

# Accélération de particules inertielles en turbulence de paroi : DNS et LES avec modélisation stochastique de l'accélération de sous-maille

R. Zamansky<sup>a</sup>, I. Vinkovic<sup>a</sup> & M. Gorokhovski<sup>a</sup>

a. Université de Lyon, Lyon, F-69003, France ; Université Lyon 1, Villeurbanne, F-69622, France ; INSA de Lyon, Villeurbanne, F-69621, France ; Ecole Centrale de Lyon, Ecully, F-69134, France, CNRS, UMR5122, Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique

## Résumé :

Premièrement la simulation numérique directe d'un écoulement turbulent en canal avec une phase dispersée est utilisée pour analyser l'influence de la structure typique de l'écoulement en proche paroi sur la dynamique des particules. Dans un second temps, dans le cadre de la simulation des grandes échelles (LES), l'influence des structures de paroi de petite taille est reproduite, par l'emploi d'un modèle stochastique pour l'accélération de sous-maille. Les aptitudes du modèle proposé sont ensuite évaluées pour les statistiques des particules inertielles dans l'écoulement en canal à grand nombre de Reynolds.

## Abstract :

In a first part of our work, direct numerical simulation of particle laden turbulent channel flow is performed. The acceleration statistics of the inertial particles and of the fluid at the position of the solid particles is computed and analyzed. In the second part, a large eddy simulation (LES) for the carrier phase is coupled with subgrid stochastic model for residual fluid acceleration. The subgrid stochastic model for acceleration accounts for effects of flow intermittency at subgrid scales. We assess the capability of this model to reproduce solid particles statistics.

**Mots clefs :** particules solides, accélération, modèles stochastiques

## 1 Introduction

La compréhension de la dynamique des particules inertielles dans les écoulements turbulents de paroi présente un intérêt pour un grand nombre de problèmes environnementaux ou industriels. Ce sont par exemple : la dispersion de particules, l'évaporation ou la fragmentation de gouttelettes ainsi que la combustion à grand nombre de Reynolds ( $Re$ ).

Du fait de leur inertie, mesurée par le nombre de Stokes ( $St$ ), les particules présentent des trajectoires différentes des traceurs fluides et se répartissent de façon inhomogène dans l'écoulement. Les particules denses sont éjectées des zones de forte rotation. La réponse des particules aux structures de l'écoulement et la ségrégation qui en suit dépend du nombre de Stokes.

Il a été montré [1, 2], que dans un écoulement turbulent homogène et isotrope (THI), à mesure que le nombre de Stokes augmente, la variance de l'accélération des particules inertielles diminue et que leurs statistiques deviennent de plus en plus gaussiennes. Cette évolution avec  $St$  est due d'une part au filtrage opéré par l'inertie de la particule [1, 2]. Et d'autre part, à l'influence de la concentration préférentielle des particules dans des régions de faible vortacité [2].

En canal, l'écoulement proche de la paroi est caractérisé par la présence de structures cohérentes à grande échelle. Ces structures sont essentiellement alignées avec la paroi, et sont composées d'une

alternance de zones de faible vitesse et de grande vitesse. On cherche alors à mettre en évidence l'influence de ces structures turbulentes organisées sur la dynamique des particules. Plus particulièrement on insistera sur les différences existant avec la THI pour les statistiques de l'accélération des particules inertielles.

Si la structure de l'écoulement en proche paroi joue un rôle important, sur la dynamique des particules, il est important, pour la simulation numérique des particules, de bien résoudre la région de proche paroi. Ceci pose un problème car à grand nombre de Reynolds le nombre de points de maillage devient prohibitif et interdit de simuler toutes les échelles de l'écoulement. D'un autre côté, les approches de type LES (large eddy simulation), où seules les plus grandes échelles sont résolues, ne permettent pas de reproduire correctement les structures de l'écoulement de paroi, car les plus petites structures de paroi influencent l'écoulement dans sa globalité. Ainsi, Sabel'nikov, Chtab et Gorokhovski [5, 6] ont proposé, pour la THI, de coupler la LES avec avec une modélisation stochastique de l'accélération (LES-SSAM) afin de prendre en compte les effets de l'intermittence aux échelles de sous-maille. Cette approche a été étendue à l'écoulement en canal pleinement développé par Zamansky, Vinkovic et Gorokhovski [8] en proposant une modélisation stochastique de l'accélération de sous-maille propre à cet écoulement. Dans [8], il a été montré que la LES-SSAM permet de mieux reproduire la structure de l'écoulement en canal. Ainsi, on se propose de vérifier si les améliorations constatées dans la simulation de la phase porteuse se traduisent par une meilleure prédiction de la dynamique des particules.

Le plan de cet article est le suivant. Après avoir présenté la méthode numérique utilisée pour suivre les trajectoires des particules inertielles, on étudie, par DNS, le comportement des particules advectées par l'écoulement turbulent pleinement développé dans un canal, on s'intéressera à l'influence du nombre de Stokes sur les statistiques de l'accélération des particules et de l'accélération du fluide vu par les particules. Ensuite, on compare les statistiques relatives à la dynamique des particules obtenues lorsque la phase fluide est simulée par DNS, par LES et par la méthode LES-SSAM.

## 2 Méthode numérique

Pour simuler l'écoulement turbulent dans le canal on utilise un code pseudo-spectral développé par Marc Buffat et Lionel Le Penven [3]. Le nombre de Reynolds des calculs présentés ici est  $Re = 12500$  et les détails des simulations numériques sont donnés dans le tableau 1.

Pour simuler la phase dispersée, on considère que les particules sont des points matériels, on néglige les interactions entre particules ainsi que l'action des particules sur la phase porteuse. Dans le bilan des forces de la particule on ne retient que l'effet inertiel. La paroi est considérée comme parfaitement lisse et les rebonds des particules sur les parois du canal sont traités comme des chocs élastiques. L'algorithme utilisé pour le suivi des particules est présenté par Vinkovic et al. [7]. Les simulations ont été réalisées pour 5 nombres de Stokes :  $St = 1, 5, 15, 25, 125$ .

TAB. 1 – Paramètres utilisés pour les simulations numériques

| type     | $Re_+ = u_*h/\nu$ | $Re = u_ch/\nu$ | $N_x \times N_y \times N_z$ | $L_x \times L_y \times L_z$                          | $\Delta x^+ \times \Delta y^+ \times \Delta z^+$ | $dt^+ = dt/t_*$ |
|----------|-------------------|-----------------|-----------------------------|--|--|-----------------|
| DNS      | 587               | 12490           | $384 \times 257 \times 384$ | $\frac{3}{2}\pi h \times 2h \times \frac{3}{4}\pi h$ | $7.2 \times (0.04 \sim 7.2) \times 3.6$          | 0.033           |
| LES      | 587               | 13660           | $64 \times 65 \times 64$    | $3\pi h \times 2h \times \pi h$                      | $87 \times (0.71 \sim 29) \times 29$             | 0.1             |
| LES-SSAM | 587               | 12420           | $64 \times 65 \times 64$    | $3\pi h \times 2h \times \pi h$                      | $87 \times (0.71 \sim 29) \times 29$             | 0.1             |

## 3 Statistiques de l'accélération des particules inertielles par DNS

Afin de caractériser l'influence des structures de paroi sur la dynamique des particules, on considère l'évolution de leur accélération avec le nombre de Stokes et la distance à la paroi.

### 3.1 Variance de l'accélération

La figure 1a présente le profil de la variance de la composante longitudinale de l'accélération des particules inertielles pour les différents nombres de Stokes. On voit sur cette figure que suffisamment

loin de la paroi ( $y^+ > 50$ ) le comportement de l'accélération est similaire à ce qui est observé en THI. Effectivement, pour  $y^+ > 50$ , lorsque l'inertie augmente la variance de l'accélération des particules diminue de façon monotone, jusqu'à devenir extrêmement faible pour  $St = 125$ . En revanche, en proche paroi, on constate un comportement inattendu pour l'évolution de la variance avec le nombre de Stokes. L'évolution n'est plus monotone et pour  $St \approx 5$ , la variance dans la direction longitudinale devient plus forte en proche paroi ( $y^+ < 50$ ) que pour les particules fluides. On peut noter que pour les deux autres composantes l'évolution est analogue à la THI, mais n'est pas montrée ici.

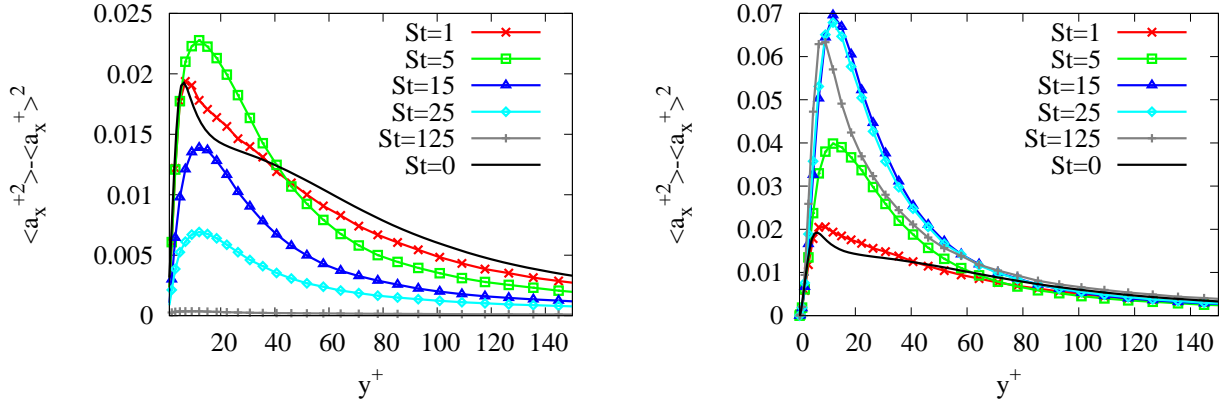


FIG. 1 – Profil de la variance de l'accélération longitudinale pour les 5 nombres de Stokes et pour des particules fluides ( $St = 0$ ). (a) accélération des particules; (b) accélération du fluide à la position de la particule.

Pour analyser ce phénomène, on considère, sur la figure 1b, les statistiques de la composante longitudinale de l'accélération du fluide conditionnée à la position de la particule. On remarque que lorsque le nombre de Stokes augmente la variance de l'accélération du fluide vu par la particule augmente. Ceci est particulièrement visible proche de la paroi. Cette évolution est différente de ce qui est observé en THI, où l'augmentation de l'inertie conduit les particules à se concentrer dans des zones de faible vorticité et de faible accélération [2]. Le comportement observé ici semble directement lié à l'organisation typique des structures turbulentes de paroi et résulte de la combinaison des effets de ségrégation des particules dans les zones de faible vorticité et du filtrage d  à leur inertie. Les particules denses sont  ject es des régions de forte rotation. Or en proche paroi, il y a une alternance entre des poches tourbillonnaires de fluide rapide (« high speed streaks ») et de fluide lent (« low speed streaks »). Pour  $St \approx 5$ , l'inertie de la particule est suffisamment faible pour que celle-ci réponde aux sollicitations du fluide mais elle est également suffisamment forte pour que les effets de concentration préférentielle soient perceptibles. Ceci illustre que la dynamique des particules est directement influenc e par les structures en forme de sillon caractéristiques des écoulements de paroi.

### 3.2 Distribution statistique de l'accélération

Sur la figure 2, les PDF de l'accélération longitudinale et verticale des particules à  $y^+ = 100$  pour les différents nombres de Stokes sont compar es avec les PDF de l'accélération du fluide conditionn e à la position de la particule. Pour référence on trace également la PDF de l'accélération du fluide non-conditionn e. Les PDF sont normalis es par la valeur de l'écart type de la grandeur correspondante.

On constate premièrement que comme en THI, lorsque le nombre de Stokes augmente, la distribution de l'accélération des particules devient de plus en plus proche de la distribution gaussienne.

Deuxièmement, pour tous les nombres de Stokes, les PDF normalis es de l'accélération du fluide vu par la particule se superposent presque parfaitement avec la PDF normalis e de l'accélération de fluide non-conditionn e. La même observation est faite pour d'autres distances de la paroi. Cette superposition

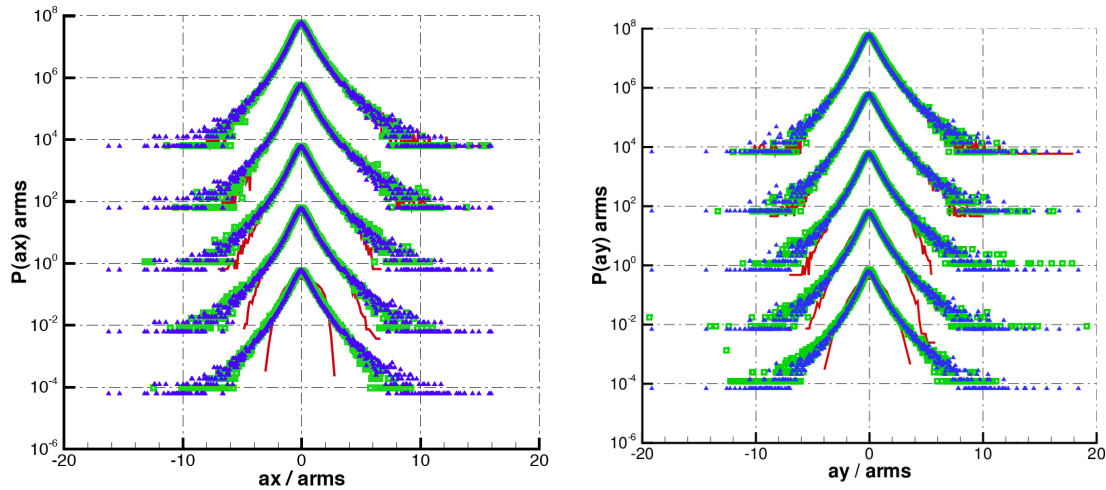


FIG. 2 – PDF de l'accélération à  $y^+ = 100$ , avec de haut en bas  $St = 1, 5, 15, 25$  et  $125$ . Chaque courbe est décalée vers le haut de 100 unités. (a) composante longitudinale et (b) composante normale. Accélération des particules inertielles : —, accélération du fluide :  $\blacktriangle$ , et accélération du fluide à la position de la particule :  $\square$ .

suggère une similitude de la dynamique du fluide vu par les particules. Le facteur d'échelle est l'écart type de l'accélération, qui est dépendant du nombre de Stokes.

## 4 LES-SSAM appliquée au transport de particules en canal

Les observations faites par DNS mettent en évidence l'importance de l'accélération du fluide vu par les particules. Ainsi, on s'attend à ce que l'approche LES-SSAM, où l'accélération de sous-maille du fluide est modélisée explicitement, améliore la simulation des particules dans l'écoulement de paroi.

### 4.1 Description de l'approche LES-SSAM

Afin de prendre en compte l'accélération non-résolue en LES on se base sur l'approche LES-SSAM introduite par Sabelnikov et al. [5, 6]. On considère que l'accélération totale instantanée peut être représentée comme la somme de deux contributions :  $a_i = \bar{a}_i + a'_i$ . La première partie ( $\bar{a}_i$ ) est associée à l'accélération totale filtrée spatialement que l'on suppose équivalente au filtrage spatial des équations de Navier-Stokes. La seconde partie ( $a'_i$ ) représente l'accélération totale du champ résiduel et est considérée comme une variable stochastique. Ces deux parties sont implicitement couplées en imposant la continuité de l'écoulement. La résolution de ce système permet d'obtenir un champ modèle pouvant être considéré comme une approximation du champ non filtré.

Pour l'écoulement de canal, un modèle stochastique pour l'accélération de sous-maille a été proposé [8]. Ce modèle repose sur deux processus stochastiques, l'un pour la norme et l'autre pour l'orientation. Le processus stochastique pour la norme représente la fragmentation avec symétrie d'échelle [4] des tourbillons. Le modèle pour l'orientation, reproduit la relaxation de l'accélération vers l'isotropie avec l'augmentation de la distance à la paroi. L'orientation est donnée par l'évolution du mouvement brownien sur une sphère.

Dans [8], il a été montré que l'approche LES-SSAM, avec nos modèles de sous-maille permet une amélioration explicite des statistiques de vitesse (moyenne, écart types, spectres), du profil des contraintes, et des PDF de l'accélération du fluide par rapport à la LES standard.

### 4.2 Resultats

Dans cette partie la LES-SSAM appliquée au transport de particules est évaluée en comparant les statistiques obtenues avec la DNS et la LES standard. Les détails des simulations sont donnés dans le

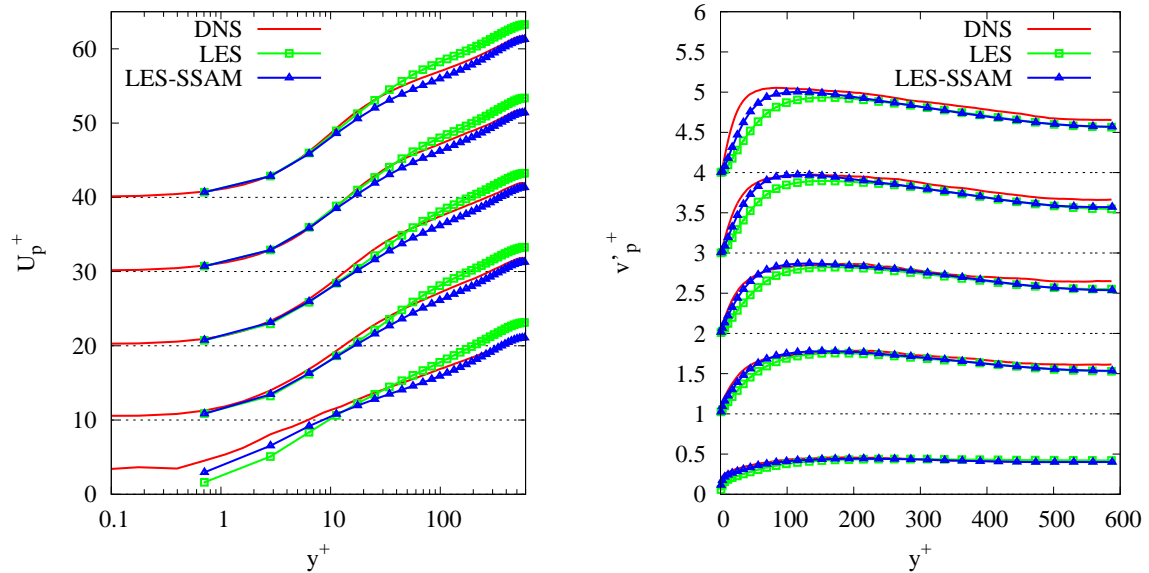


FIG. 3 – Moyenne de la composante longitudinale (a) et écart type de la composante normale (b) de la vitesse des particules pour  $St = 1, 5, 15, 25$  et  $125$  (respectivement de haut en bas). Comparaison entre LES-SSAM, LES et DNS.

tableau 1.

Sur la figure 3, on compare l'évolution de la moyenne et de l'écart type dans la direction normale de la vitesse des particules. On remarque une nette amélioration de ces statistiques quelque soit le  $St$  avec la LES-SSAM. Ces améliorations sont du même ordre que celles observées dans [8] pour la phase fluide.

Sur la figure 4, les statistiques pour l'accélération des particules sont comparées. On voit que d'une part, l'écart type de l'accélération est amélioré pour les 5 nombres de Stokes étudiés (on présente sur la figure 4a l'écart type dans la direction transversale, mais on peut noter que les autres composantes présentent une amélioration également). La figure 4b montre que la LES-SSAM en prenant en compte explicitement l'accélération aux échelles non-résolues permet une amélioration de la PDF de l'accélération.

## 5 Conclusions

Dans la première partie, les statistiques de l'accélération des particules fluides ont été étudiées par DNS. Il a été observé qu'en proche paroi, pour  $St \approx 5$  la variance longitudinale de l'accélération devenait supérieure à la variance de l'accélération des traceurs fluides. Ceci résulte de l'influence de l'inertie de la particule, de la concentration préférentielle et de la structure particulière de l'écoulement de paroi. Il a également été remarqué que quelque soit le nombre de Stokes les PDF de l'accélération du fluide vu par les particules, et normalisées par l'écart type restaient identiques à celles de l'accélération des particules fluides. Ceci évoque l'existence d'une similitude dans la dynamique du fluide vu par les particules, dont le facteur d'échelle est l'écart type de l'accélération, lui même dépendant du nombre de Stokes.

Dans la seconde partie, on a montré que la prise en compte explicite de l'accélération de sous-maille par l'approche LES-SSAM permet une réelle amélioration de la dynamique des particules transportées par l'écoulement de canal. Ceci est en lien avec la première partie où l'importance des structure de paroi sur la l'accélération des particules a été soulignée.

La suite de ce travail consiste à identifier de manière plus précise les mécanismes conduisant à la

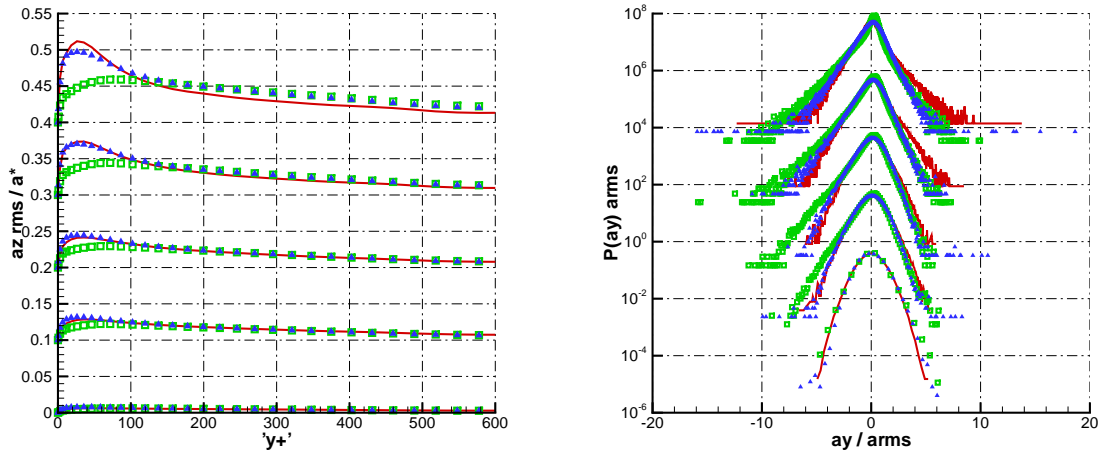


FIG. 4 – Accélération des particules. (a) Ecart type de la composante transversale. (b) PDF de la composante transversale à  $y^+ = 100$ . Pour  $St = 1, 5, 15, 25$  et  $125$  (respectivement de haut en bas). Comparaison entre LES-SSAM :  $\blacktriangle$ , LES :  $\square$  et DNS :  $—$ .

ségrégation des particules en proche paroi. Ceci pourrait être réalisé en décomposant l'accélération du fluide en une partie solénoïdale et une partie potentielle et en étudiant les statistiques conditionnées à la position des particules de ces deux contributions.

## Références

- [1] S. AYYALASOMAYAJULA, A. GYLFASSON, L. R. COLLINS, E. BODENSCHATZ et Z. WARHAFT : Lagrangian measurements of inertial particle accelerations in grid generated wind tunnel turbulence. *Physical Review Letters*, 97(14):144507, 2006.
- [2] J. BEC, L. BIFERALE, G. BOFFETTA, A. CELANI, M. CENCINI, A. LANOTTE, S. MUSACCHIO et F. TOSCHI : Acceleration statistics of heavy particles in turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, 550:349–358, 2006.
- [3] M. BUFFAT, L. LE PENVEN et A. CADIOU : An efficient spectral method based on an orthogonal decomposition of the velocity for transition analysis in wall bounded flow. *Comput. Fluids*, 42:62–72, 2011.
- [4] M. A. GOROKHOVSKI et V. L. SAVALIEV : Statistical universalities in fragmentation under scaling symmetry with a constant frequency of fragmentation. *Journal of Physics D : Applied Physics*, 41:085405, 2008.
- [5] V. SABEL'NIKOV, A. CHTAB et M. GOROKHOVSKI : The coupled LES - sub-grid stochastic acceleration model (LES-SSAM) of a high Reynolds number flows. In *Advances in Turbulence XI*, volume 117, pages 209–211, 11th EUROMECH European Turbulence Conference, June 25–28, 2007, Porto, Portugal, 2007. Springer Proceedings in Physics.
- [6] V. SABELNIKOV, A. CHTAB-DESSPORTES et M. GOROKHOVSKI : New sub-grid stochastic acceleration model in LES of high-Reynolds-number flows. *European Physical Journal B*, in press, 2011.
- [7] I. VINKOVIC, D. DOPPLER, J. LELOUVETEL et M. BUFFAT : Direct numerical simulation of particle interaction with ejections in turbulent channel flows. *International Journal of Multiphase Flow*, 37:187–197, 2011.
- [8] R. ZAMANSKY, I. VINKOVIC et M. GOROKHOVSKI : LES approach coupled with stochastic forcing of subgrid acceleration in a high Reynolds number channel flow. *Journal of Turbulence*, 11(30), 2010.