

RESUSPENSION ET TURBULENCE DANS UNE RUE CANYON

V. Bourgin*¹, A. Feiz¹ et M.Sellam¹

¹Laboratoire de Mécanique et d'Energétique d'Evry, Université d'Evry Paris-Saclay, 91000, France

*Courriel de l'orateur : victor.bourgin@universite-paris-saclay.fr

TITLE

Resuspension and turbulence in a street canyon

RESUME

Les polluants déposés sur les surfaces urbaines sont susceptibles d'être détachés par le vent lors d'un processus appelé remise en suspension. Cette cause indirecte d'exposition aux polluants demeure difficile à caractériser, car elle dépend à la fois des paramètres de l'écoulement et des caractéristiques des particules. Nous étudions la dynamique de la remise en suspension dans une rue canyon en couplant le code de Large-Eddy Simulation PALM avec une formulation discrète du modèle probabiliste de remise en suspension Rock'n'Roll. Nous analysons l'organisation spatiale des structures turbulentes et leur contribution à la remise en suspension à l'aide d'une analyse par quadrants.

ABSTRACT

Pollutants deposited on urban surfaces are susceptible to being detached by the wind in a process called wind-induced resuspension. This indirect source of pollutant exposure remains difficult to characterize. We investigate the dynamics of resuspension in a street canyon by coupling the Large-Eddy Simulation code PALM with a discrete formulation of the Rock'n'Roll probabilistic resuspension model. We analyze the spatial organization and contribution to resuspension of large-scale turbulent structures using quadrant analysis.

Mots-clés : remise en suspension, rue canyon, qualité de l'air, CFD / resuspension, street canyon, air quality, CFD

1. INTRODUCTION

La remise en suspension désigne le processus par lequel des particules déposées sur une surface sont détachées puis réintroduites dans l'écoulement sous l'action de forces aérodynamiques. La remise en suspension est, par nature, un processus très sensible et difficile à maîtriser pour les urbanistes, ce qui souligne la nécessité de comprendre sa contribution à la pollution atmosphérique urbaine. Les tentatives de modélisation de la remise en suspension des particules ont suivi de nombreuses approches, avec des niveaux de détail variés (Henry *et al*, 2023). Une approche simple et courante est celle de la vitesse seuil, où la remise en suspension se produit lorsque la vitesse de frottement dépasse une certaine valeur. Les approches à vitesse seuil ont été largement utilisées dans des couplages avec des modèles CFD intégrant un suivi lagrangien des particules, en RANS (Linda *et al*, 2025), URANS (Chekrouba, 2025) et LBM-LES (Banari *et al*, 2022). Cependant, de nombreux modèles de qualité de l'air utilisent une approche eulérienne pour le transport de polluants, où ces modèles de type vitesse seuil ne sont pas adaptés. Nous proposons de répondre à ce problème à l'aide d'une formulation discrète du modèle Rock'n'Roll couplée à un code CFD de type Large Eddy Simulation (LES).

2. METHODES NUMERIQUES

2.1. Le code PALM

PALM est un code LES développé pour les écoulements de la couche limite atmosphérique. Il résout les équations de Navier–Stokes filtrées, incompressibles et non hydrostatiques. En conditions neutres et sèches, les équations résolues se limitent à la conservation de la quantité de mouvement et de la masse, ainsi qu'à l'advection de scalaires passifs. Le modèle de sous-maille utilisé est le modèle de Deardorff d'ordre 1.5. PALM est un code aux différences finies, et les équations sont résolues sur une grille de type Arakawa-C. Un schéma d'advection de Wicker et Skamarock d'ordre 5 est employé, tandis que la discrétisation temporelle repose sur un schéma Runge-Kutta d'ordre 3. Une présentation complète du modèle est disponible dans Maronga *et al* (2020). La vitesse de frottement, qui est le paramètre principal du modèle de resuspension, est calculée à partir de la théorie de Monin-Obukhov selon la formule suivante :

$$u_{\tau}(x, y) = \frac{\kappa}{\ln(\Delta z/2z_0)} \left| u_h(x, y, \Delta z/2) \right|$$

avec $\kappa=0.4$ la constante de von Karman, Δz la taille verticale d'une maille, z_0 la longueur de rugosité et u_h la vitesse horizontale du vent.

2.2. Le modèle Rock'n'Roll discrétisé

Le modèle de remise en suspension Rock'n'Roll (RnR) développé par Reeks et Hall (2001) suppose que le processus de remise en suspension est constitué de deux phases. Dans un premier temps, les particules attachées à la surface oscillent sous l'effet des fluctuations de la vitesse du vent autour d'un point de pivot, généralement

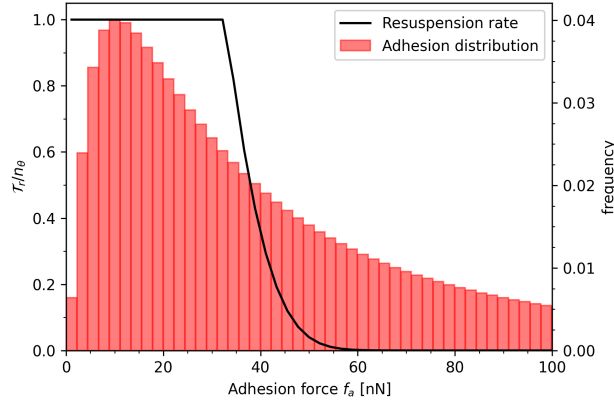


Figure 1. Distribution de la force d'adhésion discrétisée (en rouge) avec le taux de remise en suspension associé à chaque intervalle (en noir).

un élément de rugosité de la surface. La remise en suspension a lieu lorsque l'équilibre des moments est rompu par les fluctuations de vitesse et que les particules commencent à rouler sur la surface. On considère ici que toutes les particules qui roulent sont remises en suspension. L'expression quasi-statique du taux de remise en suspension pour le modèle RnR est :

$$\tau(f_a, u_\tau) = n_\theta \exp\left(-\frac{(f_a - \bar{F})^2}{2f^2}\right) / \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{f_a - \bar{F}}{\sqrt{2}f}\right)\right]$$

où f_a est la force d'adhésion à la surface, et \bar{F} et f sont respectivement la composante moyenne et les fluctuations de la force totale appliquée par l'écoulement sur une particule. Cette force aérodynamique totale est estimée à partir de la vitesse de frottement u_τ . La valeur maximale du taux de remise en suspension est fixée à n_θ , la fréquence des événements d'éjection dans la couche limite. Le taux maximal de remise en suspension est donc une propriété de l'écoulement et ne dépend pas de la particule elle-même. La formulation analytique du modèle Rock'n'Roll n'est pas adaptée à une intégration dans un code CFD. La distribution des forces d'adhésion et la vitesse de frottement sont des conditions initiales du modèle, et ne peuvent donc pas évoluer au cours du temps. De plus, le transfert de particules n'a lieu que dans une direction, de la surface vers l'écoulement. L'intégration dans un code CFD nécessite au contraire de pouvoir gérer des flux de dépôt, ce qui est rendu possible par la discrétisation de la distribution des forces d'adhésion notée Φ . La distribution devient donc une variable pronostique du modèle. Le principe est similaire à celui décrit dans Vincent *et al* (2019). La distribution de forces d'adhésion discrétisée est illustrée en Figure 1. Au début de la simulation, les particules de chaque élément de surface sont réparties dans les intervalles de force d'adhésion comme suit :

$$m_i(t = 0) = m_{tot} \cdot w_i \quad \text{avec} \quad w_i = \int_{f_a^i}^{f_a^{max}} \Phi(f_a) df_a / \int_0^{f_a^{max}} \Phi(f_a) df_a$$

où m_{tot} est la masse totale de particules sur un élément de surface et f_a^i est la force d'adhésion du i -ème intervalle. Les poids w_i sont calculés une seule fois lors de l'initialisation de la simulation. L'opération est réalisée pour chaque taille de particule, mais cette distinction est omise ici pour simplifier les notations. Une fois l'initialisation effectuée, le nombre de particules est mis à jour à chaque pas de temps dt selon :

$$m_i(t + dt) = m_i(t) \cdot (1 - \tau(f_a^i, u_i(t)) \cdot dt) + m_{depo}(t) \cdot w_i$$

Le couplage avec PALM a été conçu pour échanger le moins de variables possible entre le l'écoulement et le module de remise en suspension. Les inputs lors de l'exécution sont la vitesse de frottement, la viscosité cinématique et la densité du fluide. Le modèle renvoie un flux total de remise en suspension pour chaque élément de surface. Celui-ci est ensuite combiné au flux de dépôt pour définir le flux net de particules pour chaque élément de surface. Le flux net est utilisé pour fixer le terme source χ_s au niveau de la surface dans l'équation de transport scalaire suivante :

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} \Big|_{surface} = - \frac{\partial u_j \bar{C}}{\partial x_j} - \frac{\partial u'_j C'}{\partial x_j} + \chi_s \quad \text{avec} \quad \chi_s = (m_{resu} - m_{depo})/dtdV$$

avec dV le volume d'une maille de fluide. La méthode décrite ici est générale et ne repose sur aucune hypothèse propre au modèle RnR. Elle peut être appliquée à tout modèle de resuspension appartenant à la famille des approches cinétiques comme définie par Henry *et al* (2023). Le modèle RnR étant limité à certaines tailles de particules selon la plage de vitesses considérée, cela pourrait permettre d'étendre la modélisation de la remise en suspension dans PALM à d'autres tailles, formes et types de particules.

3. RÉSULTATS

Le couplage a été utilisé pour étudier la remise en suspension de PM10 dans un canyon urbain. Le domaine a les dimensions $L \times W \times H = 20 \times 20 \times 15$ m, avec une résolution spatiale uniforme de $\Delta = 0,1$ m. Le canyon urbain a une hauteur de 10 m et un ratio d'aspect de 1. L'écoulement est maintenu par un gradient de pression de $-0,05$ Pa/m dans la direction x. Les conditions aux limites sont cycliques dans les directions x et y. Une simulation précurseur a été menée pendant 1000s jusqu'à stabilisation de l'écoulement, après quoi la remise en suspension a été activée et la simulation a été poursuivie pendant 600s supplémentaires. Le dépôt a été désactivé.

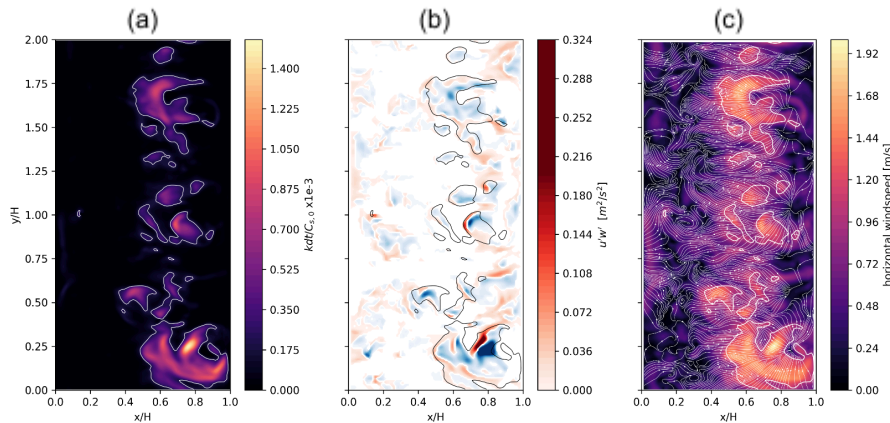


Figure 2. Plans x-y du (a) taux de remise en suspension, (b) flux vertical de quantité de mouvement et (c) vitesse horizontale. Dans (b) chaque couleur correspond à un quadrant Q1: vert, Q2 : rouge, Q3 : bleu et Q4 : violet. Les lignes blanches (a,c) et noires (b) sont des isolignes pour $\tau = 1.5e-5$ kg/m²s. Les plans sont pris à $t=1000s$.

La Figure 2 montre des coupes xy de la rue à $t = 1000s$, instant où la remise en suspension débute. Celle-ci se concentre du côté aval de la rue, sous la partie descendante de la zone de recirculation du canyon. Il apparaît que la remise en suspension n'est pas uniforme le long de la rue et qu'elle présente une structure définie. Une analyse par quadrants a été réalisée sur les fluctuations de vitesse pour identifier la nature des structures turbulentes responsables de cette organisation spatiale. Les zones de remise en suspension correspondent à de grandes structures turbulentes, où de larges zones Q3 sont entourées d'une bande étroite d'événements Q2 correspondant au front d'avancement d'une structure turbulente se déformant à proximité de la surface. Pour quantifier cette observation, on calcule le taux de resuspension partiel associé à chaque quadrant :

$$\tau_q = \sum_{x,y,t} \tau(x, y, t) I_q(x, y, t) \quad \text{avec} \quad \sum_{q=1}^4 \tau_q / \sum_{x,y,t} \tau(x, y, t) = 1$$

avec $I_q(x, y, t)$ valant 1 si un élément du quadrant q se situe au dessus de l'élément de surface (x,y) au temps t, et 0 sinon. On choisit un paramètre de trou $H=1$, afin de ne garder que les structures turbulentes telles que $u'w'$ est supérieur à la valeur moyenne du flux de quantité de mouvement vertical. Le taux de

resuspension partiel est calculé uniquement pour les structures après ce filtrage. Les résultats de cette analyse sont résumés dans le Tableau 1. Le taux de resuspension partiel a été divisé par le taux de resuspension total pour obtenir la contribution de chaque quadrant et la comparer à leur fréquence. Pour les structures d'intensité significative, les événements de type Q2 et Q3 correspondent à 80% de la resuspension observée, alors qu'ils ne constituent que 50% des événements turbulents. Cela renforce l'idée que la resuspension est le résultat d'une interaction entre la surface et des structures turbulentes de grande taille.

Tableau 1. Fréquence et contribution à la resuspension de chaque quadrant.

Quadrant	Fréquence	Contribution
Q1	0.28	0.09
Q2	0.18	0.2
Q3	0.35	0.6
Q4	0.19	0.11

4. CONCLUSION

Une formulation discrétisée du modèle de remise en suspension Rock'n'Roll a été implémentée avec succès dans le code PALM. Cette approche fournit ainsi un cadre et une méthode pour l'intégration de la remise en suspension dans un code CFD. L'application à un canyon urbain a montré que la remise en suspension est spatialement hétérogène et principalement gouvernée par des structures turbulentes cohérentes, les événements Q2 et Q3 contribuant le plus à la resuspension. L'analyse spectrale apparaît comme une prochaine étape intéressante afin d'isoler les structures contribuant réellement à la resuspension à l'intérieur des quadrants 2 et 3. Bien que ces événements semblent liés à l'advection de structures turbulentes par l'écoulement principal, une analyse fréquentielle permettrait de conforter ou rejeter cette hypothèse. Enfin, étendre ces analyses à un champ de paramètres plus étendu, notamment avec différents ratios d'aspect et directions du vent, permettra de prendre en compte la variabilité inhérente aux zones urbaines.

Banari, A., Hertel, D., Schlink, U., Hampel, U., et Lecrivain, G. (2022) Simulation of particle resuspension by wind in an urban system. *Environmental Fluid Mechanics*.

Chekrouba, K. (2025) Numerical study of particle resuspension induced by a vehicle's rotating wheel.

Henry, C., Minier, J.-P., et Brambilla, S. (2023) Particle resuspension: challenges and perspectives for future models. *Physics Reports*.

Linda, J., Hasečić, A., Pospíšil, J., Kudela, L., et Brzezina, J. (2025) Impact of wind-induced resuspension on urban air quality: a CFD study with air quality data comparison. *Climate and atmospheric science*.

Maronga, B. *et al.* (2020) Overview of the PALM model system 6.0. *Geoscience Model Development*.

Reeks, M.W., et Hall, D. (2001) Kinetic models for particle resuspension in turbulent flows: theory and measurement. *Aerosol Science*.

Vincent, J.C., Hill J., Walker, M.D., Smith, S.A., Smith, S.E., et Cant? N.E. (2019) Towards a predictive capability for the resuspension of particles through extension and experimental validation of the Biasi implementation of the 'Rock'n'Roll' model. *Journal of Aerosol Science*.