

# Transport de particules solides par la turbulence de paroi

Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique  
(LMFA) UMR CNRS 5509

I. Vinkovic

Université Claude Bernard  Lyon 1

# Plan

## Contexte

## Méthode numérique

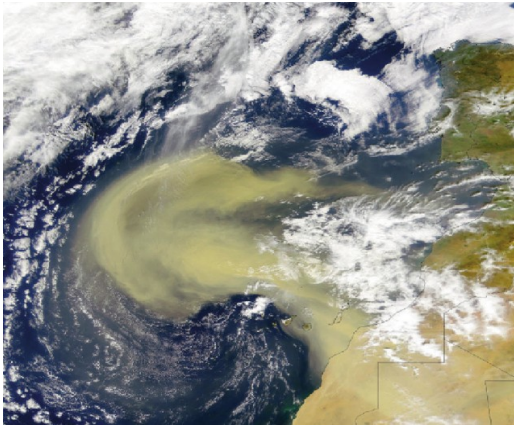
- Fluide
- Particules

## Quelques illustrations

- Particules solides et tourbillons en épingle à cheveux
- Accélération des particules solides
- Particules de taille finie

# Contexte général

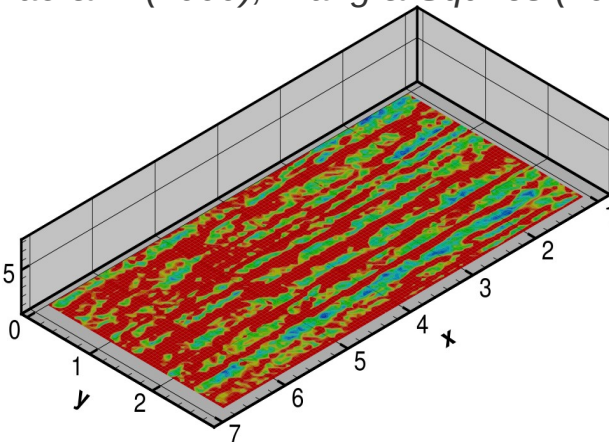
## Objectifs



Shao (2008), image satellite

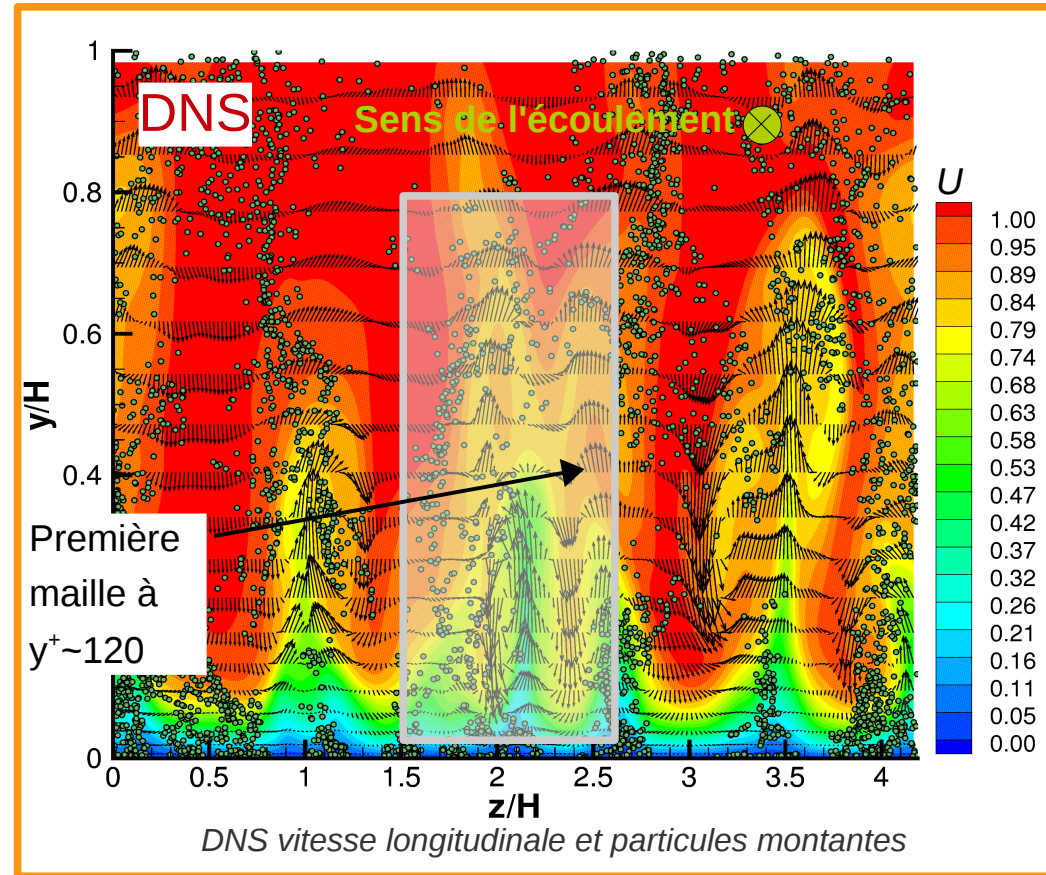
## LES et suivi lagrangien

Shao & Li (1999); Wang & Squires (1996)



Vinkovic (2005) – LES (ARPS) et suivi de particules, champ de concentration

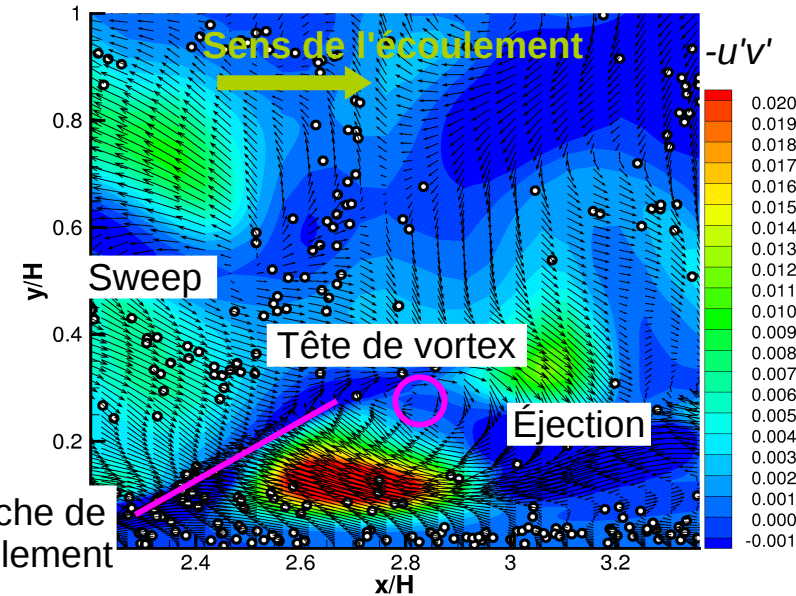
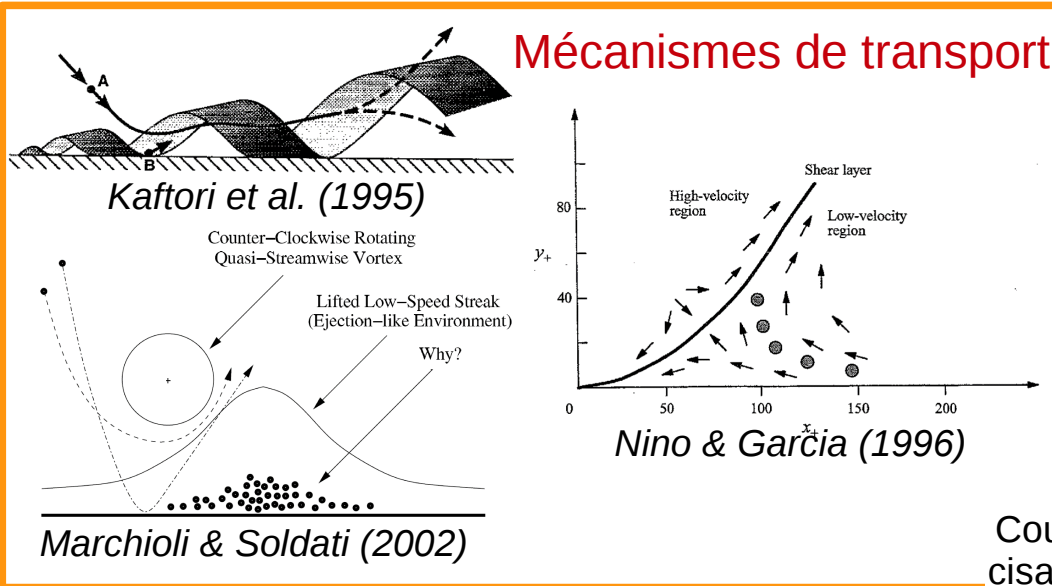
## Modélisation sous-maille pour la phase solide



Identifier les mécanismes en jeu dans le transport des particules

# Contexte et motivations

## Mécanismes de transport



*$u'v'$  et signature d'un tourbillon en épingle à cheveux*

Particules montantes  
dans les éjections

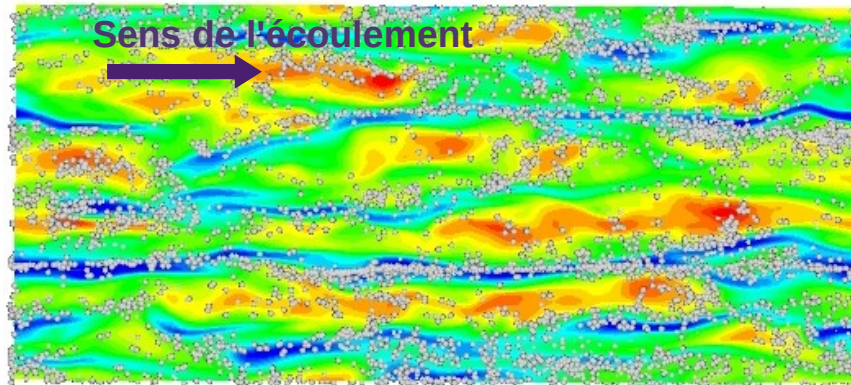
*Kiger & Pan (2002)*

*Marchioli & Soldati (2009)*

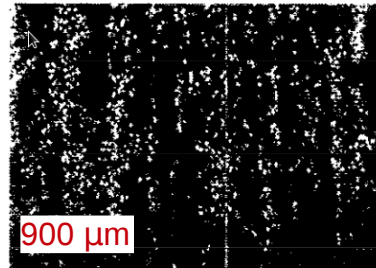
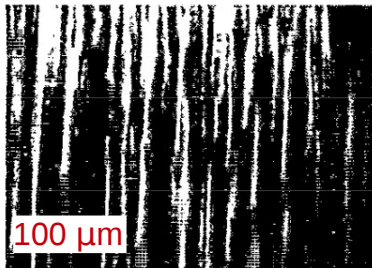
Comment les tourbillons en épingle à cheveux agissent sur les particules ?



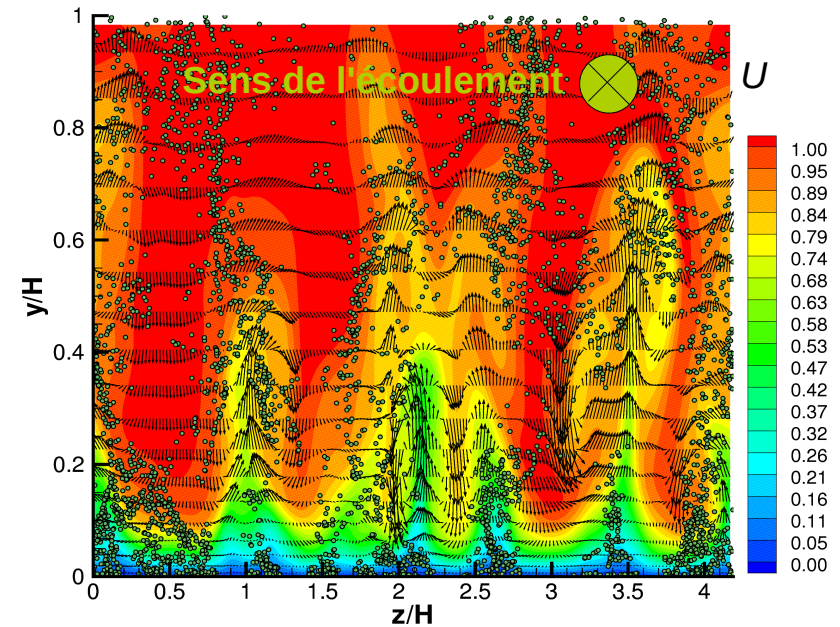
# Contexte et motivations



Plan parallèle à la paroi  $y^+ \sim 19.5$   
DNS vitesse longitudinale et particules ponctuelles



Particules de PVC à la paroi  $Re=5000$   
Expérience - Kaftori et al. (1995)



DNS vitesse longitudinale et particules montantes

Concentration préférentielle  
des particules à la paroi

Fessler et al. (1994)  
Rouson & Eaton (2001)

Près de la paroi comment  
caractériser l'accélération  
des particules solides ?

# Méthode numérique phase fluide - DNS

équipe « Aérodynamique interne » M. Buffat, L. Le Penven et A. Cadiou  
Buffat et al. (2011)

## Décomposition orthogonale

$$\vec{u} = \vec{u}_1 + \vec{u}_2$$

$$\vec{u}_1 \rightarrow \omega = (\vec{\nabla} \times \vec{u}) \cdot \vec{z}$$

$$\vec{u}_2 \rightarrow W = \vec{u} \cdot \vec{z}$$

## Représentation spectrale

$$\begin{pmatrix} \omega \\ W \end{pmatrix} = \sum_{m,p,j} \begin{pmatrix} \alpha_{m,p,j} (1-z^2) \\ \beta_{m,p,j} (1-z^2)^2 \end{pmatrix} T_j(z) e^{2i\pi(mx+py)}$$

Chebyshev  
(Fourier)<sup>2</sup>

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{\nabla} \times \vec{u}) \times \vec{u} + \vec{\nabla} \left( \frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2} \right) - \nu \Delta \vec{u} = \vec{f} + \vec{f}_{IBM}$$

$\vec{f} = -\lambda(x) (\vec{u} - \vec{u}_{inflow})$  **Zone de frange** (Bertolotti et al. 1992) pour écoulements non périodiques

$\vec{f}_{IBM} = \frac{-1}{\eta} \chi_{\Omega_s} \vec{u}$   $\chi_{\Omega_s} = 1$  si  $\vec{x} \in \Omega_s$  **Frontières immergées** (Goldstein 1993) pour les obstacles  
 $\chi_{\Omega_s} = 0$  sinon

# Méthode numérique phase fluide - DNS

Outil numérique développé par l'équipe « **Aérodynamique interne** » (M. Buffat et L. Le Penven)

## Nadiaspectral

- C++
- **Code parallèle** MPI et Open MP ~  $10^4$  coeurs

## Simulations numériques réalisées sur

- Cluster P2CHPD Université Claude Bernard Lyon 1 (**Equipex EQUIP@MESO**)
- CINES

Code utilisé pour l'étude des instabilités et la **transition vers la turbulence dans la couche limite** (*Buffat et al. 2011*)

# Suivi lagrangien de particules ponctuelles

équipe « Aérodynamique interne » I. Vinkovic

$$\frac{d\vec{v}_p}{dt} = C_d \frac{\vec{u} - \vec{v}_p}{\tau_p} + \left(1 - \frac{\rho}{\rho_p}\right) \vec{g}$$

Interpolation hermitienne

avec

$$C_d = 1$$

si  $R_{ep} < 1$

$$C_d = \frac{1}{(1 + 0.15R_{ep})^{0.687}}$$

si  $R_{ep} > 1$

## Hypothèses

- Sans collisions entre particules
- Sans 2-way coupling

## Paramètres

$$R_{e\tau} = \frac{u_\tau H}{\nu}$$

Nombre de Reynolds

$$St = \frac{\tau_p}{\tau_f}$$

Stokes

avec

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu}$$

$$\tau_f = \frac{\nu}{u_\tau^2}$$

$$\gamma = \frac{\tau_p g}{u_\tau}$$

Paramètre de gravité



# Suivi lagrangien de petites sphères

Thèse Y. Wenchao, co-encadrée avec M. Buffat

$$\frac{d\vec{v}_p}{dt} = \frac{\rho}{V_p(\rho_p - \rho)} \vec{F}_{\text{fluide}} + \vec{g}$$

vitesse

et

$$\frac{d\vec{\omega}_p}{dt} = \frac{-\rho}{I_p / \rho_p (\rho_p - \rho)} \vec{M}_{\text{fluide}}$$

taux de rotation

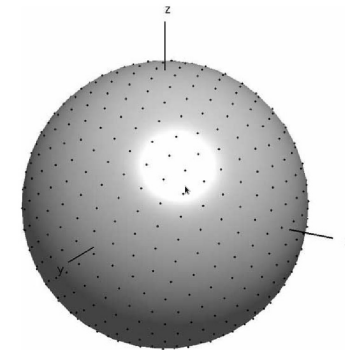
## Prise en compte des

- Collisions entre particules
- Effet des particules sur le fluide

## Forçage directe (Fadlun 2000, Uhlmann 2005)

- Vitesse estimée sans l'effet des sphères
- Passage eulérien - lagrangien

$$\tilde{\vec{u}} = \vec{u}^n + \Delta t \text{ rhs}^{n+1/2} \quad \longrightarrow \quad \vec{f}_{IBM} = \frac{\vec{v}_p - \tilde{\vec{u}}}{\Delta t}$$



2000 points lagrangiens sur chaque sphère (Uhlmann 2005)

# Quelques illustrations

## Particules solides près de la paroi

- Thèse de J. Le Louvetel  
F. Bigillon, I. Vinkovic, D. Doppler, M. Buffat et J.Y. Champagne
- Thèse de M. Prével  
D. Doppler, I. Vinkovic et M. Buffat

## Accélération des particules solides dans une turbulence de paroi

- Thèse de R. Zamansky  
I. Vinkovic et M. Gorokhovski

## Particules solides de taille finie

- Thèse de W. Yu  
I. Vinkovic, L. Le Penven et M. Buffat

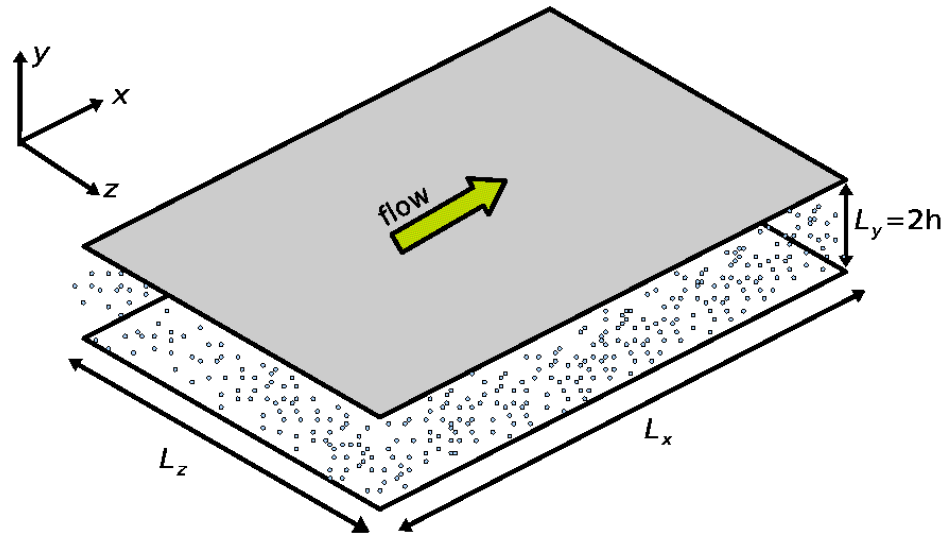
# Particules solides près de la paroi

F. Bigillon  
M. Buffat  
D. Doppler  
I. Vinkovic

Doctorants : J. Le Louvetel  
M. Prével

# Simulations numériques

Vinkovic et al. (2011) Int. J. of Multiphase Flow 37, p. 187-197



$Re = 2\,260$  et  $12\,250$

$St = 1 - 125$

200 000 particules ponctuelles

Maillage  $384 \times 256 \times 384$

60 s / itération

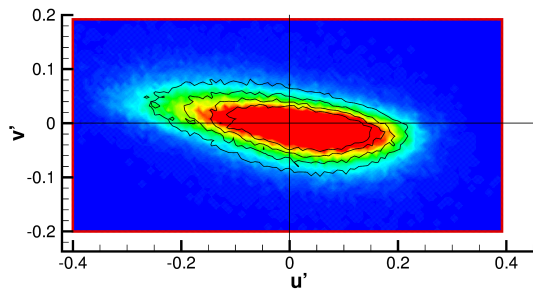
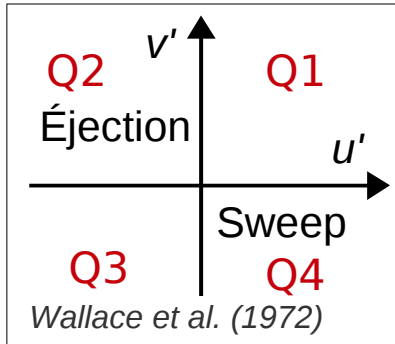
Durée d'une simulation = 15 jours  
sur 32 processeurs

DNS avec suivi lagrangien de particules solides

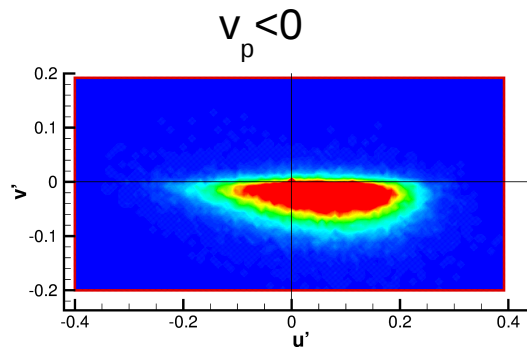
# Analyse par quadrants

Vinkovic et al. (2011) Int. J. of Multiphase Flow 37, p. 187-197

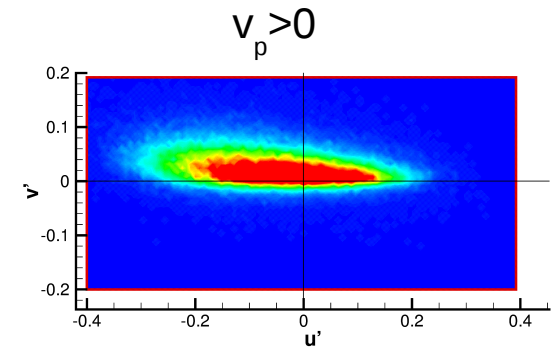
DNS -  $Re = 12\ 500$   $St = 5$   $y^+ = 38$   $\gamma = 0$



$u'v'$  du fluide à la position  
des particules solides



$u'v'$  du fluide à la position  
des particules solides  
descendantes



$u'v'$  du fluide à la position  
des particules solides  
montantes

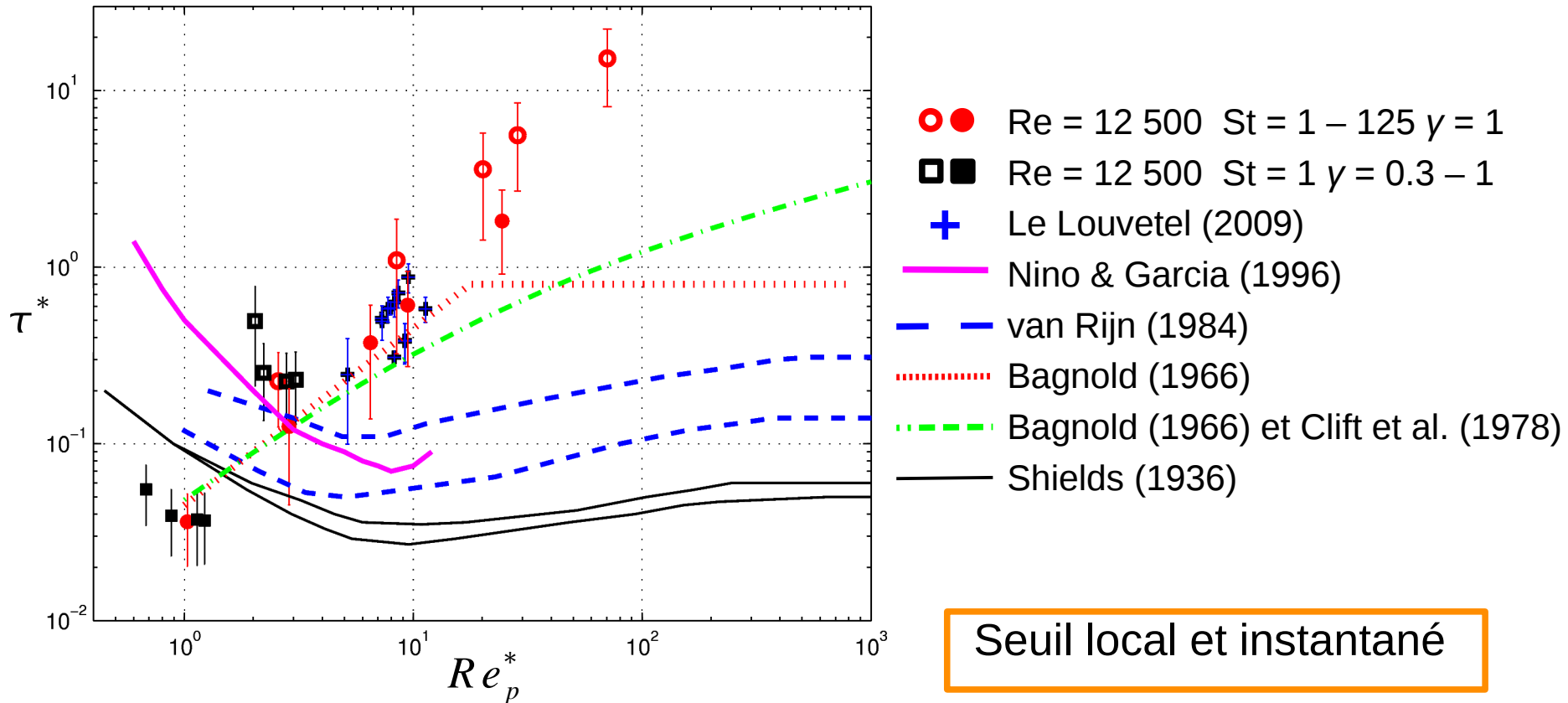
Concentration préférentielle des particules  
montantes dans les éjections

# Comparaison avec expériences

Vinkovic et al. (2011) Int. J. of Multiphase Flow 37, p. 187-197

Le Louvetel et al. (2009) Water Resour. Res.

## Diagramme de Shields





# Conclusion

- Particules montantes entourées par les éjections
- Seuil qui sépare les éjections dans lesquelles toutes les particules montent

Utilisation du seuil pour les modèles  
de mise en suspension

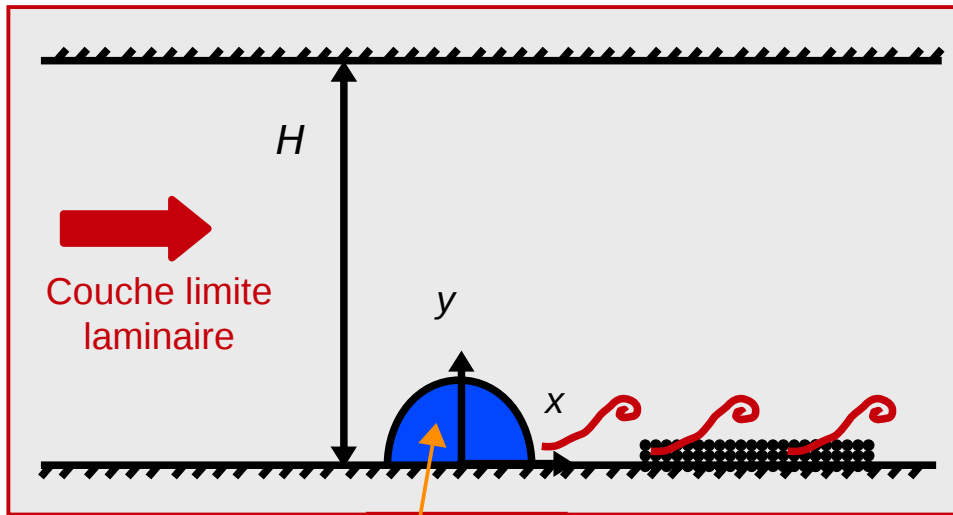
## Configuration simplifiée

### Génération des tourbillons en épingle à cheveux de manière contrôlée

- Comparaison simulations – expériences (*Le Louvetel et al. 2009*)
- Effet des tourbillons sur le transport

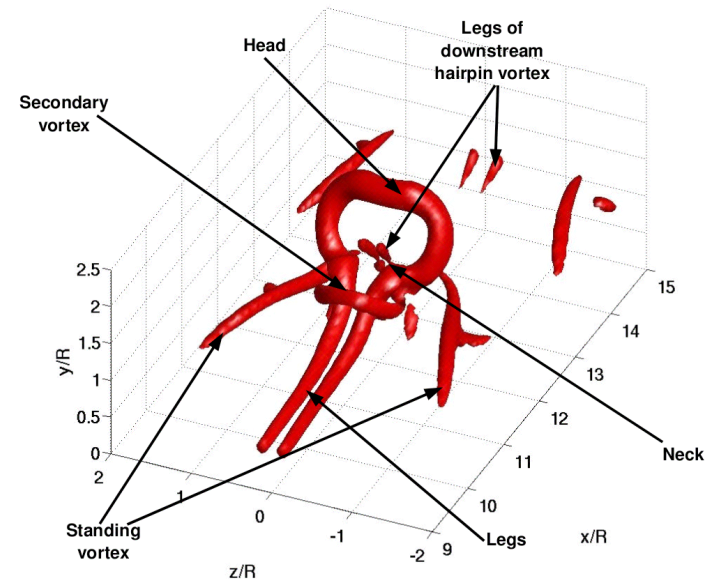
# Particules solides et tourbillons en épingle à cheveux

Thèse M. Prével, co-encadrée avec D. Doppler et M. Buffat



Frontières immergées

Génération des tourbillons en épingle à cheveux de manière contrôlée



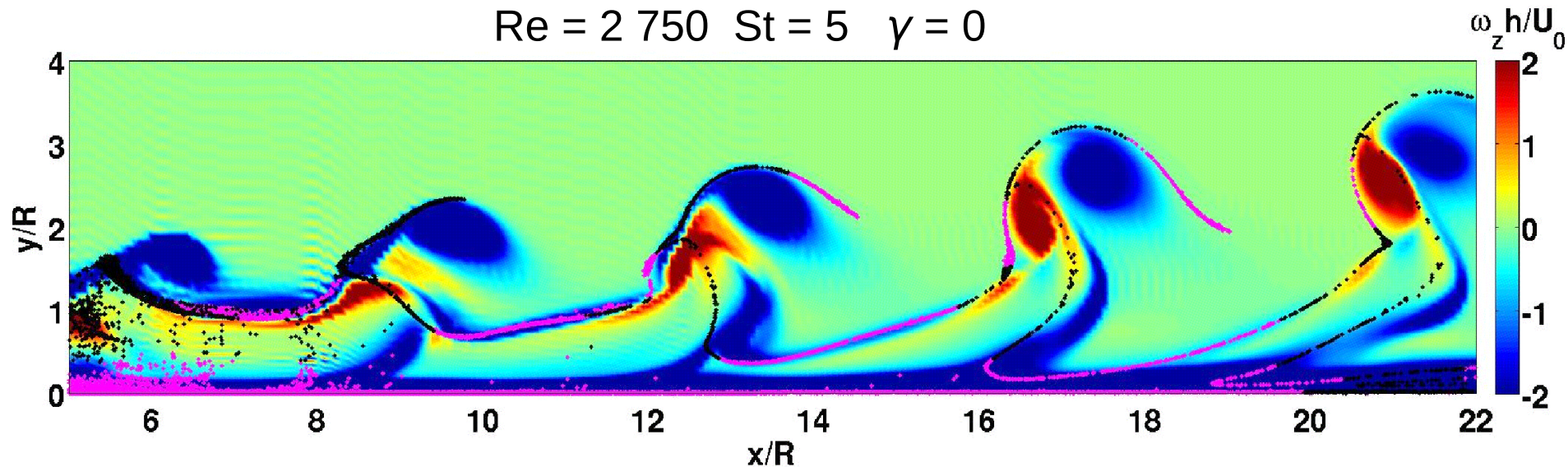
*Tourbillon en épingle à cheveux – critère  $\lambda_2$*

# Particules solides et tourbillons en épingle à cheveux

Prevel et al. (2013) Int. J. of Heat and Fluid Flow

Vorticité, particules montantes (noir) et descendantes (rose)

$Re = 2\ 750$   $St = 5$   $\gamma = 0$



- Vérifier les conclusions dans une configuration simplifiée
- Identifier le mécanisme de transport

# Accélération des particules solides dans une turbulence de paroi

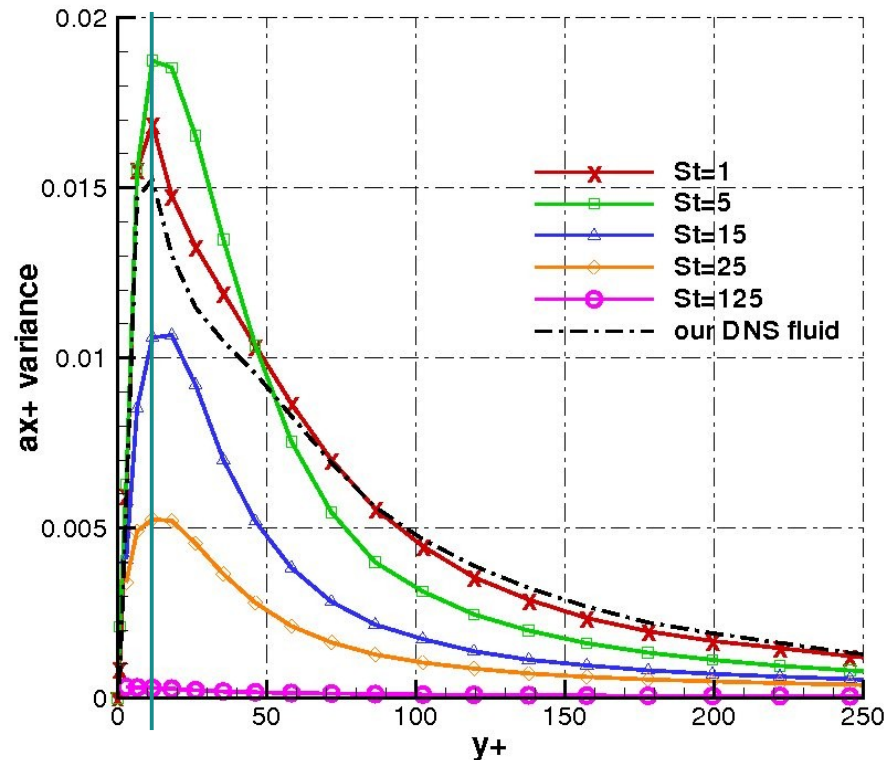
M. Gorokhovski  
I. Vinkovic

Doctorant : R. Zamansky

# DNS – Accélération des particules solides

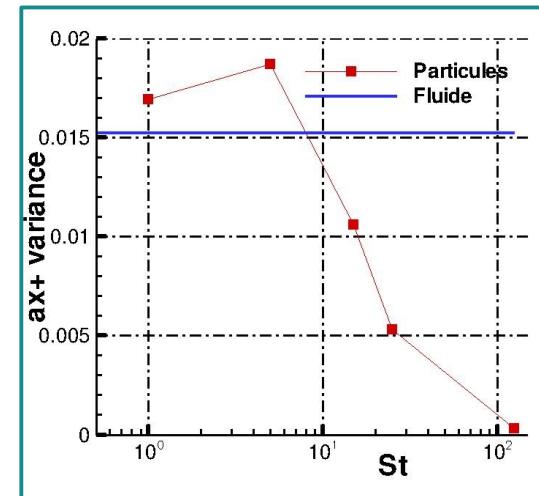
Zamansky et al. (2011) Phys. Fluids 23, 113304

## Variance de l'accélération longitudinale



$Re = 12\ 500$   $\gamma = 0$

$y^+ = 12$



Pour  $St=5$ , l'accélération des particules solides est plus élevée que l'accélération du fluide

Contrairement à la THI, particules entraînées par régions de forte accélération

# Modèle sous-maille pour l'accélération

M. Gorokhovski  
I. Vinkovic

Doctorant : R. Zamansky



# LES et modèle stochastique de sous-maille pour l'accélération (LES-SSAM)

Zamansky et al. (2010) J. of Turbulence 11 (30), p. 1-18

Thèse R. Zamansky, co-encadrée avec M. Gorokhovski

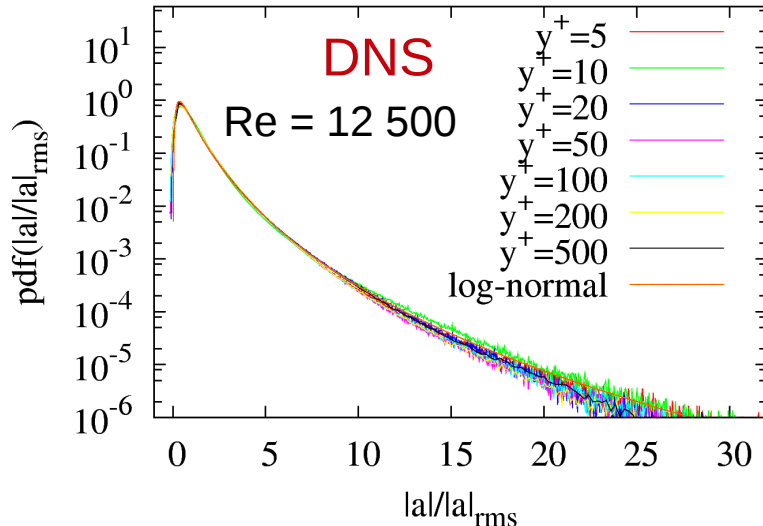
Équation modèle (Sabel'nikov et al. 2011) :  $a_i = \tilde{a}_i + a'_i$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_k \frac{\partial u_i}{\partial x_k} = \frac{-1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\nu + \nu_{turb}) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right) + a'_i$$

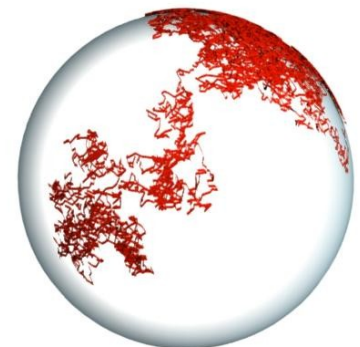
modèle stochastique

Modèle stochastique (Zamansky et al. 2010) :

$$a'_i(x_i, t) = a(x_i, t) e_i(x_i, t)$$



Processus de fragmentation pour la norme

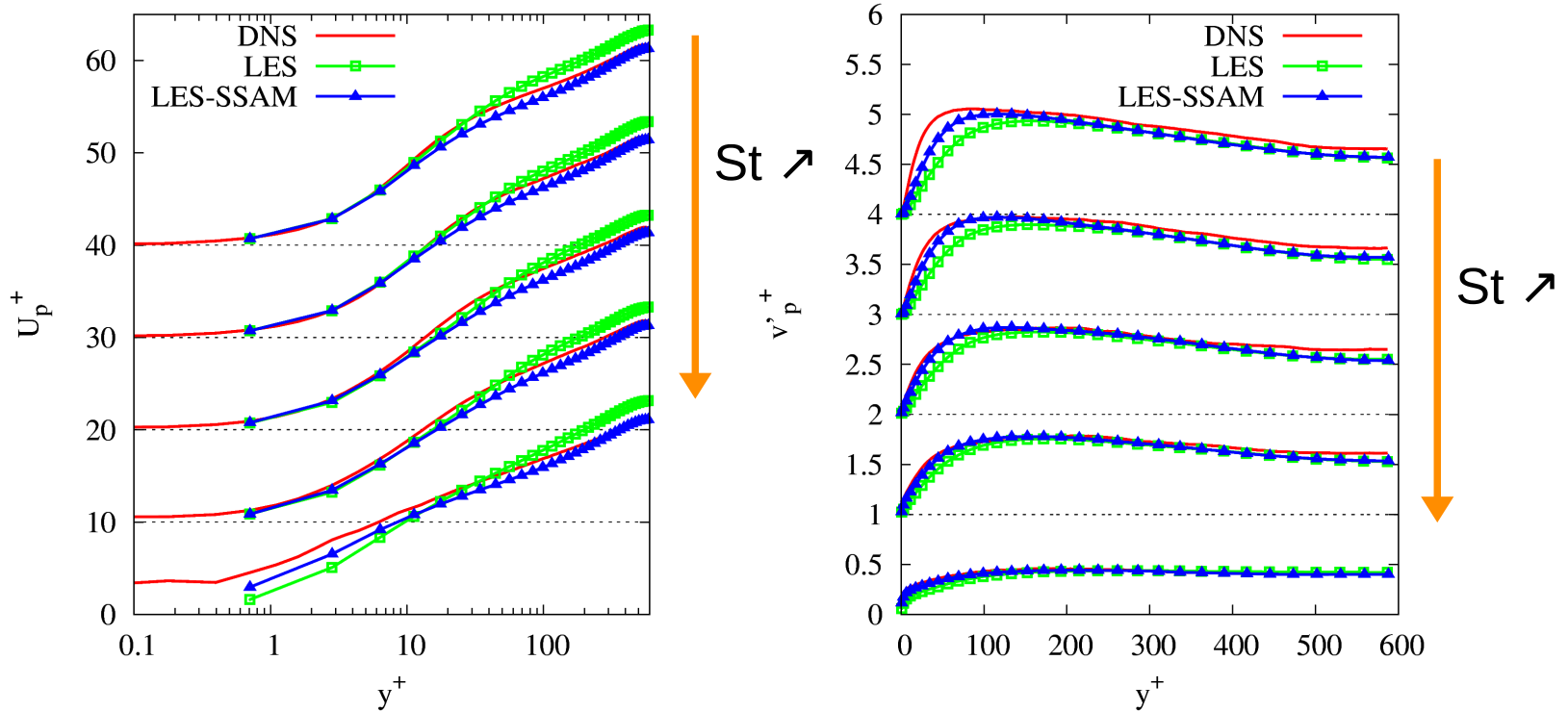


Marche aléatoire sur une sphère pour l'orientation

# LES-SSAM et particules solides

Zamansky et al. (2013), J. Fluid Mech. 721, p. 627-668

Vitesse moyenne et RMS des particules solides  $Re = 12\ 500$   $\gamma = 0$



Amélioration de la vitesse fluide → amélioration de la vitesse et de l'accélération des particules

# Conclusion

- Accélération des particules solides ( $St = 5$ ) plus élevée que l'accélération du fluide
- Particules entourées par régions de forte accélération longitudinale
- Modèle stochastique pour l'accélération sous-maille

Utilisation des conclusions pour améliorer la modélisation sous-maille du transport des particules en LES

## Thèse en cours

### Prise en compte de la taille des particules

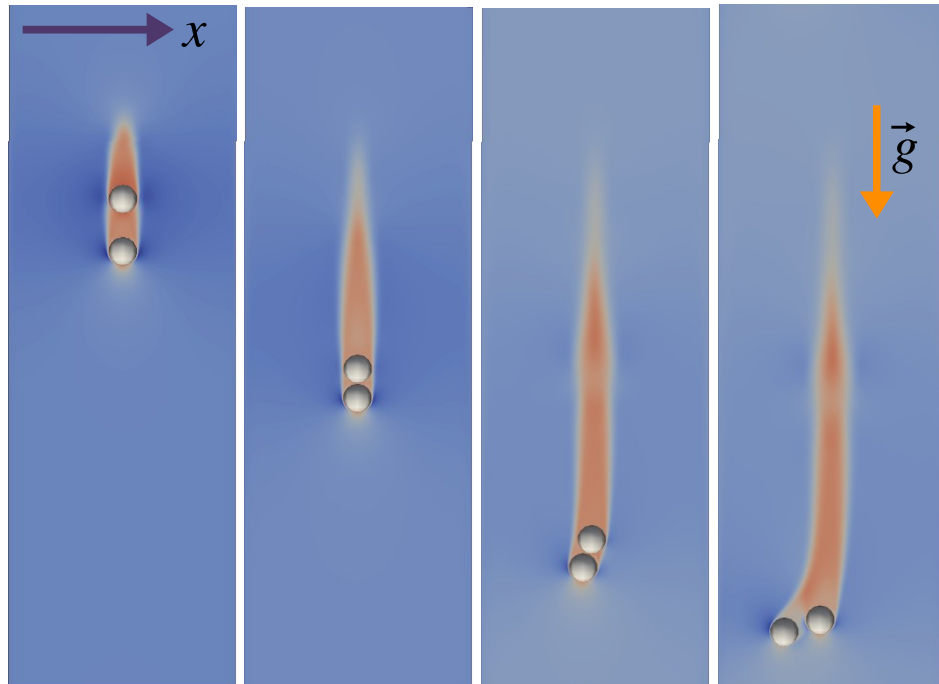
*Volk et al. (2008); Calzavarini et al. (2009)*

- Méthode des domaines fictifs
- Influence de la taille sur les statistiques d'accélération

# Particules de taille finie

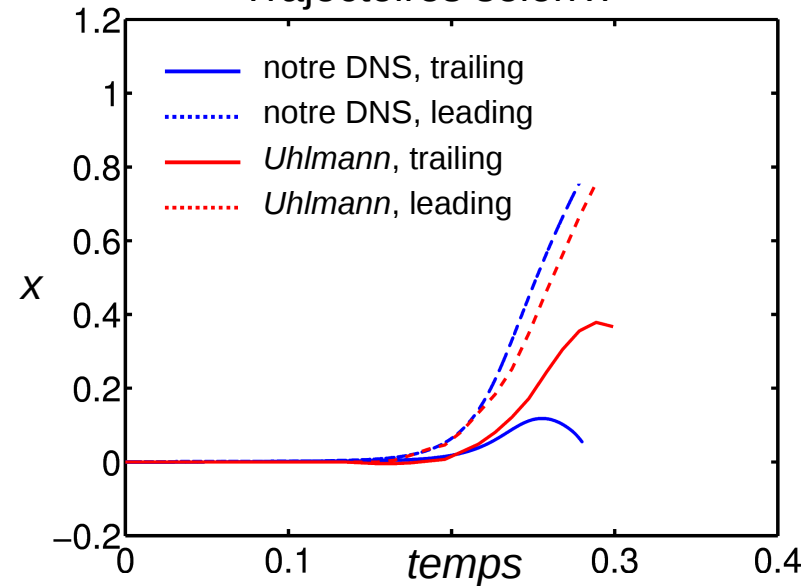
Thèse W. Yu, co-encadrée avec M. Buffat

Validation – sédimentation de deux cylindres

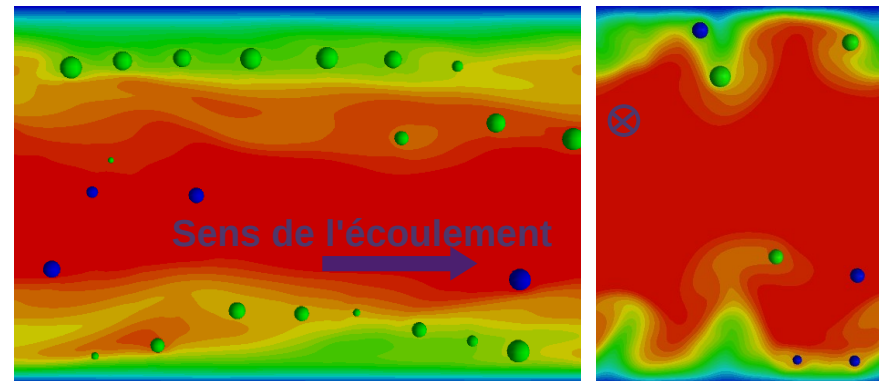


Vitesse du fluide autour des cylindres

Trajectoires selon x



Particules dans canal turbulent



Vitesse selon la direction de l'écoulement dans le plan  $(x,y)$  et  $(y,z)$

**MERCI**