

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF POLLUTANT DISPERSION ON AND AROUND A RIVER SHIP

T. Rappaport^{*1,2}, G. Fokoua², A. Mehel², B. Arcen¹, A. Tanière¹

¹Université de Lorraine, CNRS, LEMTA, F-54000 Nancy, France

²ESTACA, ESTACA'Lab – Paris-Saclay, F-78180 Montigny-le-Bretonneux, France

*Courriel de l'orateur : thomas.rappaport@estaca.fr

RESUME

La pollution atmosphérique par les particules fines et ultrafines est responsable de millions de décès prématurés dans le monde. L'impact des navires fluviaux sur la qualité de l'air reste toutefois mal documenté. Cette étude propose une méthodologie combinant mécanique des fluides numérique (CFD) et soufflerie pour cartographier les concentrations de particules émises autour d'un bateau de croisière. Le M.S. Lafayette, de la flotte de CroisiEurope, a été reproduit grâce à de la CAO. L'écoulement de l'air autour du bateau, est modélisé sous ANSYS Fluent avec un modèle $k - \omega SST$, réputé précis dans des scénarios de décollement de couche limite et de gradients de pression défavorables, couplé au Modèle de Diffusion Inertiel (DIM). Les résultats montrent que les recirculations à l'arrière du navire concentrent les particules ultrafines en périphérie des tourbillons et que celles-ci suivent fidèlement les lignes d'écoulement, comme le montre la comparaison entre vitesse et concentration normalisées. Cette approche fournit une base solide pour évaluer l'exposition des passagers et du personnel naviguant ainsi que des riverains à la pollution aux particules fines et ultrafines.

ABSTRACT

Atmospheric pollution by fine and ultrafine particles causes millions of premature deaths worldwide. The contribution of inland ships to this problem remains poorly quantified. We present a combined numerical and experimental methodology to map emitted particle concentrations around a river cruise ship. The M.S. Lafayette is modelled in ANSYS Fluent using a $k - \omega SST$ turbulence model coupled with the Diffusion Inertia Model (DIM) for particle dispersion. Results reveal that recirculation vortices at the stern confine ultrafine particles at their periphery and that the particles faithfully follow the flow, as shown by the comparison of normalized velocity and concentration fields. This methodology provides a robust basis for assessing passenger exposure to particulate matter and guiding the design of new policies to control inland vessels emissions.

MOTS-CLES : MFN, Particule Ultrafine, Dispersion particulaire, Bateaux, Fluvial, Soufflerie. / **KEYWORDS**: CFD, Ultrafine Particles, particle dispersion, Ships, Rivers, Wind Tunnel

INTRODUCTION

La pollution aux particules fines (PM) et ultrafines (UFP), est une des causes majeures des décès prématurés dans le monde. L'OMS estime le bilan à 6,7 millions de décès prématurés par an (OMS, 2019). En Europe le secteur du transport représente 19,7% des émissions de PM₁₀ (European Environment Agency, 2023). Bien que le transport fluvial présente de nombreux avantages environnementaux comparé à d'autres modes de transport (29% et 35% d'émissions de PM en moins par rapport aux transports ferroviaire et routier (*Maritime Administration*, 2024)). Pourtant son impact sur la qualité de l'air reste peu étudié dans la littérature scientifique : *Zhang et al.*, ont recensé seulement soixante articles entre 2000 et 2024.

La collecte de données expérimentales, in situ, est difficile et coûteuse ; la modélisation est une approche plus économe en ressource et par certains aspects, plus facile à mettre en place. La littérature scientifique existante se concentre sur l'utilisation de modèles à grande échelle tel que CALPUFF ou encore CityChem. Ces modèles ont l'avantage de simuler la dispersion des particules sur de grandes échelles et de prendre en compte des mécanismes complexes comme les polluants secondaires. Néanmoins ces modèles ne capturent pas complètement la topologie de l'écoulement à des échelles plus fines. Ainsi, ils ont tendance à sous-estimer les concentrations de particules fines et ultrafines (*Huang et al.*, 2022).

Ce travail vise à établir, grâce à la Mécanique des Fluides Numérique (MFN ou CFD), des cartes de concentration de particules fines et ultrafines à bord du bateau et dans ses environs. Cette approche permet une compréhension plus fine de l'étude des mécanismes de dispersion que les modèles régionaux comme CALPUFF (*Toscano et al.*, 2021). Les parties suivantes présenteront la méthodologie numérique et expérimentale, discuteront des résultats et concluront le travail.

METHODOLOGIE

PARTIE NUMERIQUE

La méthodologie et les résultats présentés reposent sur le logiciel ANSYS Fluent 24.2. Le bateau M.S. Lafayette de la flotte CroisiEurope a été reproduit numériquement (échelles 1 et 1/120), grâce à de la Conception-Assistée par Ordinateur (CAO) (cf figure 1a et 1b). Un maillage polyédrique, mieux adapté aux géométries complexes, a été retenue ; il offre une meilleure qualité et nécessite moins d'éléments qu'un maillage tétraédrique. Quatre zones (notées 1 à 4 dans la figure 1c), permettent de contrôler la taille et assure une transition douce de la taille des mailles dans le sillage. La zone 1 contient les mailles les plus fines, la

zone 4 les plus grossières. En dehors de ces zones (zone 5), la taille maximale des éléments est fixée à 10 m (figure 1c).

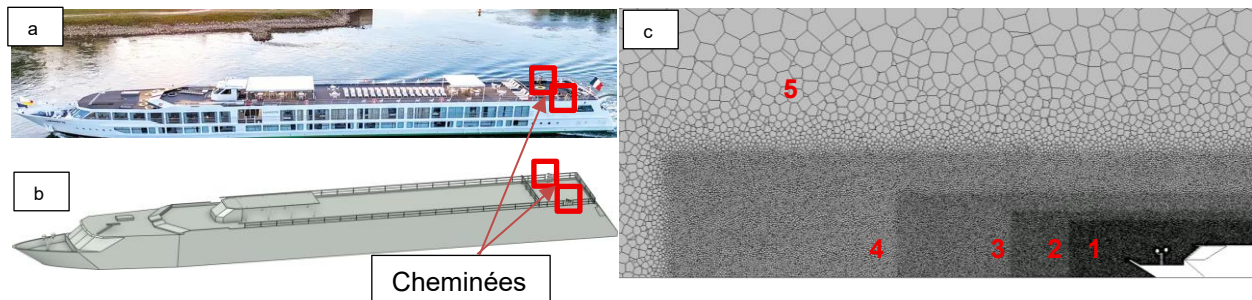


Figure 1 : a) MS Lafayette b) CAO c) Maillage.

Le bateau est placé dans un domaine fluide dont les dimensions sont indiquées en figure 2 (avec la longueur du bateau $L_{OA} = 90\text{ m}$). Nous considérons un cas de référence où le bateau se déplace à 20 km/h sans vent. Dans le référentiel du bateau, cela équivaut à un vent uniforme de 5 m/s environ. Le tableau 1 résume les conditions aux limites. Nous utilisons un modèle RANS fondé sur le $k - \omega SST$, réputé précis dans des scénarios de décollement de couche limite et de gradients de pression défavorables.

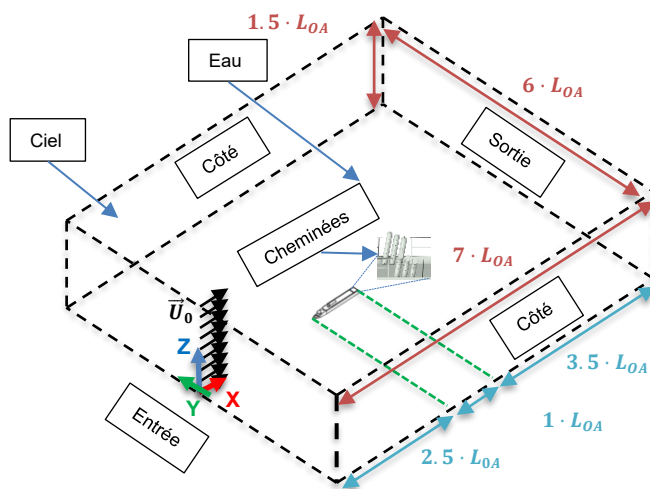


Figure 2 : Domaine Fluide

Positions	Conditions Limites
Entrée	« Velocity inlet » $ \vec{U}_0 = 5\text{ m.s}^{-1}$
Cheminées	« Velocity inlet » $ \vec{U}_{exh} = 2.88\text{ m.s}^{-1}$
Sortie	« Pressure outlet »
Eau	« Moving Wall » $ \vec{U}_w = \vec{U}_0 $
Ciel & Côtés	« Symmetry »

Table 1 : Conditions Limites écoulement de l'air.

Pour modéliser la dispersion des particules fines et ultrafines, nous avons adopté une approche eulérienne (Euler–Euler) utilisant le modèle de diffusion inertielle (DIM) développé par Zaïchik *et al.* (2010). Cette approche est moins coûteuse en calculs qu'une approche lagrangienne, tout en tenant compte en partie de phénomènes clés comme les dépôts et la dispersion. Il est couplé avec le modèle $k - \omega SST$ pour simuler les interactions entre les particules et l'air. Dans notre cas les conditions utilisées pour les particules sont :

Données particules	Conditions Limites Diphasiques
Diamètre des particules : $d_p = 10^{-7}\text{ m}$ (Lopes <i>et al.</i> , 2019)	Concentration à l'injection (sortie des cheminées) : $C_0 = 1.83 \cdot 10^{-6}\text{ kg.m}^{-3}$ Concentration à l'injection (autres limites du domaine) $C_0 = 10^{-20}\text{ kg.m}^{-3}$
Densité des particules : $\rho_p = 2000\text{ kg.m}^{-3}$	Vitesse d'éjection des particules : $V_{exh} = 2.88\text{ m.s}^{-1}$

Table 2 : Conditions Limites pour les particules

PARTIE EXPERIMENTALE

Afin de valider ces résultats numériques, ils seront confrontés à des résultats expérimentaux en soufflerie. La veine d'essai de la soufflerie mesure 1,5 m de long, 0,6 m de haut et 0,6 m de large (figure 3a). Une maquette réduite du bateau, à l'échelle 1 :120 est placée dans la veine d'essai. Dans un premier temps, l'écoulement autour de la maquette est caractérisé par vélocimétrie par image de particules (PIV, figure 3b). Dans un second temps, les particules ultrafines sont émises à l'aide d'un générateur DNP PALAS 2000 et les concentrations sont mesurées avec un granulomètre à impaction de type ELPI.

Ces mesures expérimentales seront ensuite comparées à une reproduction numérique de cette configuration (échelle 1/120 uniquement) afin de valider les modèles numériques.

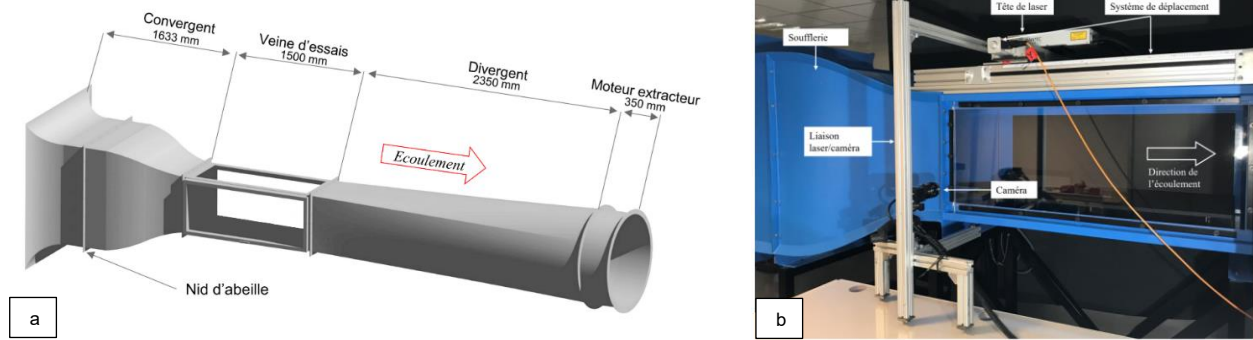


Figure 3 : a) Soufflerie b) Dispositif expérimentale

RESULTATS

MONOPHASIQUE (ÉCOULEMENT AÉRODYNAMIQUE)

Cette étape est primordiale afin d'identifier les zones critiques de l'écoulement qui pourraient influencer la trajectoire et donc la dispersion spatio-temporelle des particules.

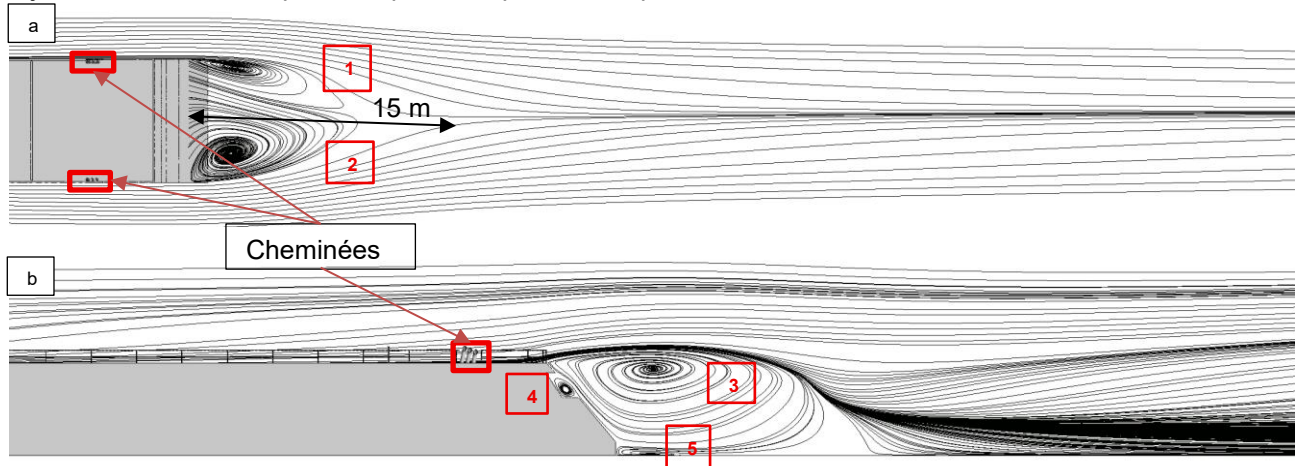


Figure 4 : Lignes de courants autour bateau a) Plan XY vue de dessus ($Z=2,55$ m) b) Plan XZ vue de côté ($Y=0$ m).

On peut voir sur la figure 4, la présence de 5 tourbillons juste derrière le bateau. Ces zones de recirculations peuvent potentiellement être des sites de concentrations préférentielles des particules.

DIPHASIQUE (PHASE PARTICULAIRE)

Dans la figure 5, on peut observer la répartition, adimensionnalisée par la concentration maximale, de la concentration. On peut remarquer que le maximum de concentration des particules, dans le sillage du bateau, se situe en périphérie des zones de recirculation observées figure 4. Cela suggère que les particules ultrafines sont entraînées par ces tourbillons mais demeurent surtout en périphérie. Ce type de comportement a été trouvé dans d'autres études notamment par Djeddou et al. (2025), qui a étudié la dispersion de particules dans le sillage d'un camion.

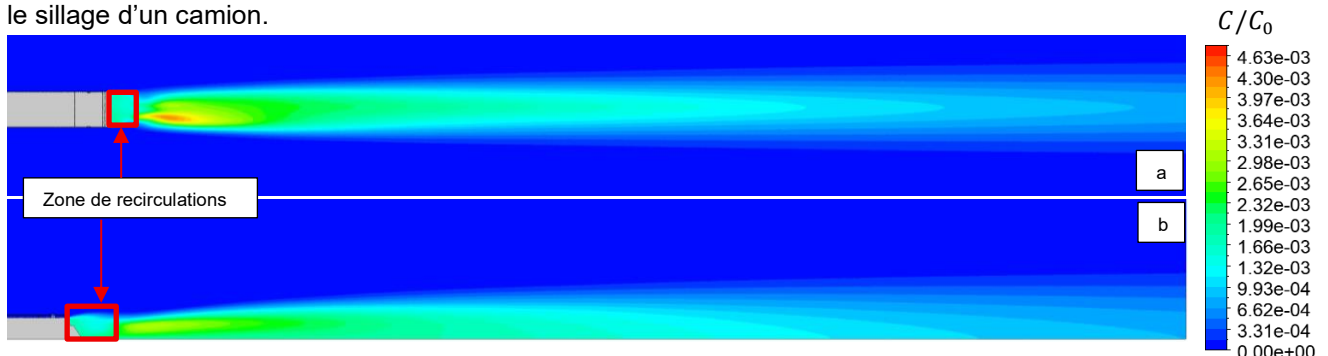


Figure 5 : Concentration normalisée a) Plan XY vue de dessus ($Z=2,55$ m) b) Plan XZ vue de côté ($Y=0$ m).

La figure 6, juxtapose la vitesse normalisée (à gauche) et la concentration normalisée des particules ultrafines (à droite) calculées à l'aval du bateau. On observe une corrélation nette entre les structures du champ de vitesse et les zones de forte concentration : les maxima de concentration épousent les zones de recirculation, tandis que les régions où la vitesse est faible présentent également des concentrations faibles. Cette concordance confirme que, conformément à la physique attendue, les UFP suivent fidèlement les lignes d'écoulement dans le modèle de diffusion inertielle (DIM). Le DIM reproduit donc correctement la dynamique d'entraînement des particules par l'écoulement simulé.

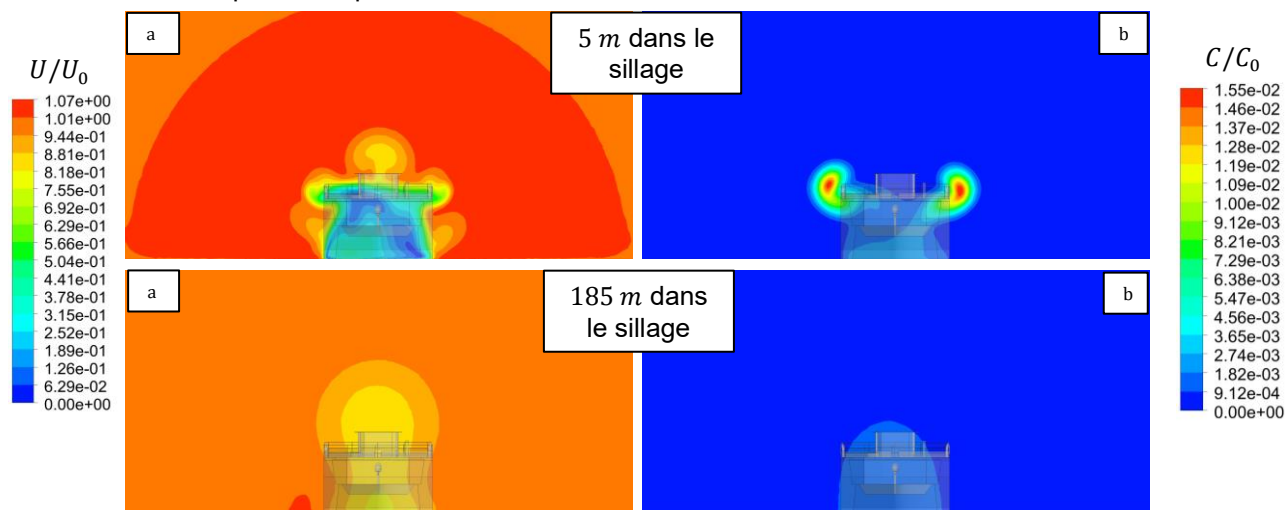


Figure 6 : a) Norme de la vitesse normalisée b) Concentration normalisée des UFP dans le sillage du bateau après 504 secondes d'écoulement.

CONCLUSION

Cette étude combine des simulations numériques et des mesures en soufflerie pour caractériser la dispersion des particules fines et ultrafines autour d'un navire fluvial : M.S. Lafayette de CroisiEurope. La modélisation CFD fondée sur le modèle $k - \omega SST$ couplé au DIM a permis de produire des premières cartographies de concentration autour du M.S. Lafayette. La comparaison des champs de vitesse et de concentration normalisés (figure 6) suggère que les particules ultrafines suivent globalement la dynamique de l'écoulement, conformément à la physique attendue.

Ces résultats demeurent toutefois préliminaires : ils devront être consolidés par une exploration plus large des paramètres numériques, une comparaison à la littérature, ainsi qu'une validation expérimentale en soufflerie actuellement en préparation. Les futures campagnes expérimentales permettront de confirmer ces tendances et d'évaluer la robustesse du modèle DIM dans un contexte fluvial.

RÉFÉRENCES

- Air pollutant emissions data viewer (Gothenburg Protocol, Air Convention) 1990-2023, European Environment Agency <https://www.eea.europa.eu/en/topics/in-depth/air-pollution/air-pollutant-emissions-data-viewer-1990-2023>
- Maritime Administration. 2024. Transportation and Air Quality. <https://www.epa.gov/system/files/documents/2024-11/420b24048.pdf>
- Zhang, L., Liu, Q., Mathisen, T. A., & Ge, Y. E. (2025). Navigating environmental sustainability in inland waterway transport: emission challenges and solutions. *Maritime Policy & Management*, 1–25. <https://doi.org/10.1080/03088839.2025.2523589>.
- Zaichik L., Drobyshevsky N., Filippov A., Mukin R. et Strizhov V.: A diffusion-inertia model for predicting dispersion and deposition of low-inertia particles in turbulent flows. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53 (1):154–162, 2010. ISSN 0017-9310.
- Djeddou M., Pérard-Lecompte A., Fokoua G., Mehel A., Tanière A., Comparative analysis of Eulerian and Lagrangian models for the simulation of fine and ultrafine particle dynamics in the wake of a heavy truck, *Journal of Aerosol Science*, 01/05/2025, doi:10.1016/j.jaerosci.2025.106568.
- Hongxun Huang, Chunhui Zhou, Liang Huang, Changshi Xiao, Yuanqiao Wen Jing Li, Zhigang Lu, Inland ship emission inventory and its impact on air quality over the middle Yangtze River, China, *Science of the Total Environment*. 156770 (2022), <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156770>.
- Domenico Toscano, Massimo Marro, Benedetto Mele, Fabio Murena, Pietro Salizzoni, Assessment of the impact of gaseous ship emissions in ports using physical and numerical models: The case of Naples, *Building and Environment* (2021), <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107812>.
- Lopes, M. , Russo, A. , Gouveia, C. and Ferreira, F. (2019) Monitoring of Ultrafine Particles in the Surrounding Urban Area of In-Land Passenger Ferries. *Journal of Environmental Protection*, 10, 838-860. doi: [10.4236/jep.2019.106050](https://doi.org/10.4236/jep.2019.106050).