

# Etudes expérimentales et numériques d'un jet de particules : application au freinage ferroviaire

C. OCTAU<sup>a</sup> 1, M. LIPPERT<sup>a</sup>, T. DBOUK<sup>b</sup>, M. WATREMEZ<sup>a</sup>,  
L. KEIRSBULCK<sup>a</sup>, L. DUBAR<sup>a</sup>,

a. LAMIH, CNRS UMR 8201, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, Le Mont Houy,  
59313 VALENCIENNES CEDEX 9, France

b. Département Energétique industrielle (DEI), Ecole Nationale Supérieure des Mines-Douai, 941 rue  
Charles Bourseul, CS10838 59508 DOUAI CEDEX, France

...

## Résumé :

*Les transports ferrés urbains, bien que considérés comme une alternative écologique au transport individuel, font aujourd'hui l'objet d'un intérêt grandissant en termes de risque pour la santé et d'exposition aux particules fines. Des campagnes de mesures aux particules fines (PM) effectuées dans plusieurs réseaux souterrains de métropoles mondiales ont révélé des niveaux relativement élevés. Ces mesures se basent sur des taux moyens mesurés principalement en stations et ne permettent pas d'identifier précisément la provenance des particules. L'objectif principal de ce travail est d'apporter, par voie expérimentale, des éléments permettant d'améliorer les modèles numériques prédictifs de transport et de comportement des particules issues du freinage d'un matériel roulant. Cette étude vise principalement à tester numériquement la « Suspension balance Method » (SBM), méthode basée sur les phénomènes de migration de particules dans un écoulement. Une configuration canonique d'écoulement est définie (jet de particules en couche limite) en vue de procéder à une validation expérimentale par méthodes optiques. Ces essais sont réalisés dans un canal hydraulique avec injection de particules calibrées.*

## Abstract :

*Urban railway transportation, although regarded as a sustainable alternative to individual transport, is now the subject of growing interest in health risk and exposure to fine particulate matter. Measurements of fine particulate matter (PM) in several underground networks of worldwide cities have revealed relatively high levels. These measurements are based on average rates measured mainly in stations and do not make it possible to identify precisely the origin of the particles. The main objective of this work is to provide experimental data to improve numerical predictive models of transport and particle behavior resulting from the braking of rolling stock. This contribution aims to numerically test the "Suspension balance Method" (SBM), method based on the phenomena of migration of particles in a flow. A canonical configuration of flow is defined (jet of particles in boundary layer) in order to carry out an experimental validation by optical methods. These tests are carried out in a hydraulic channel with injection of calibrated particles.*

1. adresse de correspondance : charlene.octau@univ-valenciennes.fr

## Mots clefs : écoulement diphasique, méthodes optiques, CFD, freinage ferroviaire

### 1 Introduction

Les réseaux ferrés urbains (tramway, métro entre autres) sont considérés depuis toujours comme des moyens de transport durables. Ils permettent, en effet, de réduire la congestion des routes et de transporter un grand nombre d'individus à la fois. De ce fait, ces moyens de transport sont un outil important dans la réduction des émissions atmosphériques urbaines. Toutefois, des études réalisées dans les réseaux ferrés de grandes villes partout dans le monde ont montré que les concentrations en matière particulaire (PM) étaient en général supérieures à celles mesurées à l'air libre à proximité des routes [1, 2, 4]. Cependant, ces résultats ne sont pas étalonnés et calibrés de la même façon à chaque échantillonnage et pour chaque réseau. Il existe des différences dans la méthode de prélèvement, l'analyse des composés, le temps et l'environnement d'échantillonnage qui rendent toutes comparaisons difficiles. De plus la concentration dépend également de plusieurs facteurs relatifs à l'environnement parmi lesquels on peut citer : l'implantation et la taille des stations, la vétusté des systèmes d'aération, les mécanismes et matériaux de freinage, la vitesse et la fréquence du train et le nombre de voyageurs. Ces PM retrouvées en souterrain sont principalement générées par les mécanismes d'abrasion des rails, des roues ainsi que des garnitures de freinage. Le mouvement des voyageurs en station contribue au mélange et à la suspension de ces PM [10].

Cette différence entre niveaux de PM à l'air libre et dans les réseaux souterrains ferrés soulève la question du danger que peut représenter une telle exposition sur la santé des usagers. En effet, des millions de voyageurs empruntent chaque jour les transports en commun et passent un temps non négligeable dans les stations. Plusieurs études, [1, 3, 5, 6] ont montré que l'exposition aux PM était liée à des effets néfastes sur les systèmes respiratoire et cardiovasculaire. L'effet le plus dangereux de ces PM est dû à leur taille : plus ces particules sont fines, plus elles pénètrent le système respiratoire et peuvent causer des altérations.

Malgré le nombre d'études effectuées sur les PM dans les réseaux souterrains, la plupart de celles-ci portait uniquement sur la surveillance des niveaux sur les quais ou les risques sanitaires qu'ils pouvaient provoquer ; Aucune étude n'a été réalisée sur la quantification et l'identification des PM de chaque source et leur contribution au taux global, et encore moins dans le cas des PM générées par le freinage. De plus, les rares études trouvées portant sur les émissions de particules d'usure ne traitaient pas de l'aspect dynamique de leur comportement ou de leur transport.

L'objectif premier de cette étude est d'utiliser une approche numérique permettant de prédire le comportement dynamique des particules d'usure en simulant la génération de ces particules lors d'un cycle de freinage typique. Certaines études portant sur le déplacement de particules dans un écoulement multiphasique (gaz/particules) peuvent être trouvées dans la littérature. Parmi tous les modèles multiphasiques existants, la méthode des éléments discrets (DEM) est une approche puissante pour étudier la dynamique de particules, mais dans le cas où ces particules sont présentes en grand nombre, cette approche devient trop coûteuse en temps de calcul. Une autre approche, proposée pour la première fois par Nott et Brady [11] est la méthode de l'équilibre de suspension (Suspension Balance Method - SBM) qui entre dans la gamme des approches de milieu continu. Le concept physique derrière la SBM est que la variation de concentration des particules dans l'écoulement est causée par la compétition entre les forces hydrodynamiques et d'interaction. Les forces d'interaction dans la SBM sont représentées par le tenseur d'effort anisotropique des particules, responsable du phénomène de migration induit par le cisaillement. La SBM

a été validée pour des écoulements de suspensions à bas Reynolds ( $Re_p = \frac{\rho \dot{\gamma} a^2}{\eta} \ll 1$ ) et à haut nombre de Peclet ( $Pe_p = \frac{6\pi\eta\dot{\gamma}a^3}{kT} \gg 1$ ) pour une échelle de particule proche de celle étudiée ici. L'utilisation de la SBM sera confrontée à des résultats expérimentaux effectués par ombroscopie dans des champs de concentration instationnaires.

Les particules solides utilisées pour cette étude sont des particules rigides de molybdène, dont la distribution granulométrique est comprise entre 1 et 80  $\mu m$ . Ces particules ont une densité et une répartition granulométrique proches de celles attendues lors du freinage (Fig. 1).

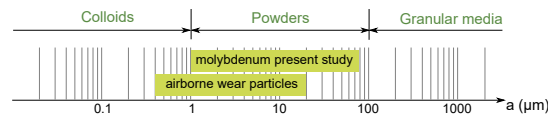


FIGURE 1 – Catégories de particules

Cette contribution se focalisera sur la prédiction du comportement dynamique des particules à l'aide des champs de concentration. Dans ce but, des essais sont réalisés dans un canal hydrodynamique horizontal dans lequel une solution de particules est injectée verticalement par la face inférieure de celui-ci. Le choix de travailler dans l'eau plutôt que l'air est dû au fait que les similitudes de Reynolds permettent de travailler à des vitesses plus faibles, surtout dans le cas du ferroviaire où celles-ci sont importantes. De plus, la visualisation de particules très fines est meilleure dans l'eau que dans l'air. Les mesures et analyses sont ensuite effectuées à l'aide de la technique d'ombroscopie afin de déterminer les champs instantanés de concentration en particules. Des simulations numériques sont alors réalisées, sur la base de la SBM dans une configuration en deux dimensions à l'aide du logiciel de CFD (Computational Fluid Dynamics) « OPENFOAM » dans le but d'être comparées aux résultats expérimentaux. Cette comparaison a pour finalité de valider la méthode SBM dans ce cas d'étude. In fine, des essais seront réalisés dans l'air afin de s'assurer que la configuration paramétrée dans l'eau reste valide. Ce document se compose en trois parties : la présentation du montage expérimental, l'approche numérique adoptée et les comparaisons des résultats obtenus.

## 2 Essais expérimentaux

### 2.1 Configuration et mise en place des mesures

Les essais expérimentaux ont été réalisés dans un canal hydrodynamique en circuit fermé avec une veine d'essais de 1300 mm de long et de section 150 x 150 mm comme indiqué sur la Fig. 1. Les particules sont injectées à 300 mm de l'entrée de la veine d'essais à travers un tuyau de diamètre 6.6 mm connecté à un réservoir par une pompe. La pompe permet de définir la vitesse d'injection des particules et de la maintenir au cours de l'essai. L'écoulement dans le canal est généré par une autre pompe continue capable d'induire un écoulement jusqu'à 2 m/s.

Pour les essais, la technique d'ombroscopie est utilisée pour obtenir les champs de concentration des particules. Comparée à la PIV classique par laser, le principal avantage de l'ombroscopie est d'obtenir des images contrastées de champ de particules surtout dans le cas où celles-ci ne sont pas réfléchissantes. Le champ de concentration des particules est calculé sur la base de l'intensité des pixels pour laquelle une valeur référence de concentration est définie. Le principe de l'ombroscopie est d'éclairer un diffuseur à

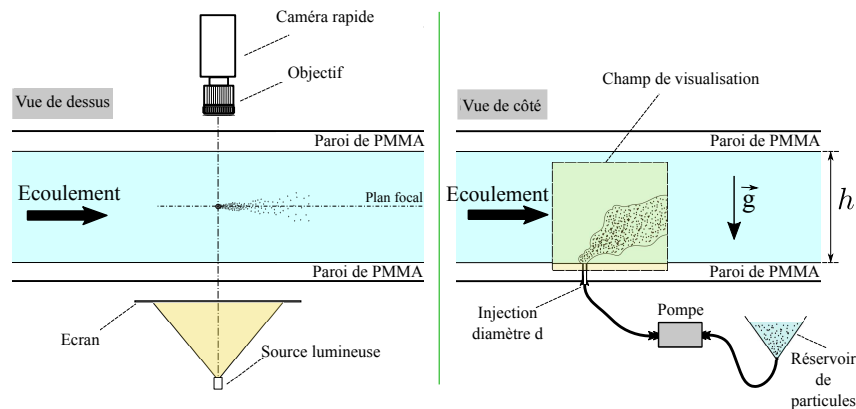


FIGURE 2 – schéma de configuration des essais

l'aide d'une source lumineuse dans le but d'obtenir un contraste important entre le fond et les particules, comme le montre la Fig. 2.



FIGURE 3 – Image obtenue par ombroscopie

La Fig. 3 est un exemple d'image obtenue par cette technique. La caméra utilisée pour les essais est une caméra rapide de type PHANTOM MIRO 310 à 1 Megapixel avec un taux d'acquisition maximal de 3200 images par seconde à pleine résolution (1280x800). L'exposition minimale de cette caméra est de  $1 \mu s$ . Pour les essais présentés ici, l'acquisition a été réalisée à 1000 images par seconde en pleine résolution afin de pallier aux effets de flou causés par le déplacement des particules dans l'écoulement. L'optique utilisée a pour distance focale  $60 \text{ mm}$  afin d'obtenir un champ de visualisation du jet suffisamment important ( $\frac{\Delta x}{h} = 0.6$  et  $\frac{\Delta y}{h} = 0.35$ ). Le post-traitement des images est réalisé à l'aide du logiciel commercial MATLAB.

## 2.2 Propriété des particules et conditions d'injection

Des particules de molybdène, dont la densité est d'environ  $10.8 \text{ g/cm}^3$ , ont été injectées verticalement dans le canal à partir de la surface inférieure de celui-ci. Ces particules, présentes sous forme de poudre, sont supposées avoir une distribution granulométrique proche des particules générées lors d'un cycle de freinage classique. Dans le cas de suspension poly-disperse, cette distribution est généralement bia-

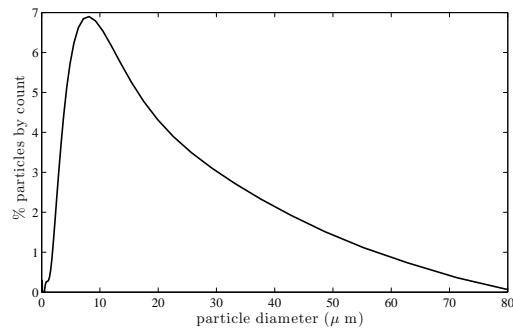


FIGURE 4 – Représentation granulométrique du Molybdène étudié

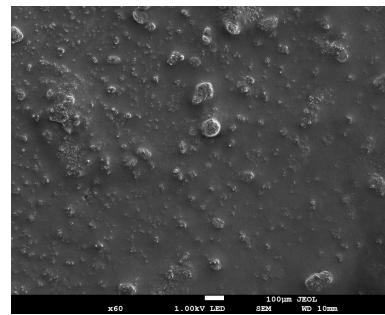


FIGURE 5 – Image obtenue au Microscope Électronique à Balayage

sée du fait qu'une large partie des particules sont le résultat de l'agrégation de petites particules mais également de la désagrégation de plus grosses. L'analyse granulométrique permettant d'obtenir cette distribution (Fig. 4) a été effectuée à l'aide d'un granulomètre MICROMETRICS MASTERSIZER 3000 équipé du module HYDROEV.

La distribution granulométrique des particules montre un pic en nombre de particules pour le diamètre  $7 \mu m$  et un diamètre moyen de  $20 \mu m$ . La forme des particules affecte leur aérodynamisme et leur comportement diffusif, par conséquent, c'est un des facteurs importants à prendre en compte dans la détermination des mécanismes de transport des particules. L'observation de la forme de ces particules de molybdène a été effectuée à l'aide d'un microscope électronique à balayage de type JEOL JSM-7100F TtLS. Sur la Fig. 5, les particules ne semblent pas présenter de forme allongée, mais une forme que l'on peut considérer comme sphérique. De ce fait, des particules rigides et sphériques sont considérées lors des simulations numériques.

Afin de reproduire au mieux la génération des particules lors du freinage en laboratoire, l'injection des particules de molybdène dans le canal se fait à l'aide d'une pompe permettant d'obtenir deux cinématiques d'injection différentes ; la première représentant l'augmentation de la concentration causée par l'application du patin sur le disque de frein et la seconde la diminution de la concentration lorsque le contact entre les deux pièces ne se fait plus, comme le montre la Fig. 6. Sur cette figure, la courbe noire correspond au profil d'injection obtenu lors d'un essai à la sortie du tube dans le canal tandis que les courbes rouge et bleue correspondent aux équations correspondant au mieux au profil.

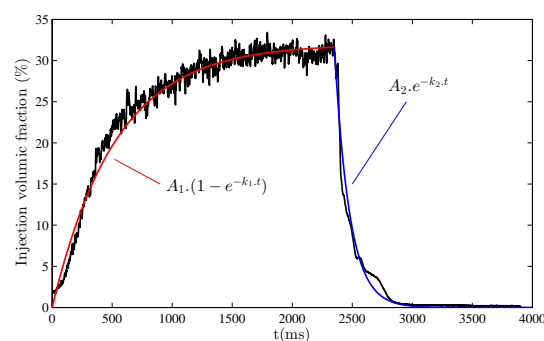


FIGURE 6 – tracé en fonction du temps de la fraction volumique de l'injection et des équations associées avec  $A_1 = 32$ ,  $k_1 = 1.9 \cdot 10^{-3}$ ,  $A_2 = 4.66 \cdot 10^9$  and  $k_2 = 8 \cdot 10^{-3}$ .

### 3 Approche numérique

#### 3.1 Equations gouvernant l'écoulement multiphasique

Un écoulement incompressible, diphasique (liquide et particules), transitoire est décrit par les lois de conservation de la masse et du moment comme suit :

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{u} & = \mathbf{0} \\ \rho(\phi) \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = \nabla \cdot \mathbf{T} - \rho(\phi) \mathbf{g} & = \mathbf{0} \end{cases} \quad (1)$$

Où  $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$  est la vitesse de l'élément contenant un mélange de particules et de fluide en suspension (appelée par la suite vecteur vitesse de suspension),  $\phi$  est la fraction volumique en particule,  $\mathbf{g}$  est l'accélération causée par la gravité et  $\mathbf{T}$  est le tenseur d'efforts du mélange. De plus, la masse volumique du mélange est donnée par :

$$\rho(\phi) = \rho_p \phi + \rho_f (1 - \phi) \quad (2)$$

Où  $\rho_f$  est la masse volumique du fluide et  $\rho_p$  celle de la particule de telle sorte que  $\Delta \rho = (\rho_p - \rho_f)$ . L'évolution de la fraction volumique  $\phi$  est donnée par l'équation de transport de diffusion convection pour la phase particulaire comme suit :

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \phi = -\nabla \cdot \mathbf{J}_t \quad (3)$$

Où  $\mathbf{J}_t$  est le flux total de migration défini comme  $\mathbf{J}_t = \mathbf{J}_\phi + \mathbf{J}_g$  prenant en compte la migration des particules induite par le cisaillement notée  $\mathbf{J}_\phi$  et celle induite par la flottabilité notée  $\mathbf{J}_g$  au cours de l'écoulement.

#### 3.2 La « Suspension Balance Method »(SBM)

Le concept physique de la « Suspension Balance Method » est de modéliser le flux de migration  $\mathbf{J}_\phi$  de l'équation (3) de manière proportionnelle au tenseur des efforts des particules qui représente les forces de contact entre les particules rigides (considérées sphériques). Le flux de migration  $\mathbf{J}_\phi$  dans la SBM est défini de la façon suivante :

$$\mathbf{J}_\phi = \frac{2a^2}{9\eta_0} f(\phi) \nabla \cdot \mathbf{T}^p \quad (4)$$

Où  $a$  est le rayon de la particule solide,  $\eta_0$  la viscosité du fluide Newtonien immergé et  $f(\phi)$  la fonction qui représente la mobilité des particules. Le flux de migration causé par la flottabilité  $\mathbf{J}_g$  dans la SBM est donné par :

$$\mathbf{J}_g = f(\phi) \nu_{stokes} \phi \quad (5)$$

Où  $(\nu_{stokes} = \frac{2a^2}{9\eta_0} \Delta \rho \mathbf{g})$  est la vitesse de Stokes d'une particule.

Dans la SBM, l'effort total  $\mathbf{T}$  dans la suspension est décomposé en un effort  $\mathbf{T}^f$  de la phase fluide et un effort anisotropique de la phase particulaire  $\mathbf{T}^p$  de telle sorte que  $\mathbf{T} = \mathbf{T}^f + \mathbf{T}^p$ . L'effort de la phase fluide

est défini par  $\mathbf{T}^f = -p_f \mathbf{I} + 2\eta_0 \mathbf{E}$  où  $\mathbf{E}$  est le taux local du tenseur de contrainte, et  $p_f$  est la pression de la phase fluide. Le tenseur des efforts appliqués à la phase particulaire pour des écoulements cisailés est décomposé en une partie normale et une autre cisailée telle que  $\mathbf{T}^p = -\eta_0 \eta_N(\phi) \dot{\gamma} \mathbf{Q} + 2\eta_0 \eta_P(\phi) \mathbf{E}$  où  $\eta_P(\phi) = (\eta_S(\phi) - 1)$  est la viscosité de cisaillement mesurable et  $\eta_N(\phi)$  et la viscosité normale mesurable.  $\mathbf{Q}$  est le tenseur diagonal de la forme :

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3(\phi) \end{pmatrix} \quad (6)$$

Les paramètres physiques dans la SBM pour cette étude sont choisis comme étant identiques à ceux récemment mesurés par [Dbouk et al. \[7\]](#) à partir des mesures de différences de l'effort normal de suspension.

$$\begin{aligned} f(\phi) &= (1 - \phi)^3 \left(1 - \frac{\phi}{\phi_m}\right) \\ \lambda_2(\phi) &= 0.81 \left(\frac{\phi}{\phi_m}\right) + 0.66 \\ \lambda_3(\phi) &= -0.0088 \left(\frac{\phi}{\phi_m}\right) + 0.54 \\ \eta_S(\phi) &= \left(1 - \frac{\phi}{\phi_m}\right)^{-2} \\ \eta_N(\phi) &= 1.08 \left(\frac{\phi}{\phi_m}\right)^2 \left(1 - \frac{\phi}{\phi_m}\right)^{-2} \\ \eta_P(\phi) &= \eta_S(\phi) - 1 \end{aligned} \quad (7)$$

$\phi_m$  correspond au paramètre géométrique connu comme étant la fraction volumique maximale de l'échantillon qui dépend du type et de la forme des particules solides. Pour des particules sphériques,  $\phi_m$  peut varier entre 0.62 et 0.76 suivant la rugosité de surface et le degré de polydispersité. La SBM a été étendue récemment par [\[8,9\]](#) afin de prédire les écoulements de suspensions en considérant une version modifiée du tenseur d'effort des particules. Dans ce but, un solveur deux dimensions a été développé et validé avec OPENFOAM, permettant de résoudre l'ensemble des équations conservatives de la SBM en utilisant la méthode des éléments finis (MEF).

La MEF est une approche numérique bien connue qui garantit la conservation des flux dans des écoulements fluides et qui est une technique numérique très largement utilisée pour résoudre des problèmes CFD (Computational Fluid Dynamics). Pour l'étude actuelle, un maillage non-structuré 2D d'environ  $146 \cdot 10^3$  cellules a été réalisé. Chaque calcul transitoire est réalisé avec un pas de temps de  $10^{-5}$  s (satisfaisant le critère  $C_{FL} \ll 1$ ) sur un serveur à haute performance de 32 processeurs (2.4 GHz chacun). Pour un seul cas numérique, le temps total de calcul est d'environ 8 heures et la mémoire nécessaire est de 1.2 Gb.

TABLE 1 – Caractéristiques numériques des cas tests

Cas numériquesSBM	Diamètre, $2a$ ( $\mu m$ )	$\phi_m$ (%)
<b>A</b>	20	68
<b>B</b>	20	72
<b>C</b>	40	72

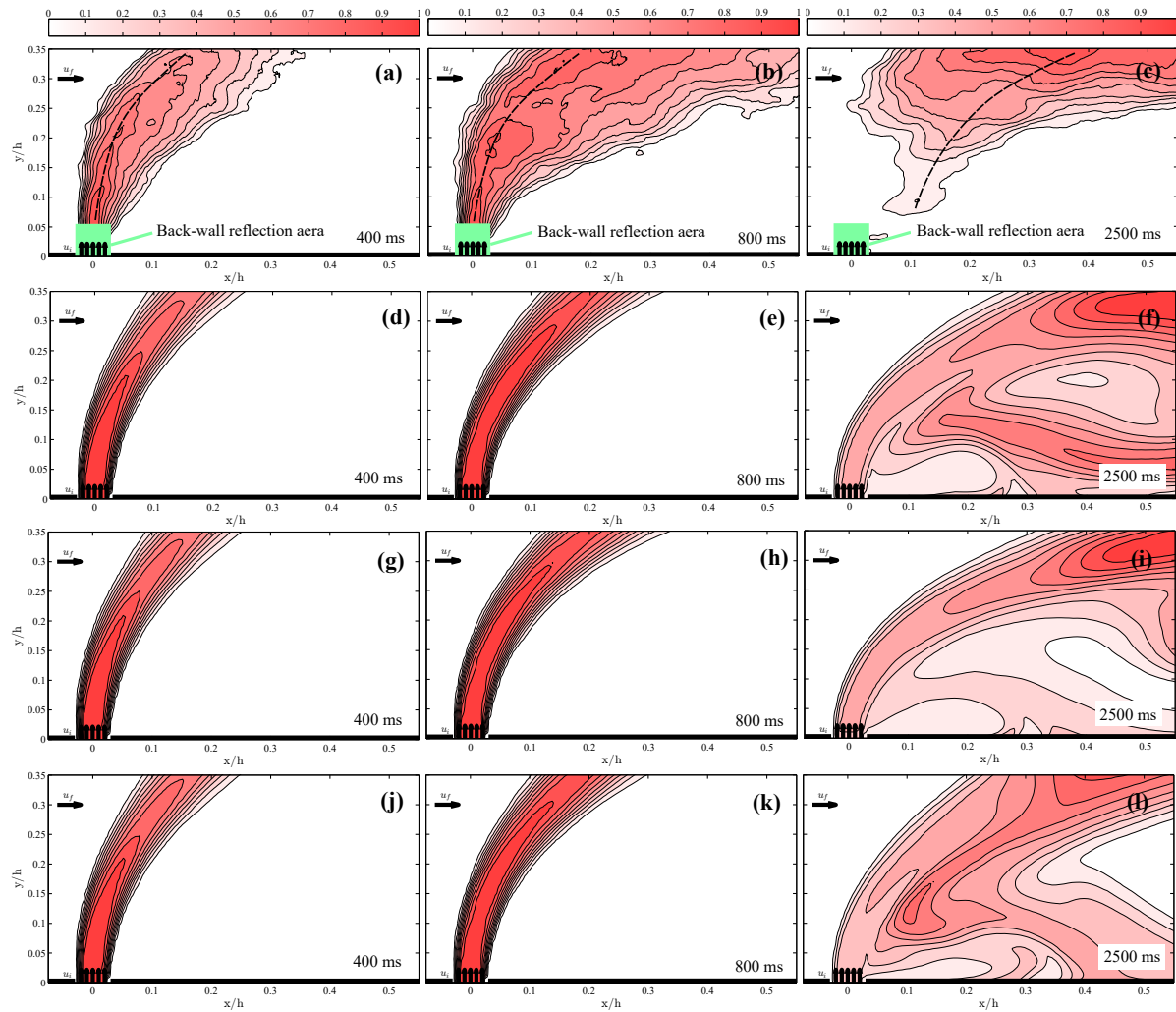


FIGURE 7 – Champs instantanés normés de la concentration. pour l'expérimental (a, b, c), et pour l'expérimental (d, e, f) à  $(2a = 20\mu\text{m}, \phi_m = 0.68)$ , (g, h, i) à  $(2a = 20\mu\text{m}, \phi_m = 0.72)$  et (j, k, l) à  $(2a = 40\mu\text{m}, \phi_m = 0.72)$  pour les temps,  $t = 400\text{ms}$ ,  $800\text{ms}$  et  $2500\text{ms}$ .

## 4 Résultats

En se basant sur les premiers résultats expérimentaux et numériques obtenus, nous nous sommes focalisés sur la capacité qu'a la méthode SBM de prédire le transport des particules. Les champs instantanés de concentration obtenus expérimentalement (à l'aide de la technique d'ombroscopie) sont dans un premier temps calculés avec Matlab puis sont ensuite comparés à ceux obtenus lors des simulations avec le modèle SBM. Trois différents cas numériques ont été considérés pour cette comparaison. Dans un premier temps, les diamètres de la phase particulaire monodisperse  $2a$  sont pris respectivement à  $20\mu\text{m}$  et  $40\mu\text{m}$  et dans un second temps, la fraction volumique maximale  $\phi_m$  est prise égale à 68 % et 72 %. Les 3 cas, nommés A, B et C sont reportés dans le tableau 1. Afin de clarifier l'étude comparative, les images obtenues expérimentalement sont moyennées autour d'un temps instantané  $t$ , puis lissées afin d'éviter toute divergence artificielle due à des artefacts optiques. La Fig. 7 présente les champs de concentration normés aux temps  $400\text{ms}$ ,  $800\text{ms}$  et  $2500\text{ms}$  pour le cas expérimental et les trois cas numériques A, B et C. A  $t = 400\text{ms}$  après le début de l'injection, une bonne corrélation semble être



obtenue entre les trois cas numériques **A**, **B** et **C** et l'expérimental. La courbe en pointillés sur la Fig. 7a correspond à la position du maximum de concentration par rapport à la position  $y/h$ . Cette courbe peut être utilisée, en tant que courbe de référence, afin d'obtenir une meilleure comparaison entre les données expérimentales et numériques. La courbe de référence montre une bonne correspondance surtout dans le cas numérique **C** (Fig. 7j) qui a pour paramètres ( $2a = 40 \mu m$ ,  $\phi_m = 72\%$ ). En revanche, dans tous les cas **A**, **B** et **C**, la diffusion horizontale des particules est sousestimée par la SBM. A  $t = 800 ms$ , des conclusions similaires peuvent être faites, la courbe de référence semble être bien prédite par la SBM. Mais, la diffusion horizontale est là encore sousestimée. Cela peut s'expliquer de plusieurs façons :

- a) Le maillage raffiné n'a été appliqué que localement sur les cellules de la région proche de l'injection ce qui génère des cellules de maillage plus large dans les régions éloignées (i.e.  $y/h > 0.1$ ;  $x/h > 0.1$ );
- b) Dans ces premières simulations, les facteurs de pondération par défaut ont été imposés dans les composantes diagonales du tenseur d'effort anisotrope de particule (les forces entre le cisaillement simple des suspensions et le comportement d'élongation de l'écoulement), comme proposé par [7];
- c) La condition de concentration à la limite ( $\phi_{injected}(t)$ ) dans chaque cas **A**, **B** et **C** est imposée comme étant un profil d'injection uniforme le long de la section d'injection (en se basant sur les valeurs expérimentales présentées en Fig. 6). Cependant, dans le cas réel il existe des profils de concentration non-uniformes le long de la section d'injection ce qui peut affecter les résultats numériques.

A  $t = 2500 ms$ , lorsque l'injection de particules diminue considérablement, le transport des particules change drastiquement. Pour les cas numériques **A** et **B**, pour un diamètre de particules de  $20 \mu m$  et lorsque  $\phi_m$  varie de 68% à 72%, la position de la courbe de référence n'est pas bien représentée numériquement ( $x/h = 0.5$ ;  $y/h = 0.3$ ). Toutefois, pour le cas **C** ( $2a = 40 \mu m$ ,  $\phi_m = 72\%$ ) la courbe de référence expérimentale est numériquement bien prédite comme le montre la Fig. 7. Cela illustre l'influence du rayon de la particule et de la fraction volumique maximale dans la SBM sur le transport dynamique des particules en suspension monodisperse.

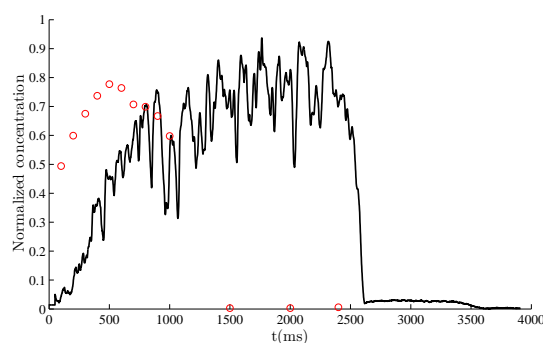


FIGURE 8 – Concentration normée en fonction du temps pour les positions  $x/h = 0.1$ ,  $y/h = 0.3$ . La ligne noire correspond aux résultats expérimentaux et les cercles rouges aux résultats numériques obtenus par la SBM  $\phi_m = 0.72$  et  $a = 40 \mu m$ .

Afin de se focaliser sur les niveaux de concentration à un emplacement donné dans le canal, la Fig. 8 présente la concentration normée expérimentale ( $\frac{\phi}{\phi_{bulk}}$ ) en fonction du temps pour la position  $x/h = 0.1$ ,  $y/h = 0.3$ . Une comparaison est faite avec les résultats numériques de la SBM du cas **C** sur quelques ins-

tants  $t$ . La principale observation qui en découle est que bien que le comportement global soit conservé, la diffusion horizontale affecte considérablement le comportement local des niveaux de concentration. La prédiction numérique de la SBM (cercles rouges sur la Fig. 8) montre qu'à cette position, une augmentation rapide de la valeur de concentration jusqu'à  $t = 500ms$  est suivie d'une diminution également rapide jusqu'à atteindre zéro entre  $t_1 = 1000ms$  et  $t_2 = 1500ms$ . Toutefois, dans les essais, la courbe noire de la Fig. 8 montre à cette même position, une augmentation progressive des valeurs de concentrations jusqu'à  $t = 2500ms$  puis une brusque diminution jusqu'à zéro entre  $t_1 = 2500ms$  et  $t_2 = 2550ms$ . Cet écart temporel dans la prédiction des valeurs de concentration locale entre les essais et la SBM peut s'expliquer par l'incertitude de la valeur de la fraction volumique  $\phi_m$  (voir [9]).

## 5 Conclusion et Perspectives

Cette contribution propose une approche prédictive des phénomènes de transport de particules dans le cas de freinages de type ferroviaire. Les simulations par la méthode SBM dans une configuration d'écoulement simple a fourni les champs de concentration instantanés qui peuvent être directement comparés à l'expérimental. La conclusion principale de ce travail est que la SBM a un bon potentiel dans la prédiction du transport de particules dans les écoulements de suspension. L'analyse des champs instantanés de concentration a révélé une corrélation relativement bonne entre les essais et les prédictions de la SBM, surtout pour une évolution à court terme. Ceci étant le cas bien que les particules soient modélisées numériquement comme une phase monodisperse au lieu d'une phase polydisperse dans la réalité. Finalement, il a été montré que le paramètre  $\phi_m$ , la condition locale d'injection en concentration, le raffinement du maillage, le diamètre  $2a$  des particules monodisperses et le tenseur d'effort anisotropique des particules doivent tous être étudiés de manière précise et approfondie lors de l'utilisation de la SBM dans de futures recherches. Ceci est essentiel afin de prédire précisément les phénomènes de diffusion horizontale observés expérimentalement dans ces travaux.

## Remerciements

Ces travaux s'inscrivent dans les thèmes de la Fédération de Recherche CNRS Transports Terrestres & Mobilité, en articulation avec le projet ELSAT2020 cofinancé par l'Union Européenne, le Ministère de l'Education Nationale de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche et la Région Hauts de France, dans le cadre du Contrat de Plan Etat-Région 2015-2020. Les auteurs remercient le support de ces institutions. Les auteurs remercient également ALSTOM SA pour sa grande contribution et le financement de la thèse dans laquelle s'inscrivent ces travaux.

## Références

- [1] V. Martins, T. Moreno, M. Cruz Minguillón, F. Amato, E. de Miguel, M. Capdevilac, X. Querol, Exposure to airborne particulate matter in the subway system, *Science of the Total Environment*, 511 (2015) 711–722.
- [2] V. Martins, T. Moreno, L. Mendes, K. Eleftheriadis, E. Diapouli, C.A. Alves, M. Duarte, E. de Miguel, M. Capdevila, X. Querol, M. Cruz Minguillón, Factors controlling air quality in different European subway systems, *Environmental Research*, 146 (2016) 35–46.

- [3] T. Moreno, V. Martins, X. Querol, T. Jones, K. BéruBé, M. Cruz Minguillón, F. Amato, M. Capdevila, E. de Miguel, S. Centelles, W. Gibbons, A new look at inhalable metalliferous particles on rail subway platforms, *Science of the Total Environment*, 505 (2015) 367–375.
- [4] M.J. Nieuwenhuijsen, J.E. Gómez-Perales, R.N. Colvile, Levels of particulate air pollution, its elemental composition determinants and health effects in metro systems, *Atmos. Environment*, 41 (2007) 7995–8006.
- [5] K.-H. Kim, E. Kabir, S. Kabir, A review on the human health impact of airborne particulate matter, *Environment International*, 74 (2015) 136–143.
- [6] W.J. Shaughnessy, M.M. Venigalla, D. Trump, Health effects of ambient levels of respirable particulate matter (PM) on healthy, young-adult population, *Atmos. Environment*, 123 (2015) 102–111.
- [7] T. Dbouk, E. Lemaire, L. Lobry, F. Moukalled, Shear-induced particle migration : Predictions from experimental evaluation of the particle stress tensor, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 198 (2013) 78–95.
- [8] T. Dbouk, L. Lobry, E. Lemaire, Normal stresses in concentrated non-Brownian suspensions, *J. Fluid Mech.*, 715 (2013) 239–272.
- [9] T. Dbouk, A suspension balance direct-forcing immersed boundary model for wet granular flows over obstacles, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 230 (2016) 68–79.
- [10] X. Querol, T. Moreno, A. Karanasiou, C. Reche, A. Alastuey, M. Viana, O. Font, J. Gil, E. Miguel, M. Capdevial, Variability of levels and composition of PM10 and PM2.5 in the Barcelona metro system, *Atmos. Chem. Phys.*, 11 (2012) 5055-5076.
- [11] P.R. Nott, J.F. Brady, Pressure-driven flow of suspensions : simulation and theory, *J. Fluid Mech.*, 275 (1994) 157–199.