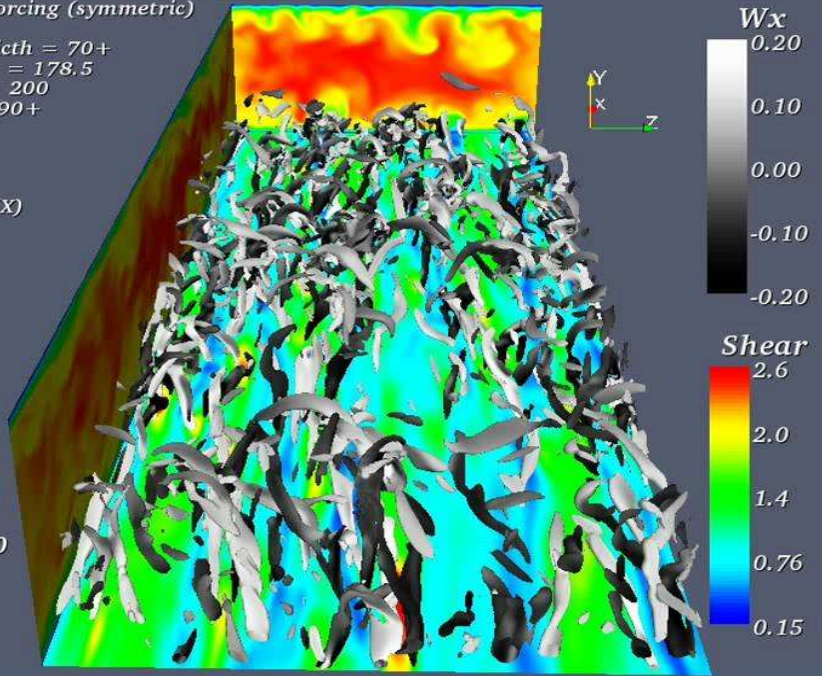
La **dimension** des actionneurs détermine la **profondeur de pénétration** des forces .

Forçage EM transverse oscillant

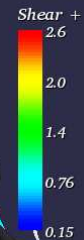
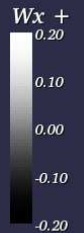
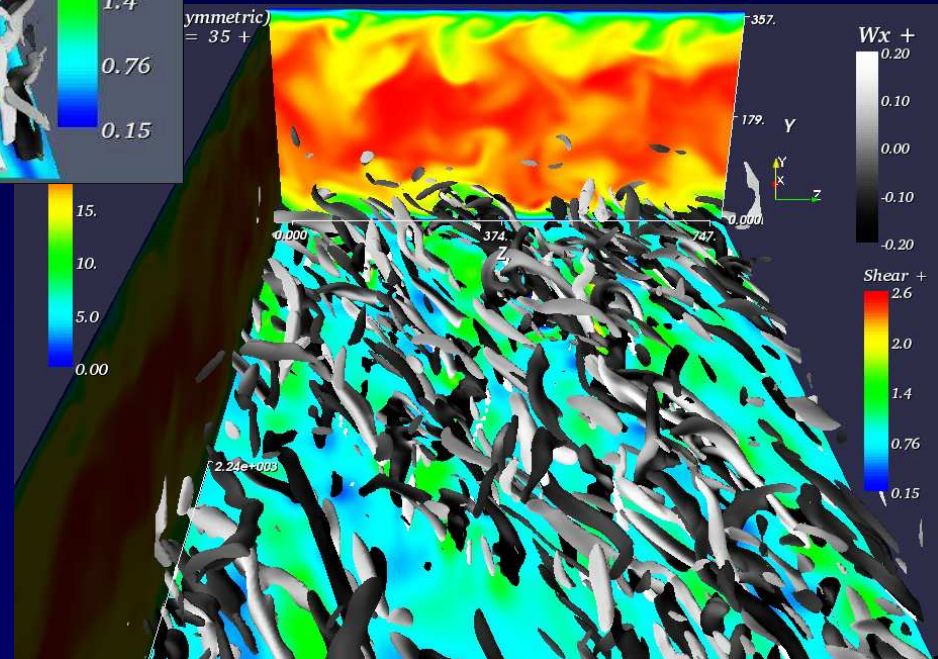
Spanwise forcing (symmetric)

- Magnet Pitch = 70+
- Reynolds* = 178.5
- Stuart* = 200
- Period = 90+

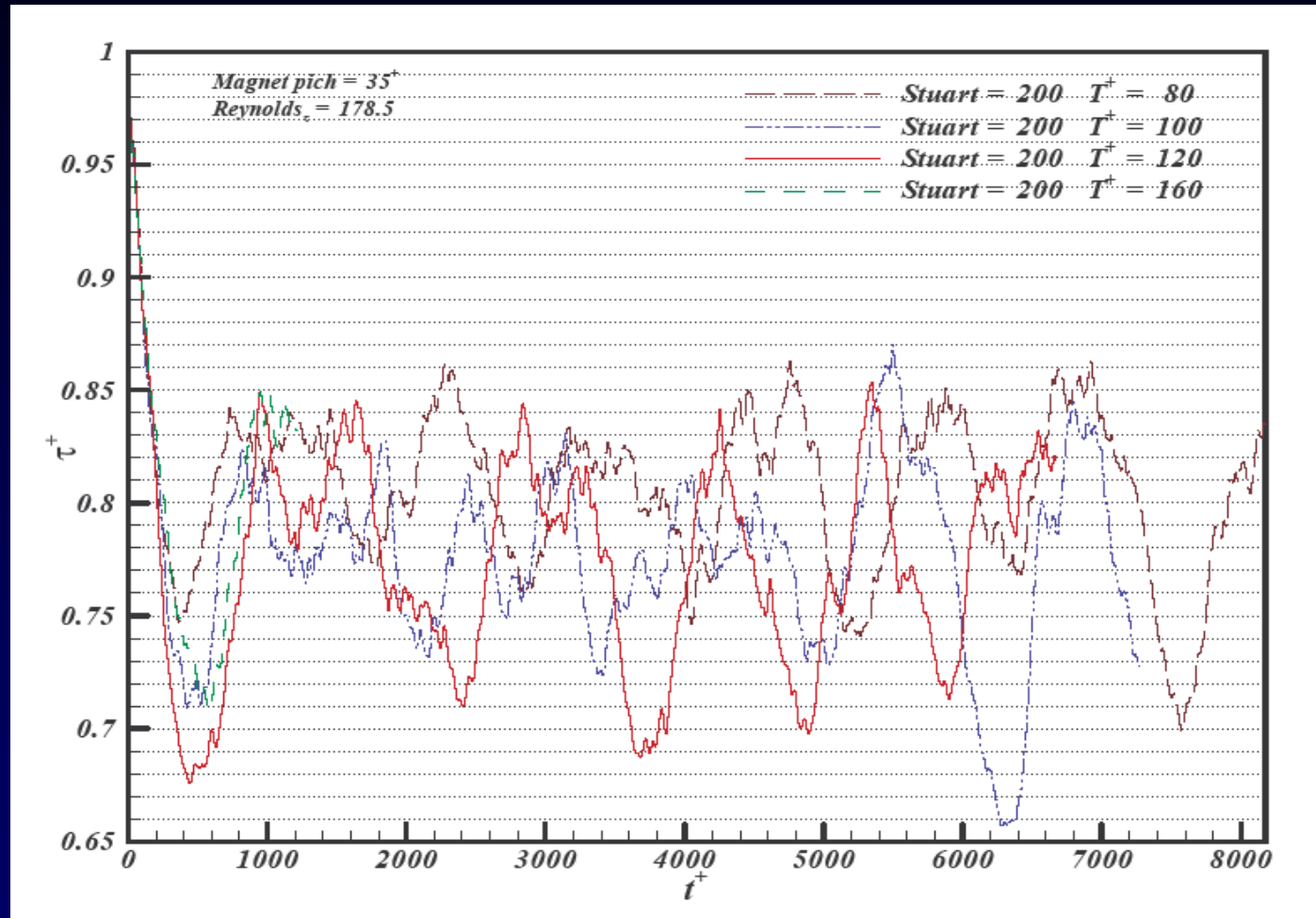
Velocity (X)



symmetric)
= 35 +

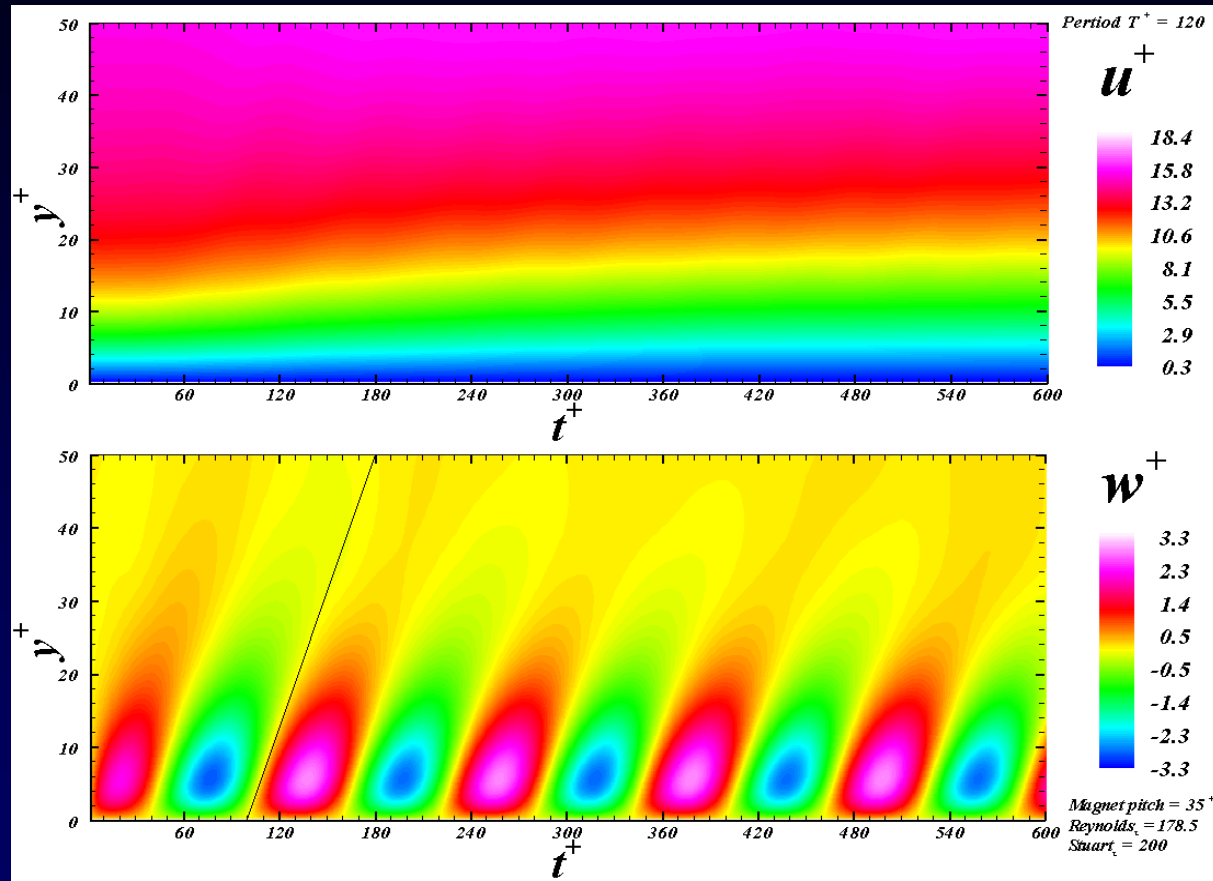


Contraintes moyennes de cisaillement pariétal



Mise en évidence des effets de la période d'oscillation (Stuart fixé)

Vitesses moyennes (plan xz):



Composante longitudinale:

Épaississement de la sous -
couche visqueuse

$$Stuart_{\tau} = 200$$

$$T^+ = 120$$

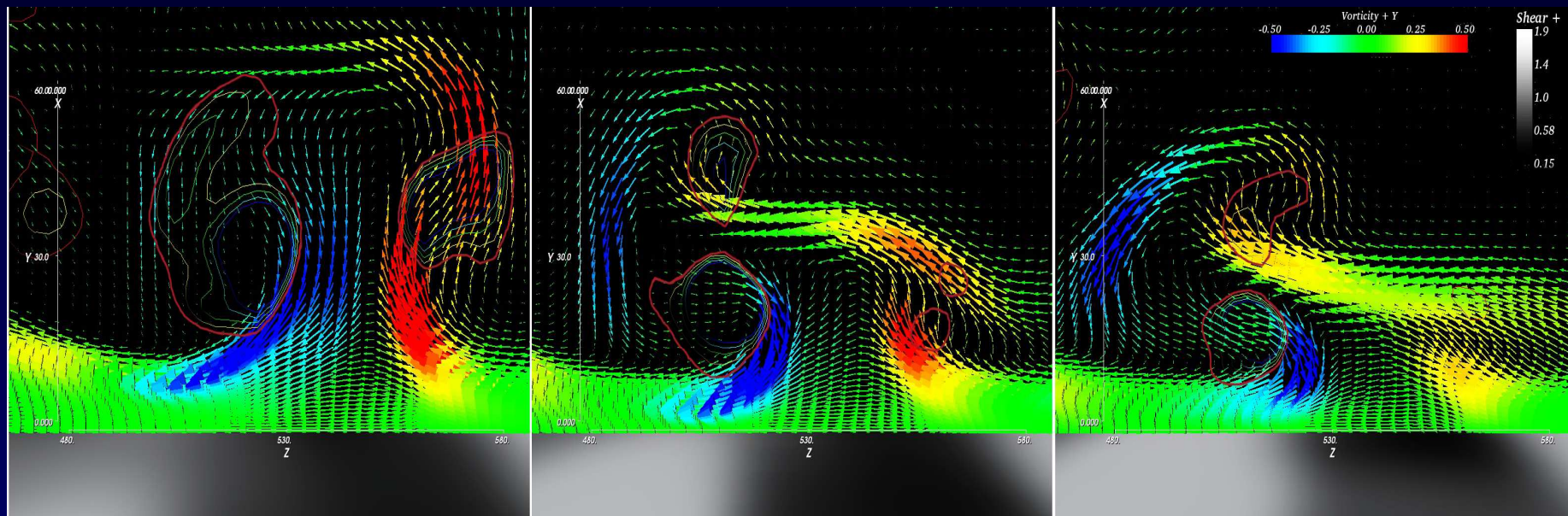
$$P_x^+ = 35$$

Composante transverse:

Oscillation de la vitesse transverse (max en $y^+ = 6$)

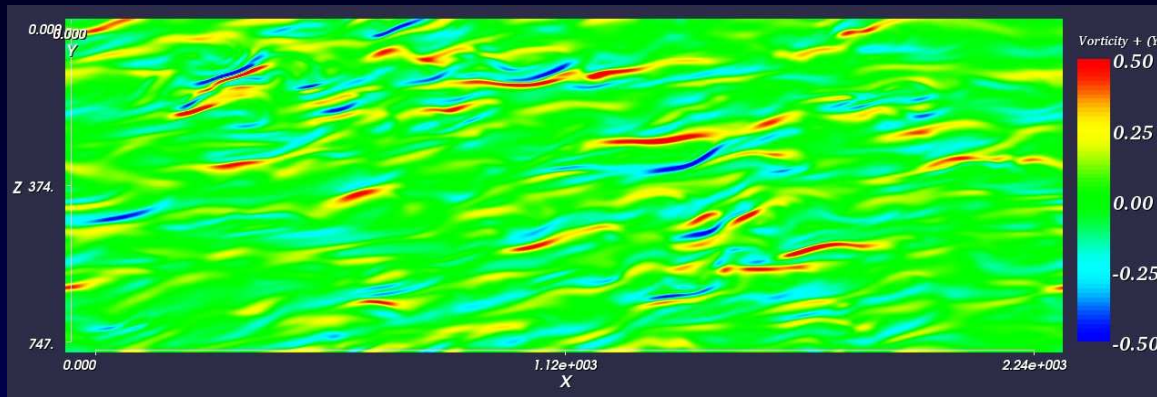
Propagation de la perturbation vers les y croissants

Coupe (yz) de vorticité colorée par sa composante normale :

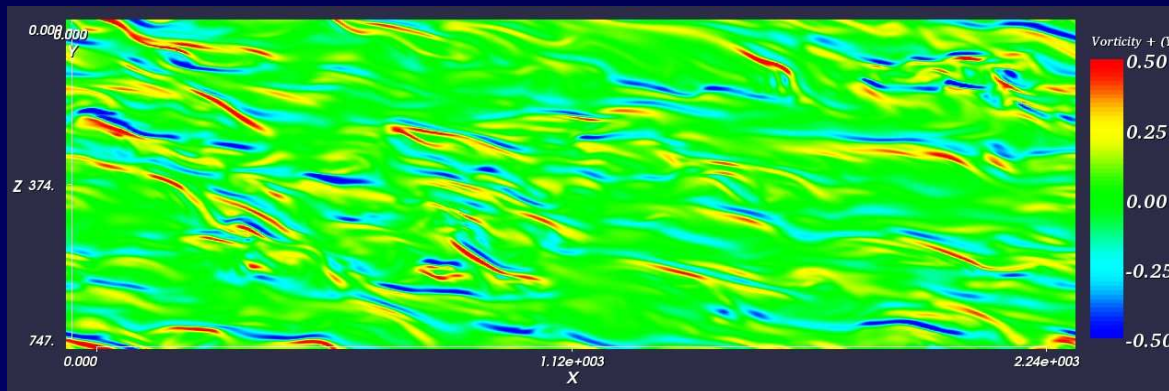


Inclinaison des structures turbulentes suivant la direction transverse

Composante normale de vorticité ($y^+ = 15$)



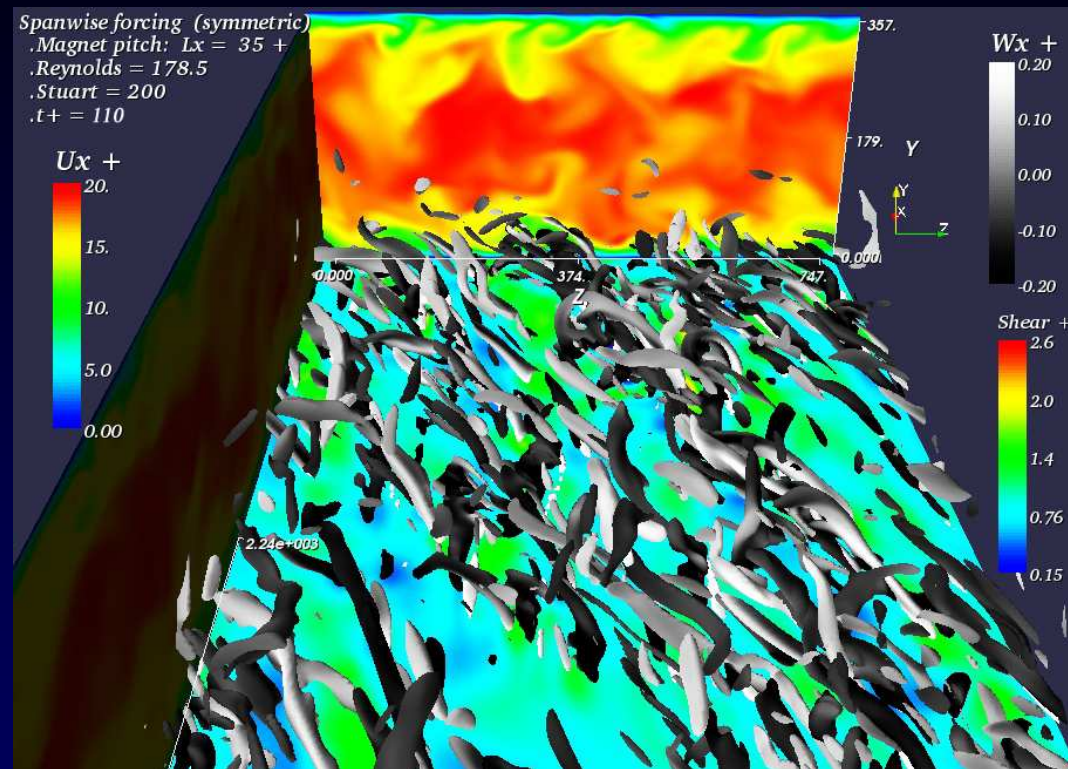
$t = 1/4 T$



$t = 3/4 T$

Déviations des fluctuations de la composante normale de vorticité

Structures vorticitaires turbulentes



L'écoulement transverse de proche paroi génère

⇒ Déviation de la partie basse des structures turbulentes (partie haute non affectée)

⇒ Inclinaison des structures turbulentes

⇒ Décorrélation spatiale des mécanismes de production des structures turbulentes

-réduction du cisaillement pariétal

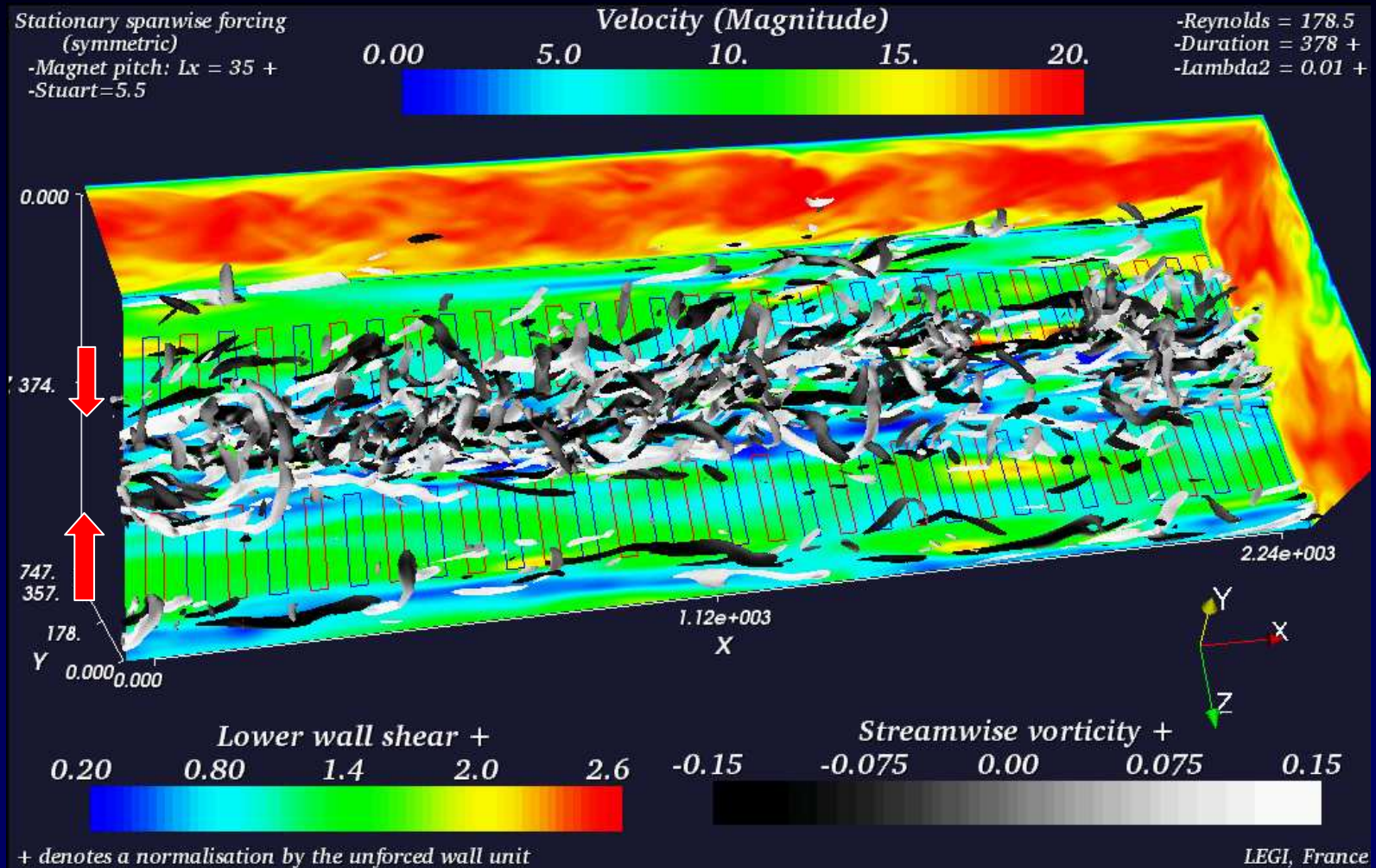
-réduction des fluctuations liées à la turbulence

Conclusion sur le forçage EM transverse oscillant

- L'**implémentation** de la modélisation **réaliste** du forçage a été **validée**:
 - Berger et al (*PoF 2000*)
 - Choi (*PoF 2002*)
- Les **mécanismes** de réduction de traînée ont été approfondis dans le cas du forçage transverse
- Le **bilan énergétique** net n'est **pas bon** (Stuart 200 trop élevé)

Forçage électromagnétique permanent transverse alterné

Forçage permanent transverse alterné

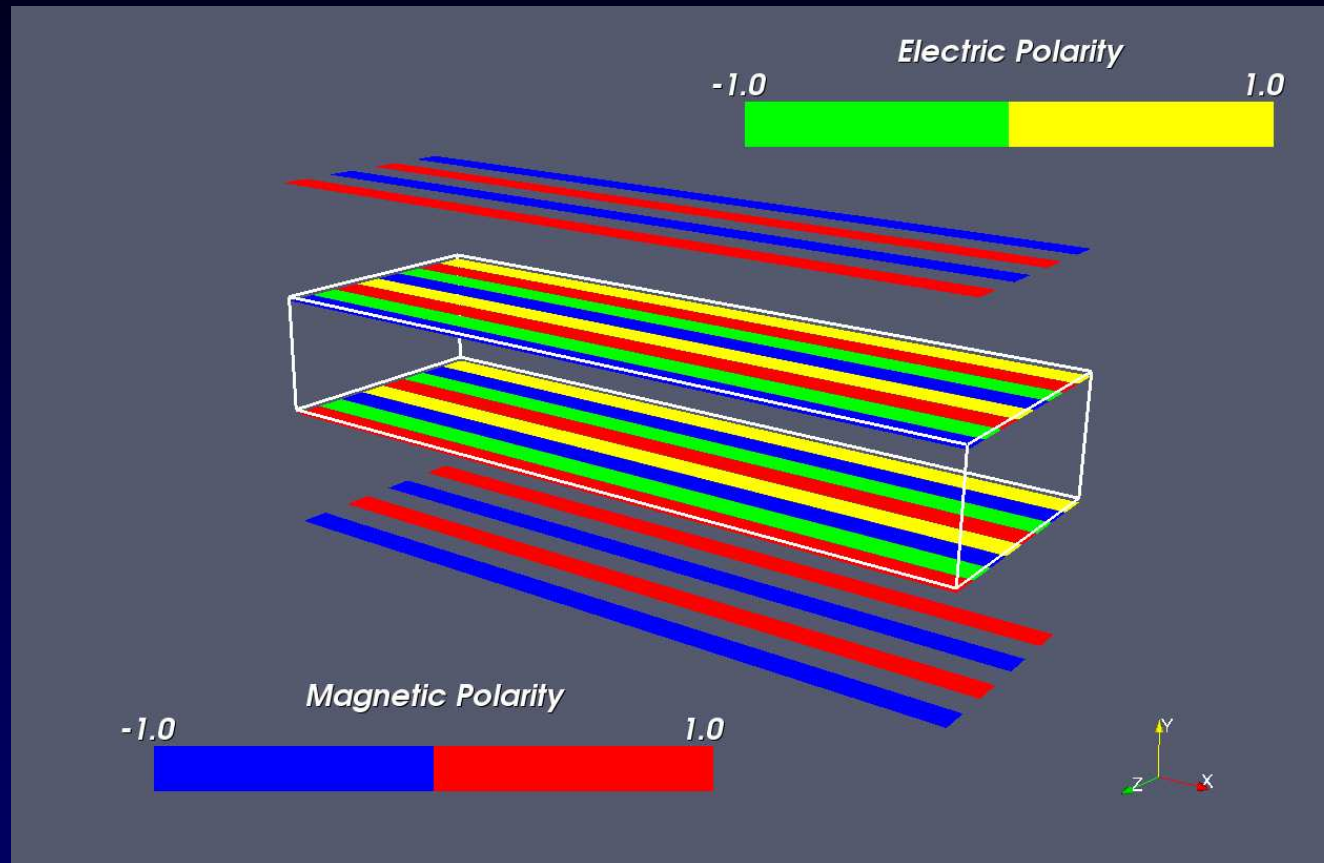


Schoppa & Hussain PoF 1998

Effet similaire à une aspiration → les fluctuations diminuent

Forçage électromagnétique longitudinal

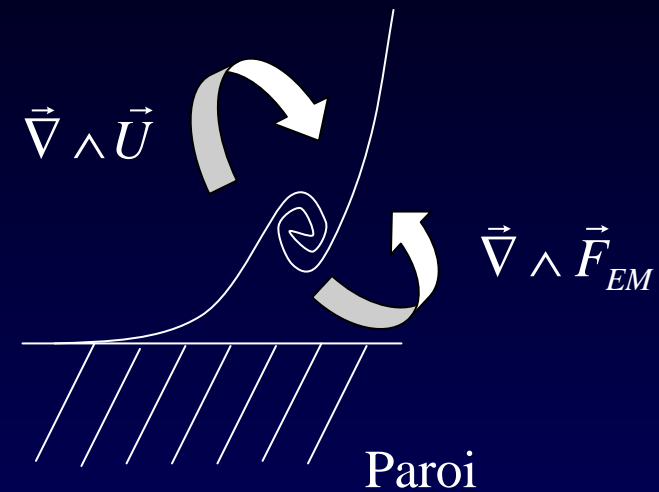
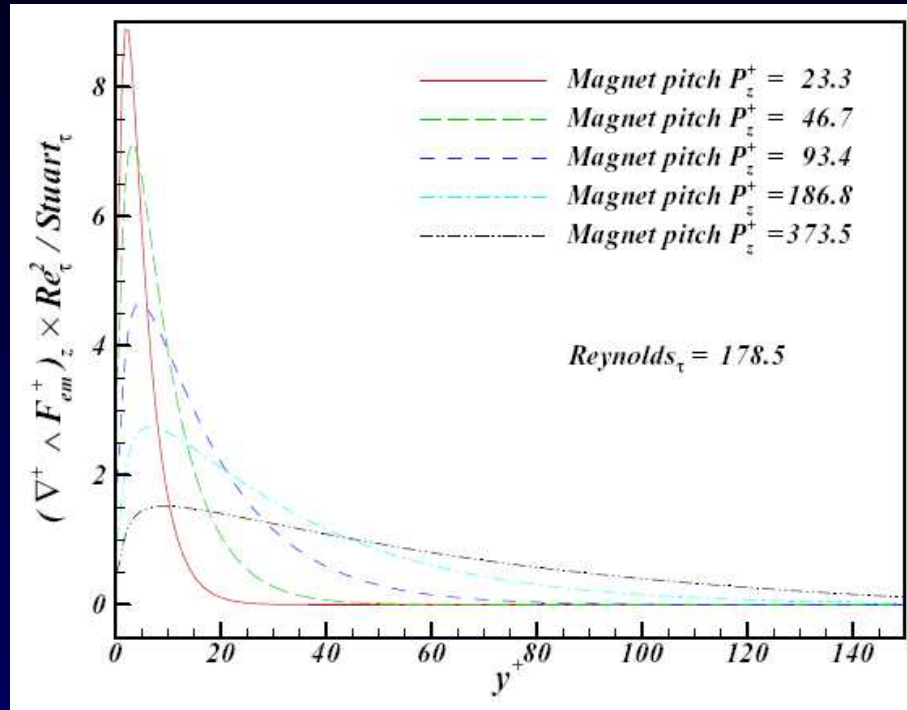
Position des électrodes et des aimants dans le canal



Différence avec Crawford et Karniadakis (*PoF* 1997):

- *Modélisation des forces plus précise*
- *Intensité du forçage plus faible (stuart ~ 10)*

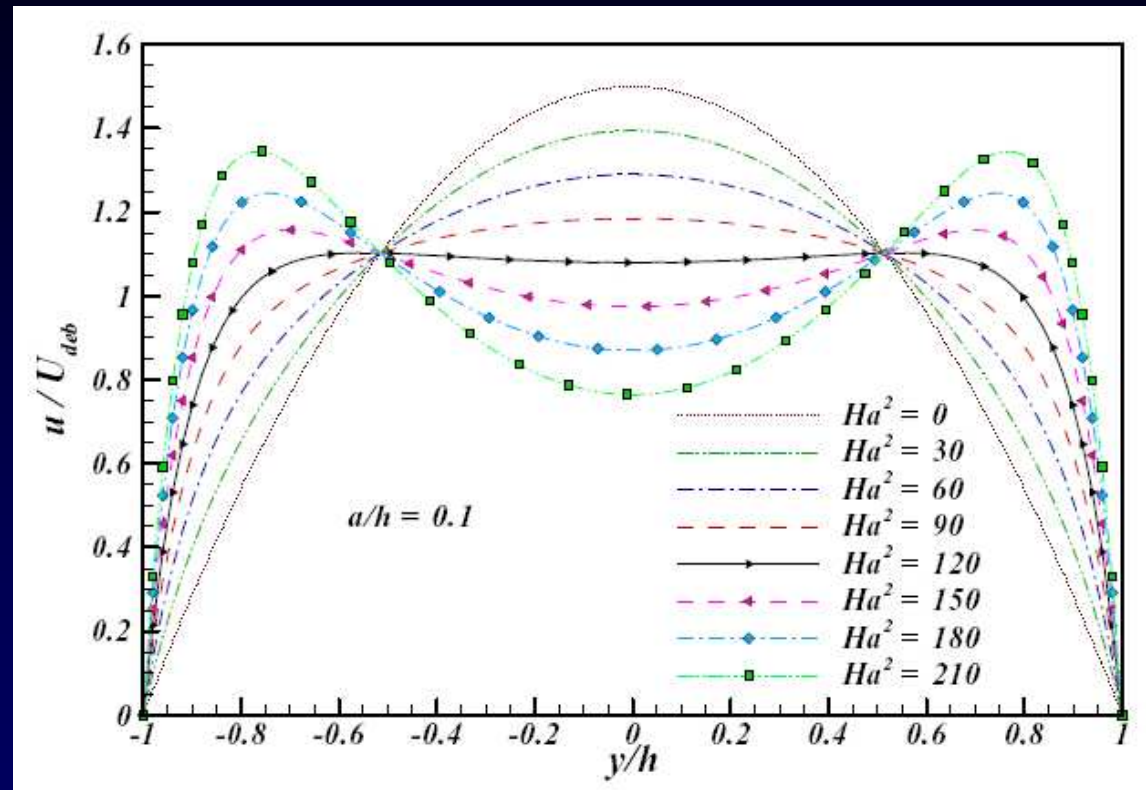
Distribution du rotationnel de la force moyenne



Signe opposé à la vorticité transverse de l'écoulement

La **dimension** des actionneurs détermine la **profondeur de pénétration** du rotationnel des forces .

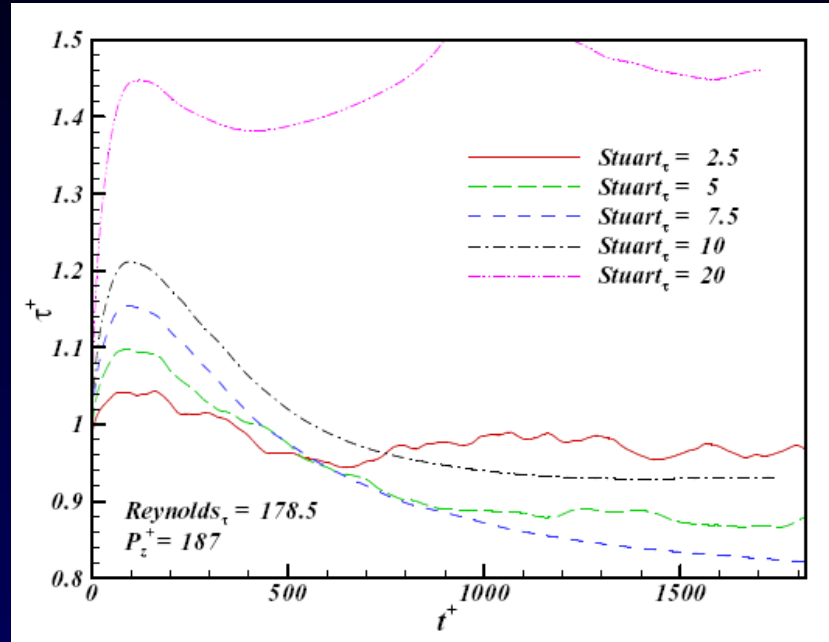
Profils de vitesse dans le cas laminaire 1D



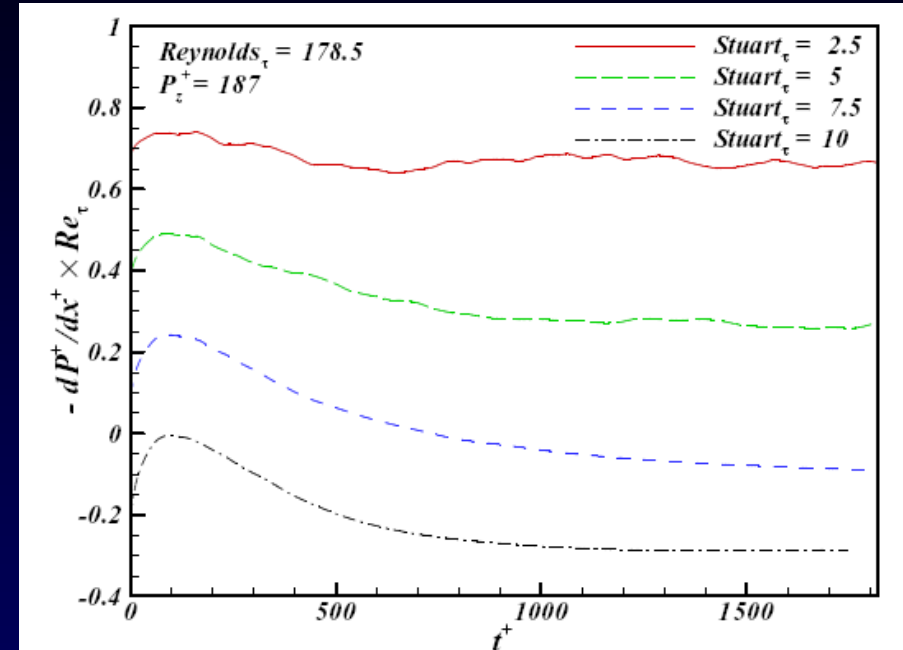
• *Influence de l'intensité du forçage à débit constant :*

Génération de **jets** près de la **paroi**

Echelon de forçage:



Contrainte moyenne de cisaillement
pariétal

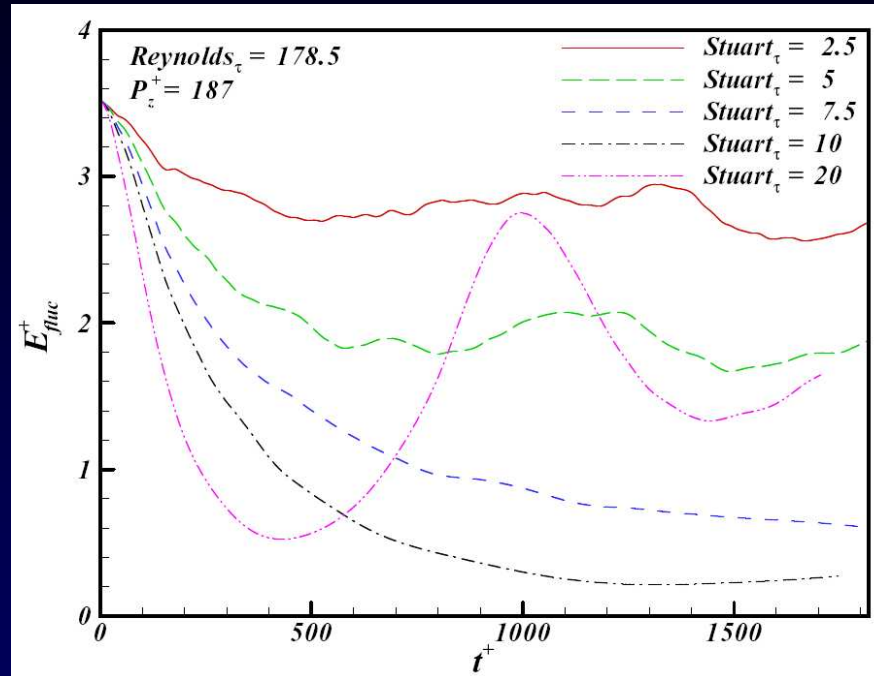


Force moyenne de pression

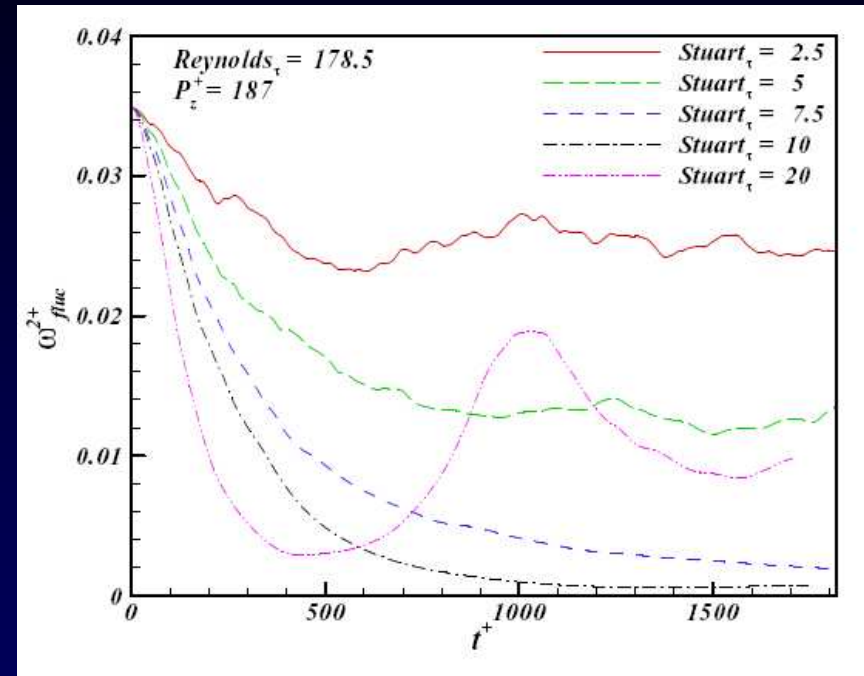
$$F_p = 0 \rightarrow F_{EM} = F_v$$

$$F_p < 0 \rightarrow \text{Pompe EM}$$

Echelons de forçage :



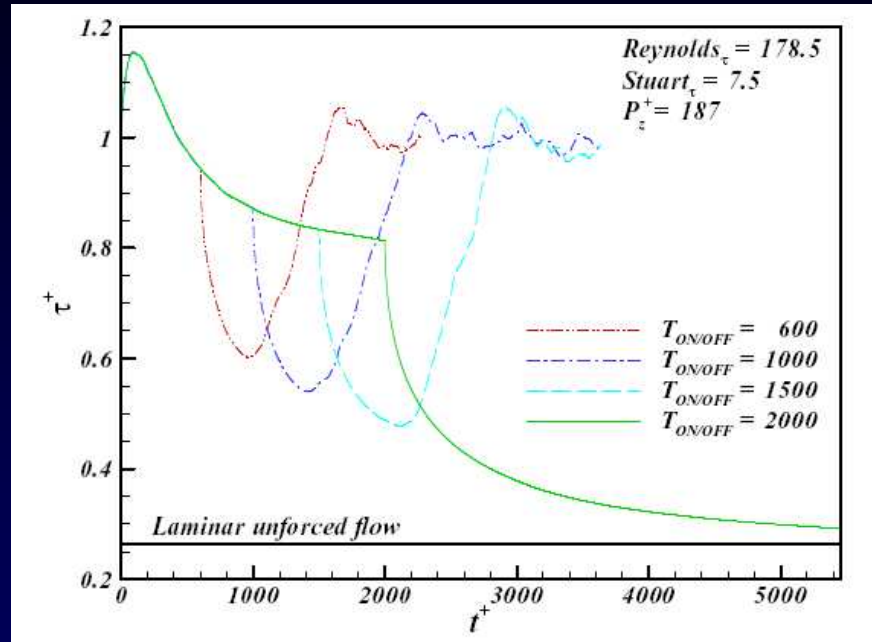
Energie des fluctuations



Enstrophie des fluctuations

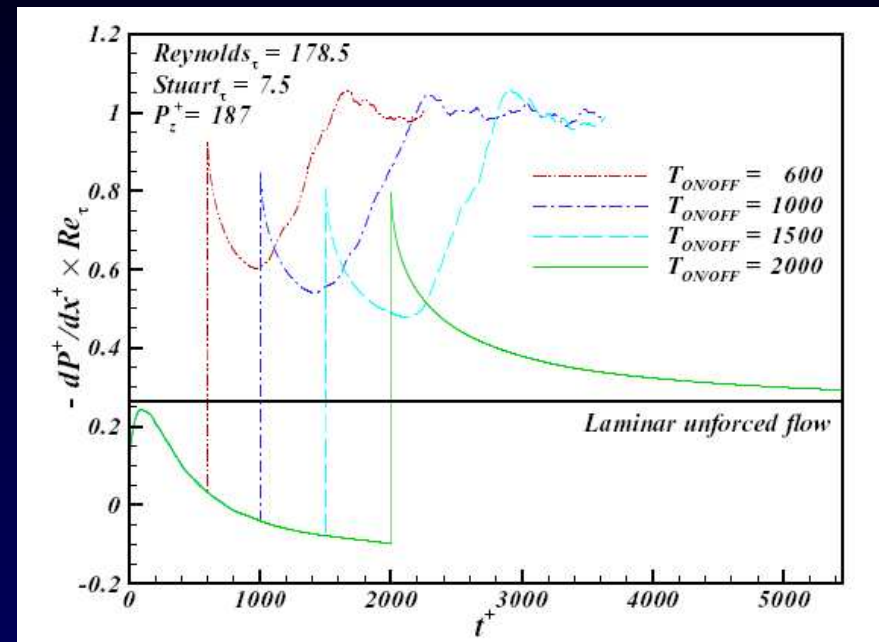
Réduction des fluctuations de l'écoulement

Relaxation :



**Relaxation rapide de la contrainte moyenne
de cisaillement pariétal**

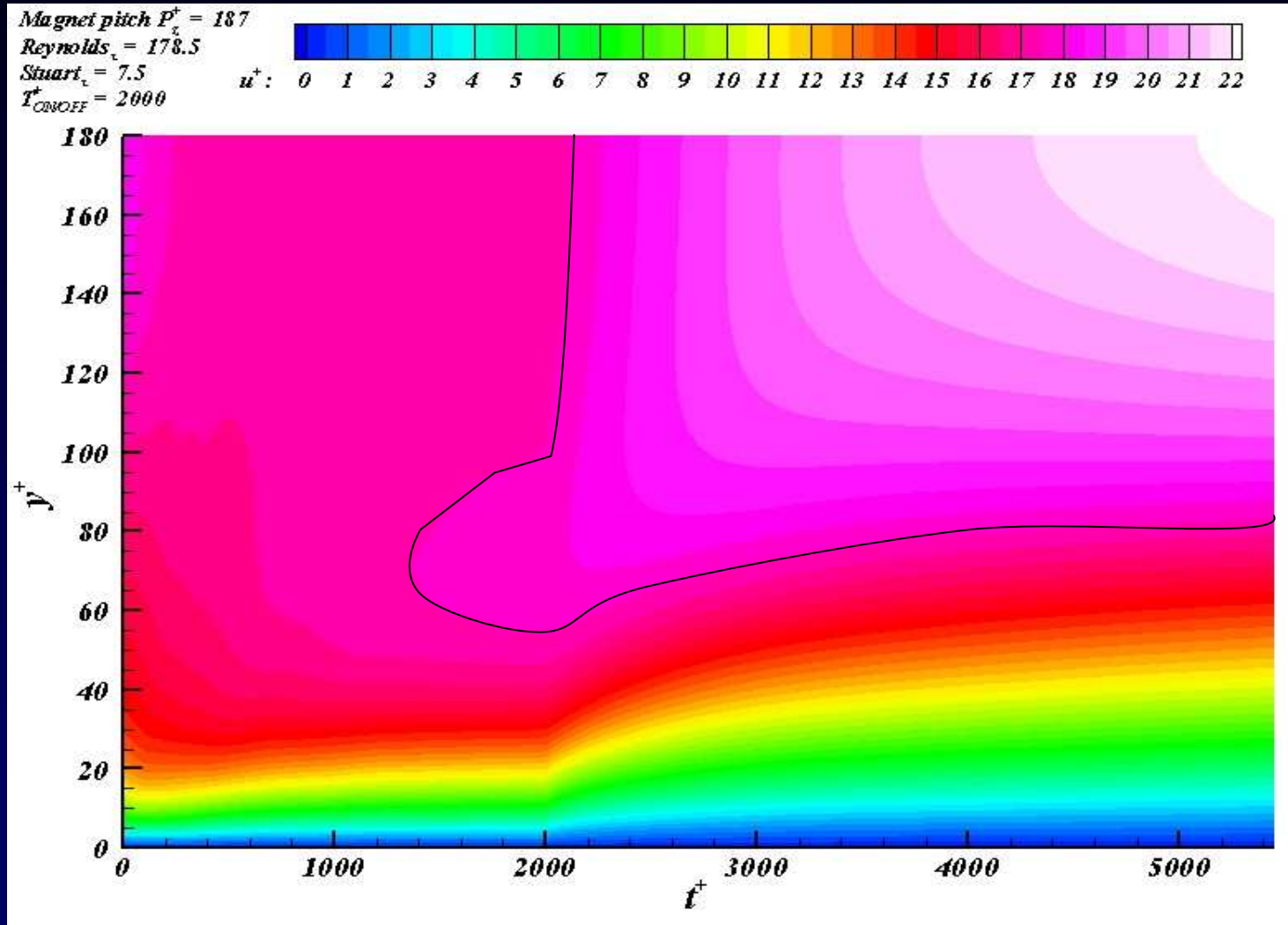
(plus de forçage propulsif près de la paroi)



Gradient de pression

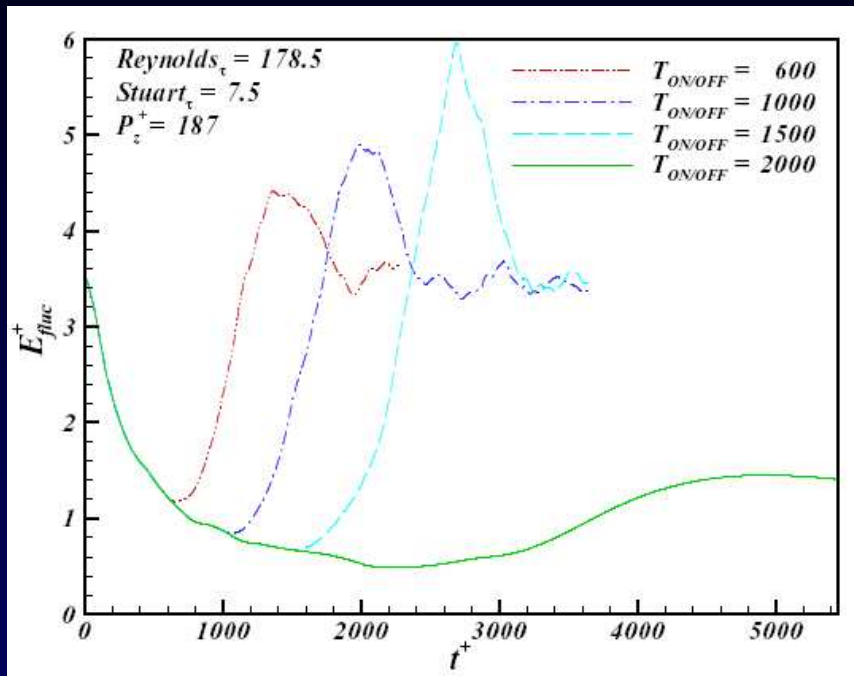
Relaxation :

Vitesse moyenne

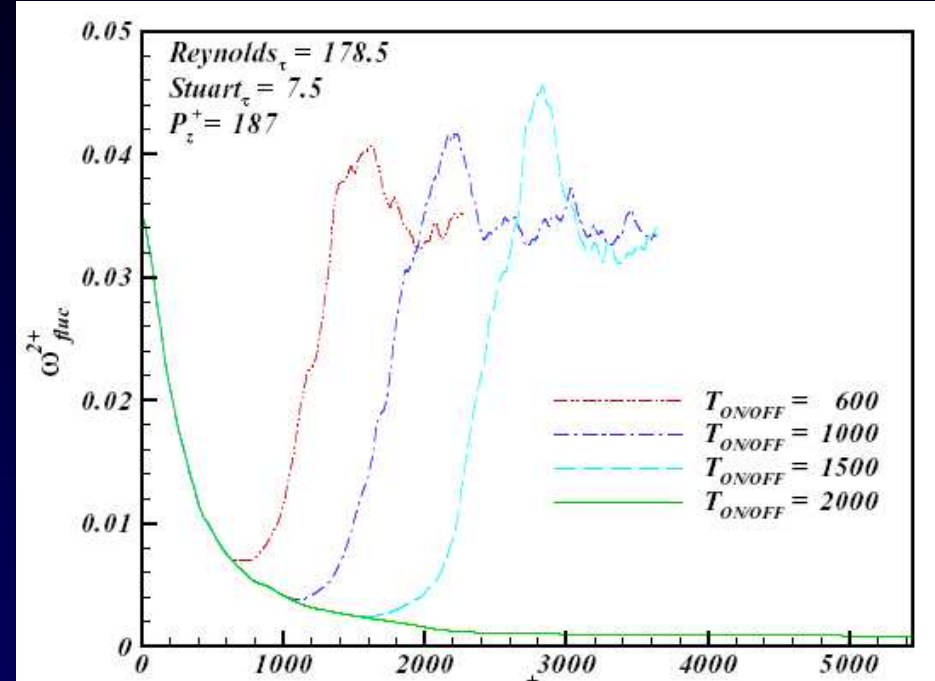


$T_{ON/OFF} = 2000$

Relaxation :



Energie des fluctuations

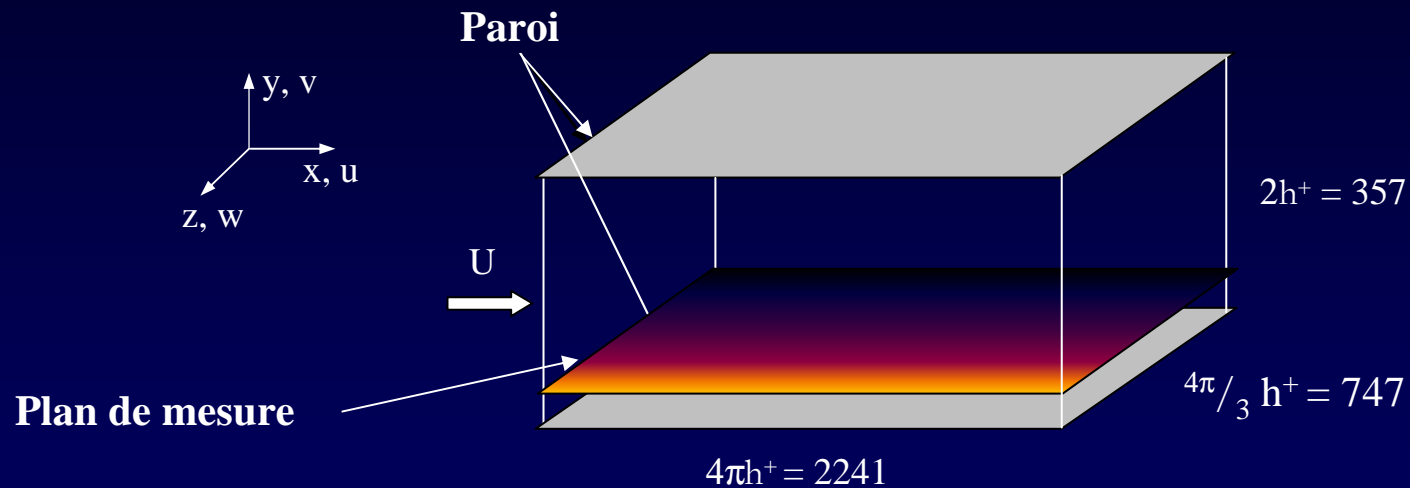


Enstrophie des fluctuations

Forçage électromagnétique longitudinal interactif

Forçages propulsifs interactifs

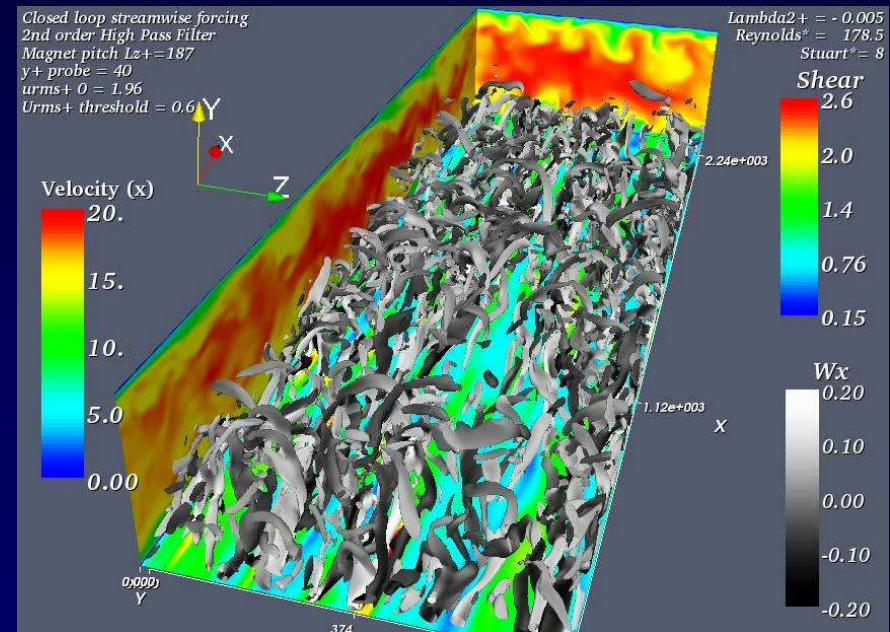
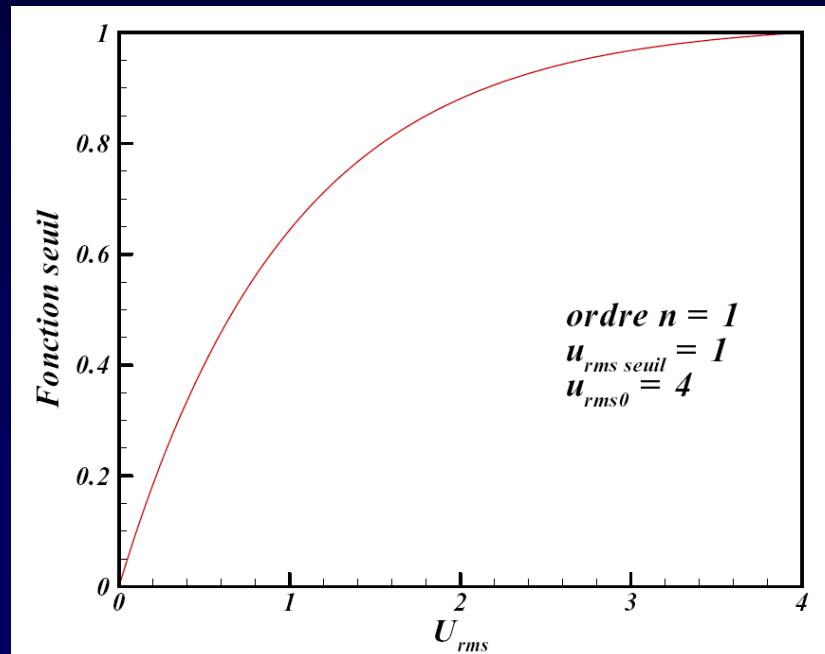
- Intensité du forçage conditionnée par les fluctuations de l'écoulement à une altitude fixée y^+_{sonde}



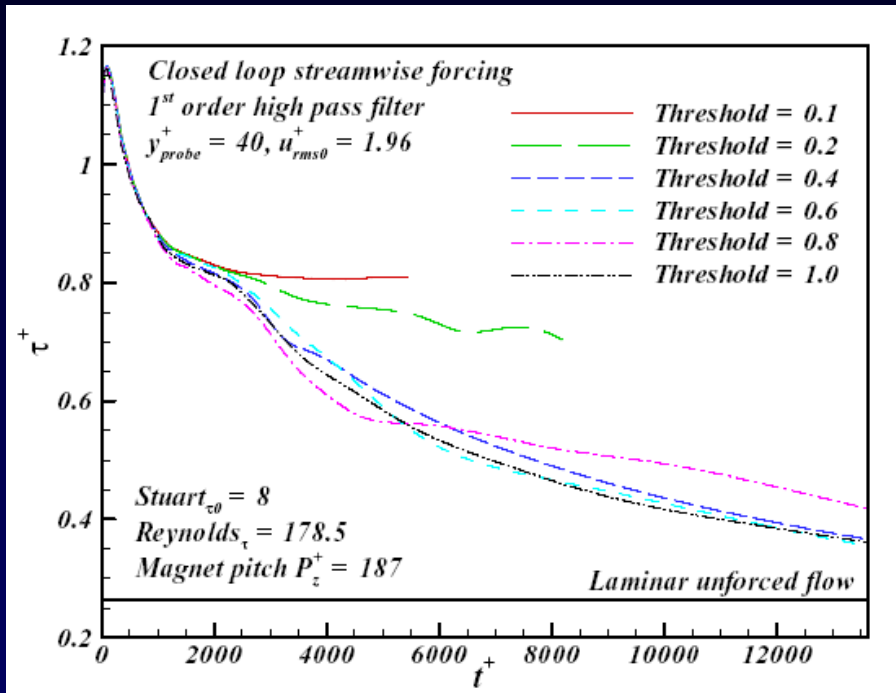
- Forçage proportionnel aux fluctuations de vitesse
- Forçage proportionnel aux fluctuations de vorticité
- Forçage conditionné par un niveau de seuil

Forçages propulsifs interactifs

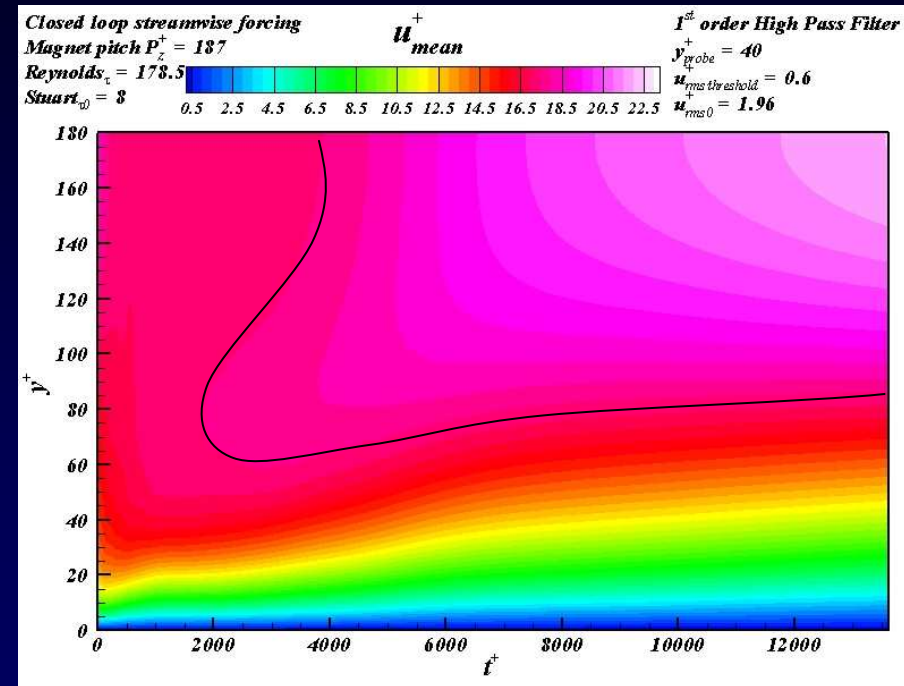
$$\vec{F}_{em}^+ = \frac{Stuart\tau_0}{Re\tau_{Hinse}} \times \frac{1 - \exp\left(-\left(\frac{u_{rms}(y_{sonde}^+)}{u_{rms\text{seuil}}}\right)^n\right)}{1 - \exp\left(-\left(\frac{u_{rms0}(y_{sonde}^+)}{u_{rms\text{seuil}}}\right)^n\right)} \times \vec{j}^* \wedge \vec{B}^*$$



Forçages propulsifs interactifs : Influence du niveau de seuil

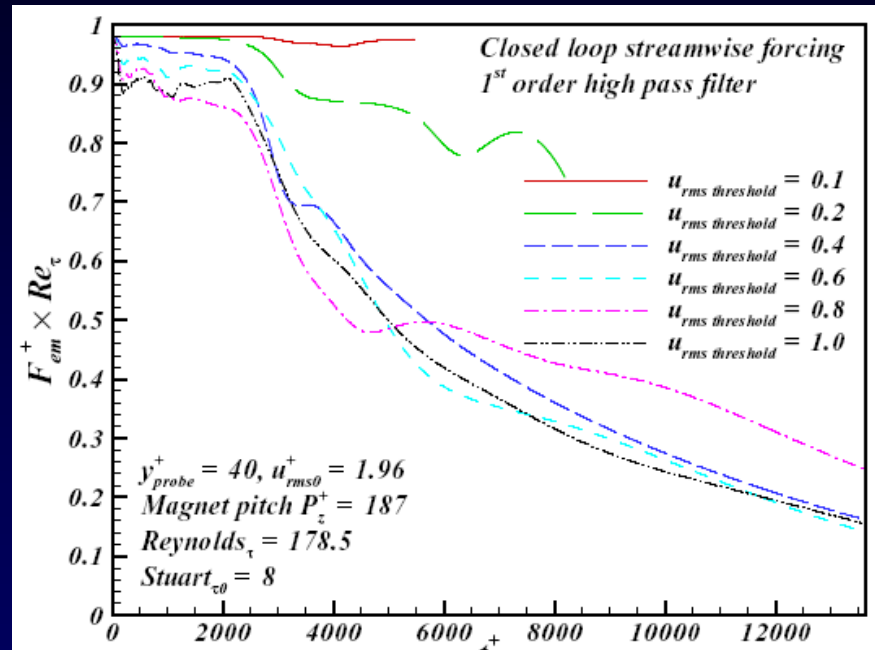


Contrainte moyenne de cisaillement
pariétal

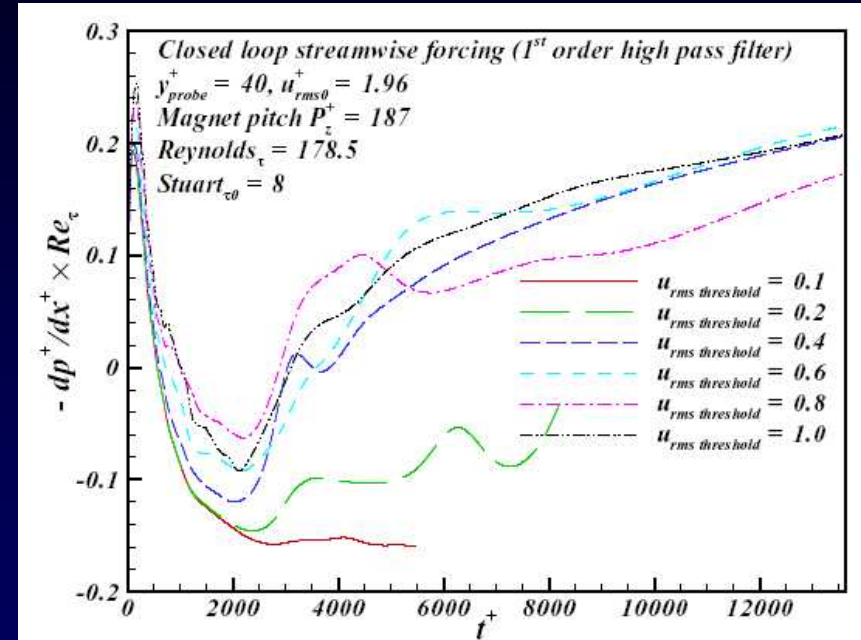


Vitesse moyenne

Forçages propulsifs interactifs : Influence du niveau de seuil

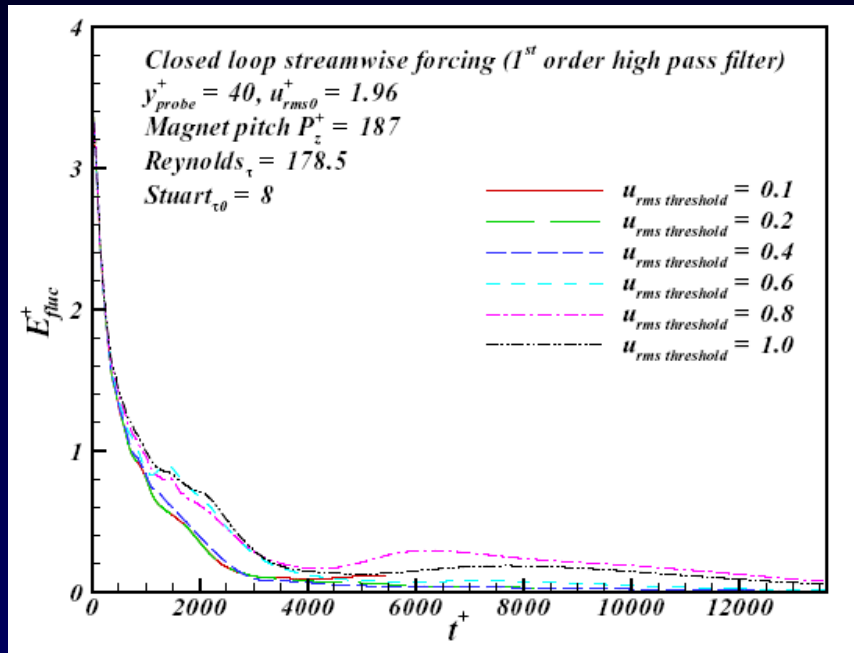


Force électromagnétique moyenne

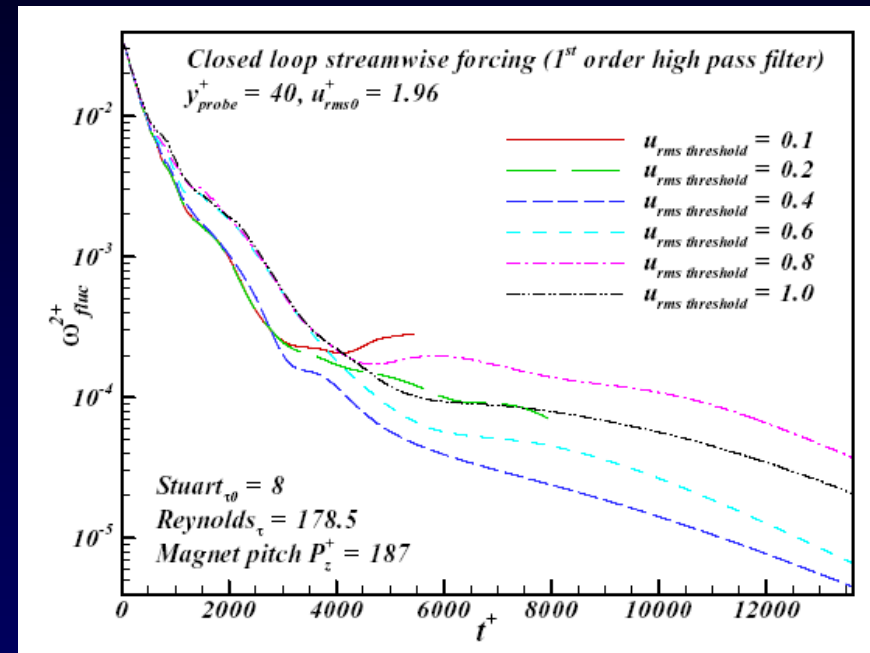


Gradient de pression moyen

Forçages propulsifs interactifs



Energie des fluctuations



Enstrophie des fluctuations

Bilan énergétique

Pour un canal hydrodynamique:

Viscosité cinématique :	$10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Demi - hauteur :	10^{-1} m
Vitesse débitante :	$2,8 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
Vitesse de frottement :	$1,8 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

$$\text{Re}_\tau = \frac{u_\tau h}{\nu} \approx 180$$

$$\text{Stuart}_\tau = \frac{jBh}{\rho u_\tau^2} \approx 1,6$$

Puissance surfacique de l'écoulement non forcé : $P_0 = \rho u_\tau^2 \times U_{deb} = 9 \cdot 10^{-5} \text{ W} / \text{m}^2$

Densité de courant : $j = 0,05 \text{ A} / \text{m}^2$

Puissance surfacique électrique : $0,3 P_0$

Puissance surfacique des forces de pression : $0,2 P_0$

Puissance électrolyse (4V) : $0,2 P_0$

Total : $0,7 P_0$

Conclusion sur le forçage longitudinal

- Forçage propulsif interactif : Bilan net **positif**
- **Relaminarisation** de l'écoulement avec une **faible** intensité de forçage
- Actionneurs de géométrie et **dimension réalistes** (*grandes échelles \neq MEMS*)
 - Echelle actionneur = profondeur pénétration des forces

Perspectives

- **Dimension des actionneurs**
 - Dépendance aux échelles interne ou **externe** de l'écoulement ?
 - Effet du nombre de Reynolds ?
 - L.E.S. (simulations des grandes échelles) envisageables ?
- **Compréhension**
 - Analyser les équations de transport (vorticité, contraintes de Reynolds)
 - Analyse modale (ondelettes, POD)
- **Défi aux expérimentateurs**
 - Capteurs des fluctuations de vitesse en $y^+ = 40$ réalisable expérimentalement ?

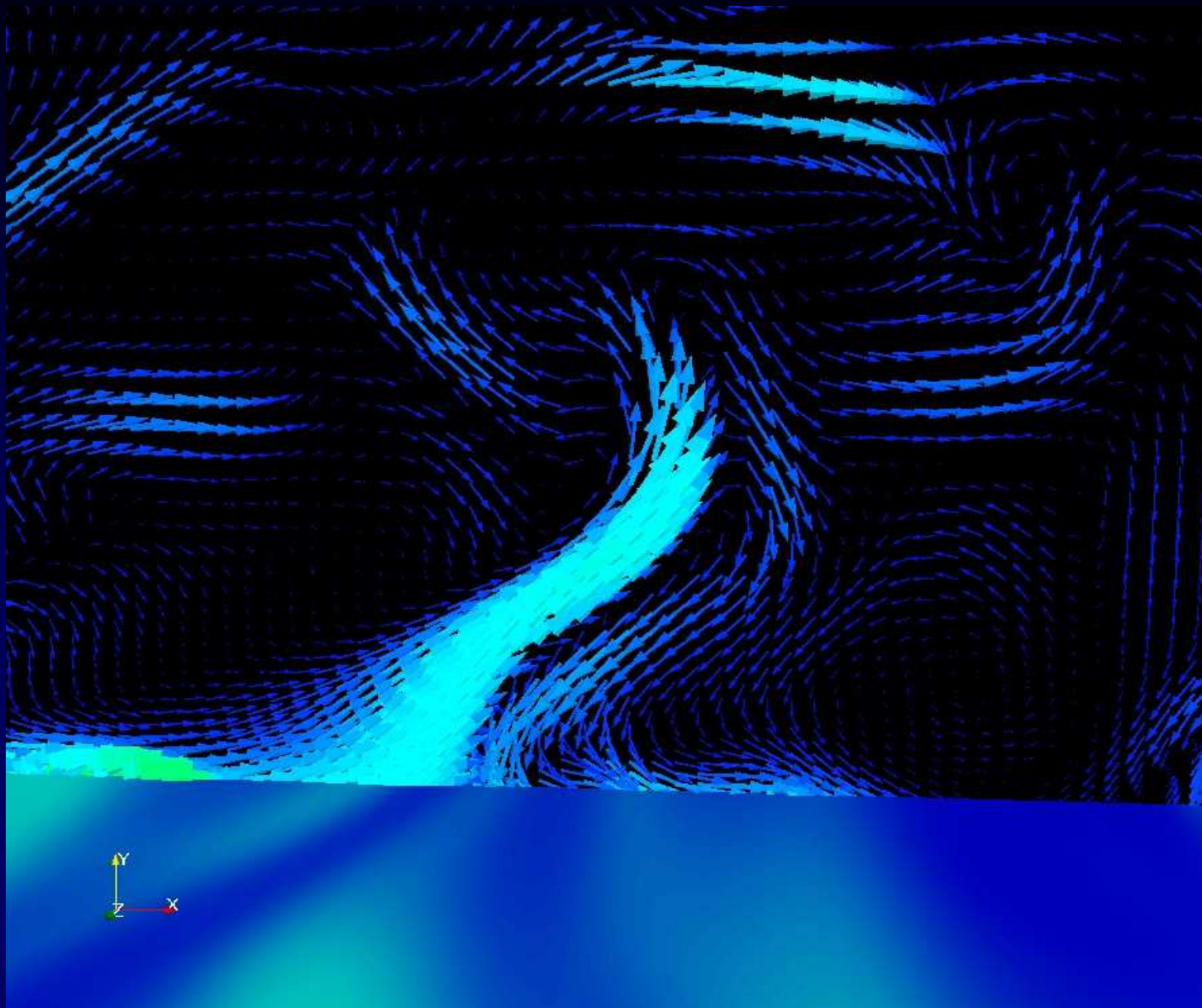
Merci pour votre attention !

Merci à mes directeurs de thèse

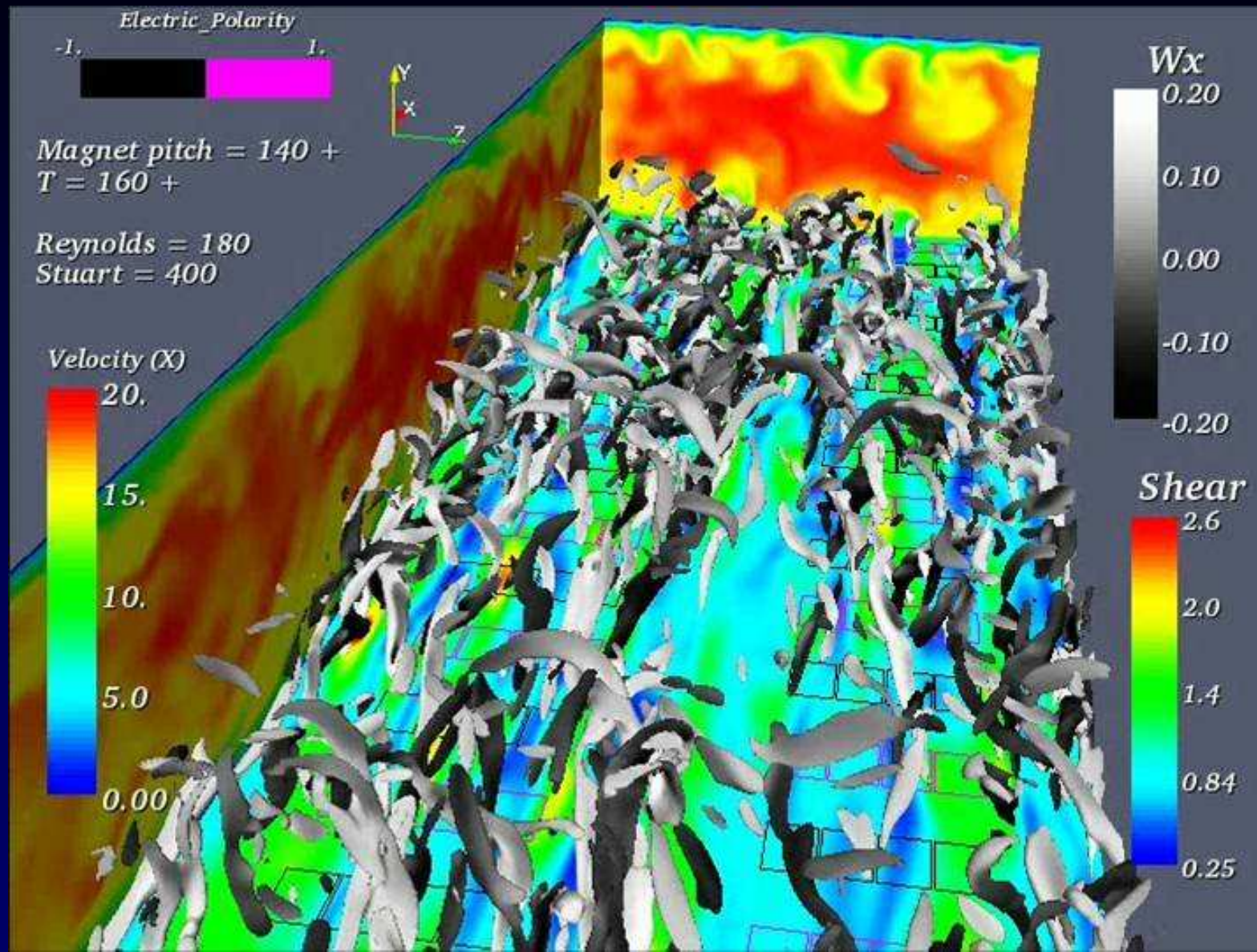
Merci à ma famille

Merci à tous ceux qui m'ont aidé

Questions ?



Alternative: ondes progressives



Forçage transverse en opposition

Stationary spanwise forcing (symmetric)

- Magnet size: $L_x = 35 +$
- Pattern width: $L_z = 374 +$
- Stuart=5.5

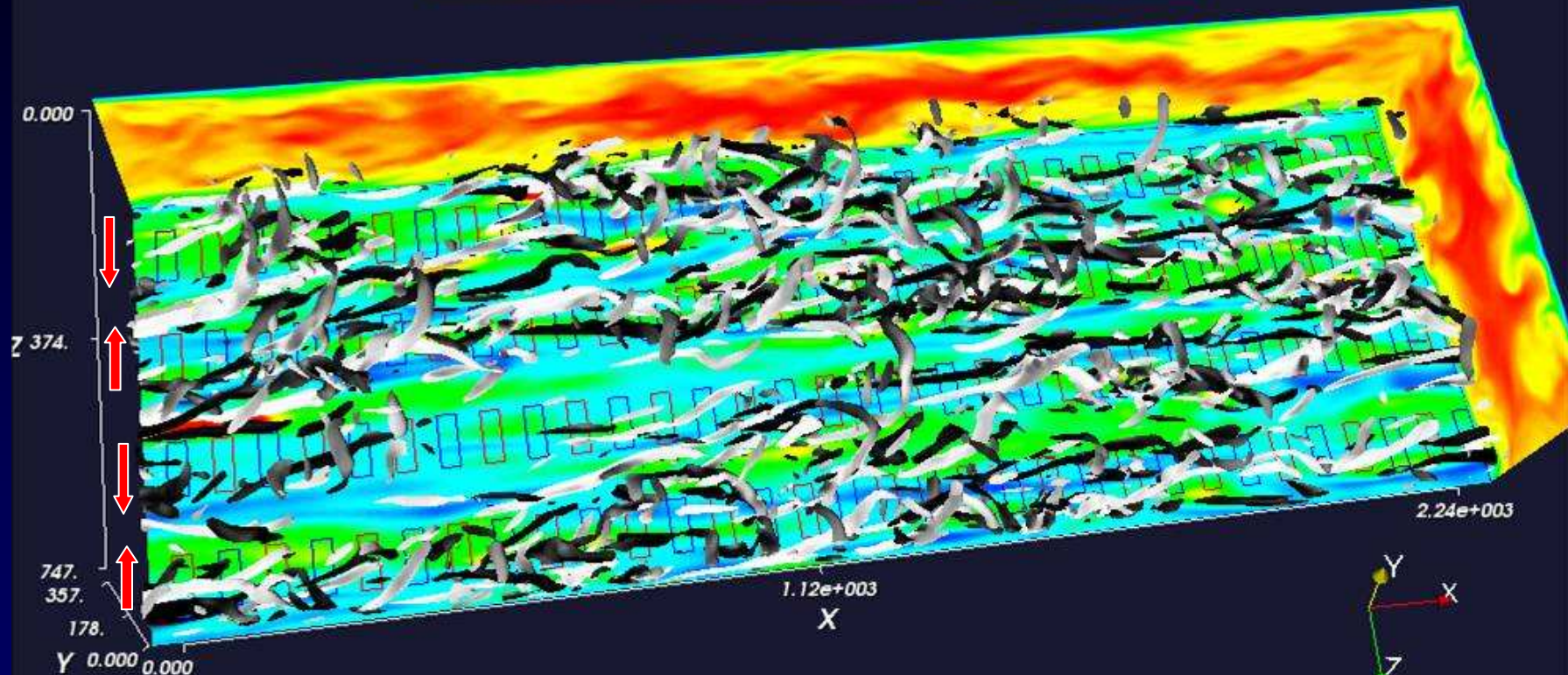
Velocity + (Magnitude)

0.00 5.0 10. 15. 20.

-Reynolds = 178.5

-Duration = 227 +

-Lambda2 = 0.01 +



Lower wall shear

0.15 0.76 1.4 2.0 2.6



Streamwise vorticity +

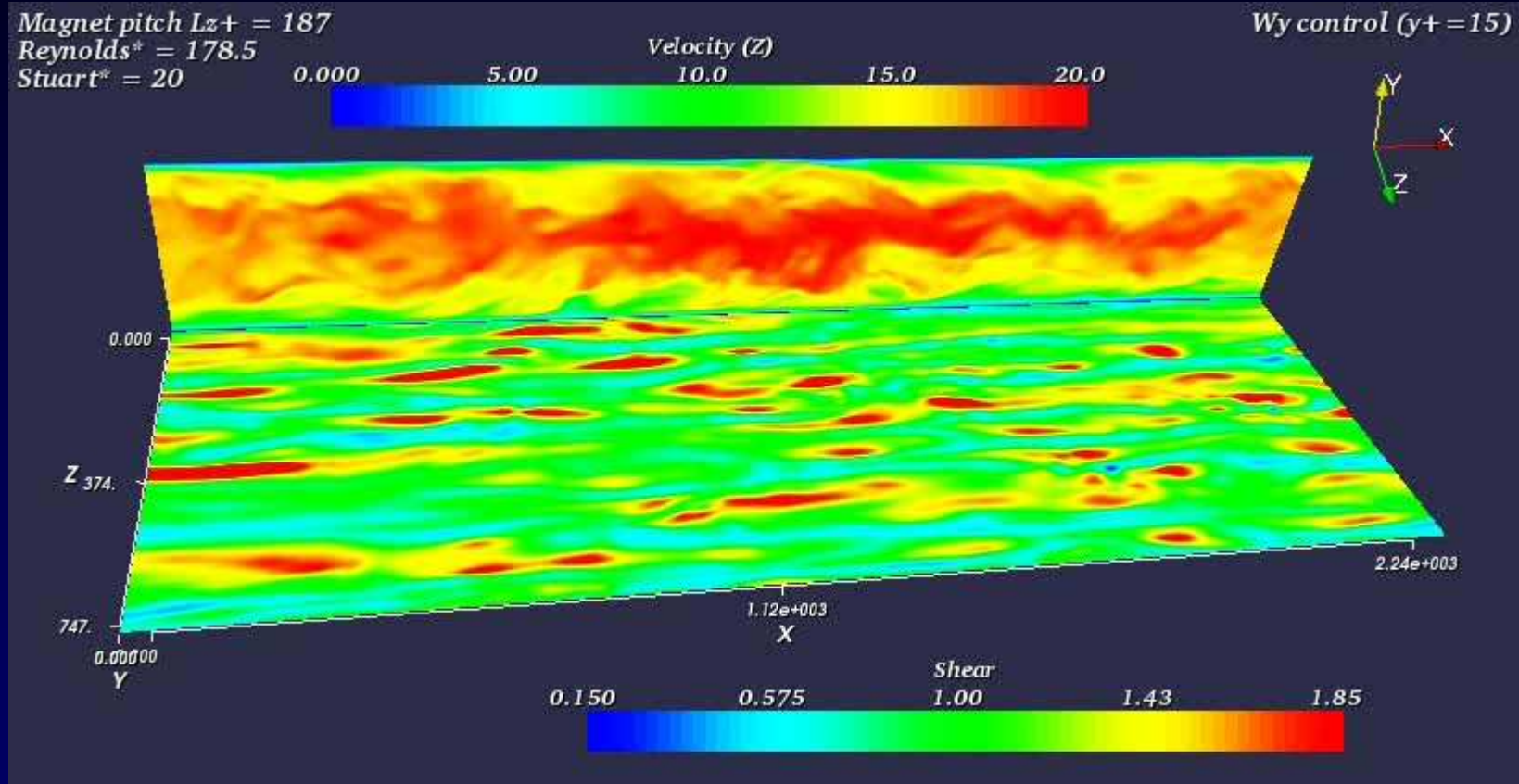
-0.15 -0.075 0.00 0.075 0.15



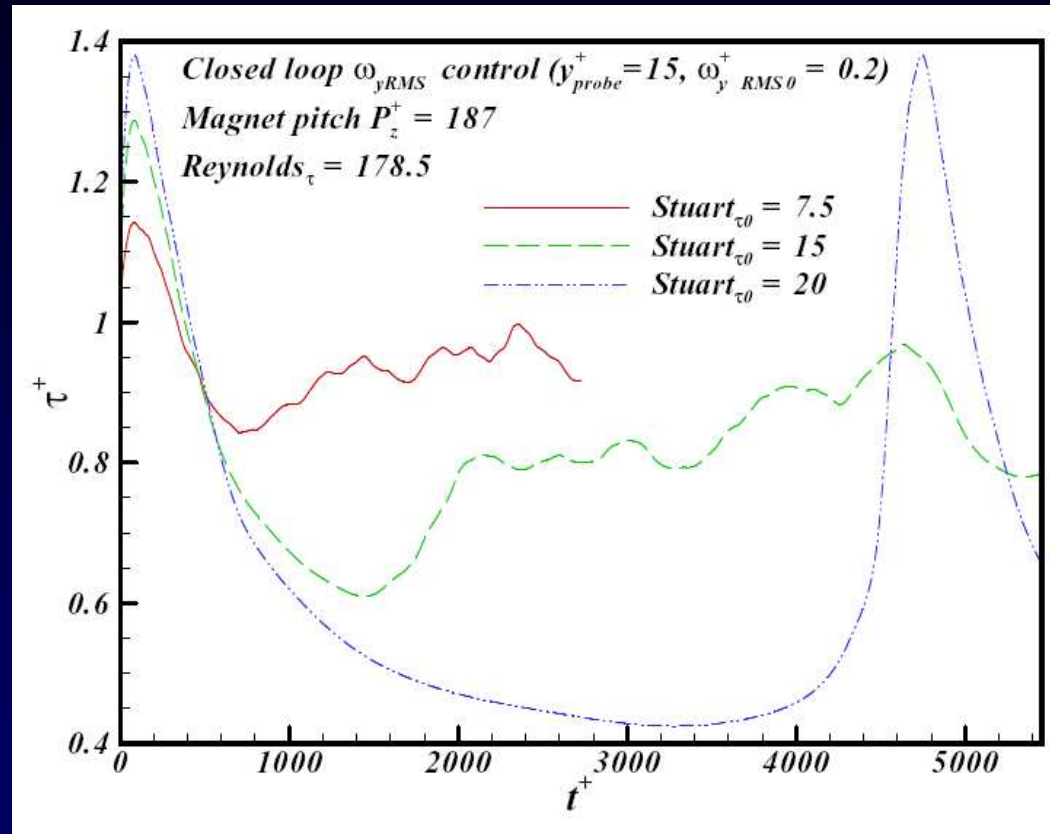
+ denotes a normalisation by the unforced wall unit

LEGI, France

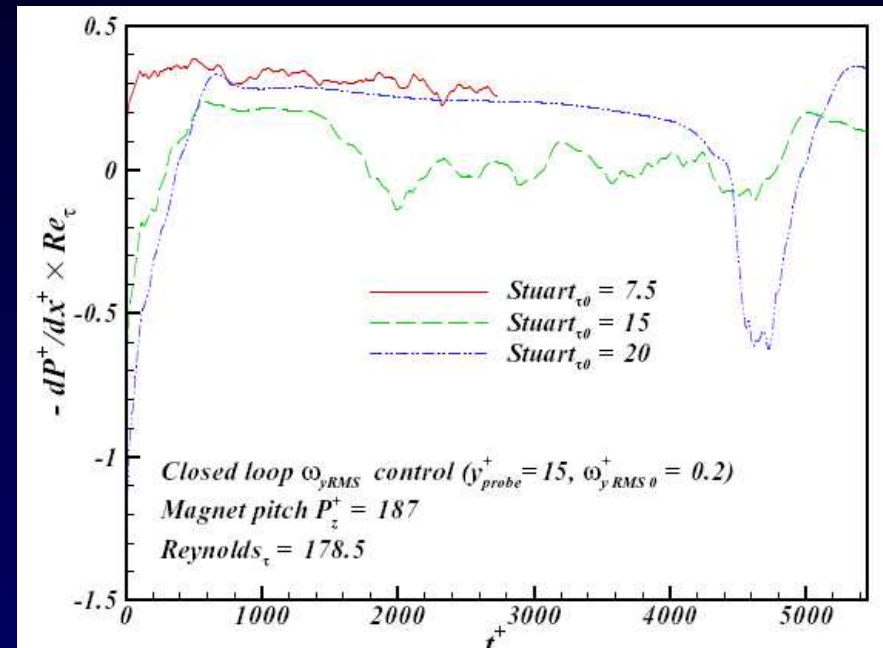
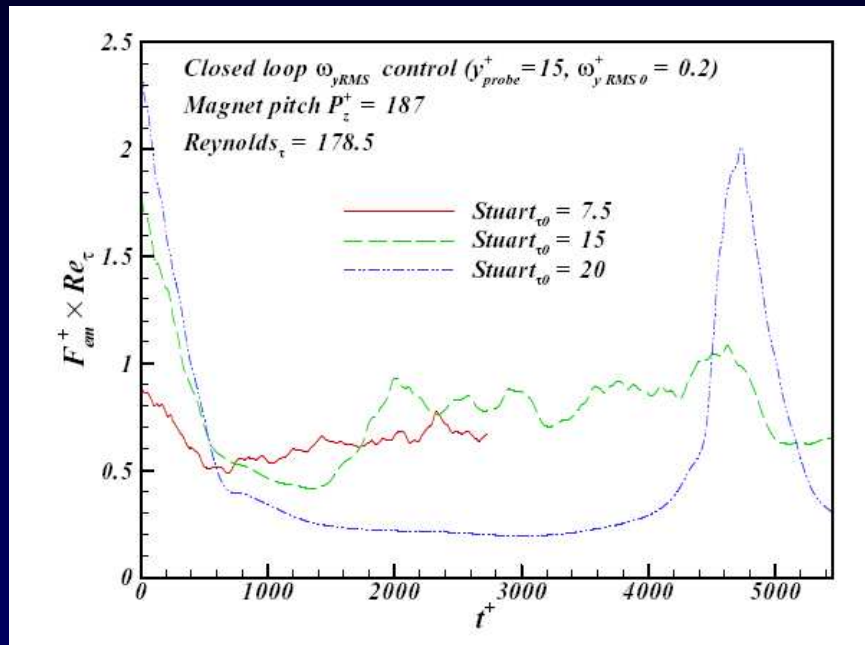
Forçage proportionnel à ω_y



Forçage proportionnel à ω_y



Forçage proportionnel à ω_y



Forçage proportionnel à ω_y

