

Influence des structures tourbillonnaires et de la turbulence sur la dispersion des nanoparticules de carbone

N.S. KEITA¹, A. MEHEL¹, F. MURZYN², A. TANIÈRE³ & B. DIOURTE⁴

¹ESTACA LAB, Pôle Mécanique des Structures Composites et Environnement, Equipe Qualité de l'Air et Dépollution, ESTACA, 78180, Montigny-le-Bretonneux, France

²ESTACA LAB, Pôle Mécanique des Structures Composites et Environnement, Equipe Qualité de l'Air et Dépollution, ESTACA, 53061, Laval, France

³LEMETA - Université de Lorraine-CNRS, ESSTIN, 2 rue Jean Lamour, 54500, Vandœuvre-lès-Nancy, France

⁴Département de physique de la Faculté des Sciences et Techniques, USTTB, Bamako, Mali

...

Résumé :

Les nanoparticules issues des différents modes de transport entraînent la dégradation de la qualité de l'air impliquant des dommages, notamment sur la santé humaine. La dynamique de ces particules ultrafines est fortement liée aux caractéristiques de l'écoulement du fluide porteur. Le travail présenté est consacré à la simulation numérique de l'écoulement diphasique (air + nanoparticules) qui se développe à l'aval d'un cylindre de section circulaire (diamètre $d=2.5\text{cm}$). L'objectif est de mieux comprendre l'influence de la turbulence et des structures tourbillonnaires créées dans le sillage de ce cylindre sur la dispersion de nanoparticules de carbone. L'écoulement étudié ($Re=9300$) a été résolu avec le modèle URANS couplé à un suivi lagrangien des particules. Les résultats montrent que les nanoparticules se retrouvent préférentiellement dans l'allée tourbillonnaire créée dans le sillage du cylindre. Par ailleurs, nous montrons que la turbulence permet une dispersion plus étendue, par rapport au cas où ses effets ne sont pas pris en compte.

Abstract:

The nanoparticles resulting from transportation systems lead to degradation of air quality causing damage to human health. The dynamics of these ultrafine particles is strongly related to the flow characteristics. The present work is devoted to numerical simulation of the two phase flow (air + nanoparticles) which develops downstream of a circular cylinder of a diameter $d=2.5\text{cm}$. The goal is to provide a better understanding of the influence of turbulence and vortex structures created in the wake of a cylinder on the dispersion of the carbon nanoparticles. The studied flow ($Re = 9300$) was solved with the URANS model coupled with a lagrangian particle tracking. On the one hand, the results show that the nanoparticles tend to be located in the street of the vortices created by the wake of the cylinder. On the other hand, it is shown that the turbulence allows a wider dispersion compared to the case where no turbulence was considered.

Mots clefs : Dispersion nanoparticules, Turbulence, Sillage cylindre, RANS, Qualité de l'air

1 Contexte de l'étude

L'amélioration de la qualité de l'air est devenue un enjeu majeur notamment en termes de santé publique et d'environnement. Selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), la pollution de l'air est responsable de 7 millions de décès prématurés par an à travers le monde [1]. Ceux-ci sont en partie dus à la détérioration de la qualité de l'air. Celle-ci est à l'origine de l'aggravation des allergies, du développement des maladies cardio-vasculaires et pulmonaires en particulier. Parmi les victimes, les personnes âgées et les enfants sont les plus exposés. Selon l'UNICEF [2], 300 millions d'enfants dans le monde vivent dans un endroit où la pollution de l'air extérieur est 6 fois supérieure aux normes internationales. Parallèlement, si on prend en compte les coûts engendrés pour la réparation et l'entretien des bâtiments et monuments dont la dégradation est liée à cette pollution, le coût global de cette dernière sera de l'ordre de 1% du PIB (Produit Intérieur Brut) à horizon 2060 selon l'OCDE (Organisation pour la Coopération et le Développement Economique) [3].

A l'origine de la pollution, il y a différentes sources. Parmi celles-ci, le transport automobile est un contributeur important, particulièrement en zones urbaines et périurbaines. Les principaux polluants émis sont les particules fines et ultrafines (polluants particulaires) et les NOx (polluants gazeux). Ainsi, dans un rapport parlementaire récent, Roumegas et Saddier (2016) indiquent qu'en France le secteur routier est responsable de l'émission des NOx, des PM10 et des PM2.5 à hauteur de 54%, 16% et 19%, respectivement [4]. Si on veut limiter l'exposition humaine à ces polluants, particulièrement nocive dans un microenvironnement tel que l'habitacle d'un véhicule ou d'un bus, il est nécessaire de mieux comprendre leur dynamique dès la sortie de l'échappement et leur interaction avec l'écoulement environnant. L'objectif final est de diminuer/limiter leur infiltration dans les véhicules suiveurs par des moyens aussi bien passifs que actifs.

Ainsi l'amélioration de l'état de nos connaissances sur les évolutions spatio-temporelle des concentrations des nanoparticules issues de l'échappement d'un véhicule en lien avec l'écoulement de sillage revêt une importance majeure. En effet, la dynamique de ces particules ultrafines est fortement influencée par la structure de l'écoulement et en particulier par la présence de tourbillons turbulents. Il a été montré que la dispersion des particules par la turbulence est un mécanisme prépondérant (Mehel et al. 2010). Il est donc primordial de caractériser la structure de l'écoulement de sillage et de quantifier l'interaction des particules avec cet écoulement. Certaines études se sont intéressées à ces interactions en conduisant des mesures de dispersion dans le sillage d'un véhicule. Par exemple, Carpentieri et Kumar (2011) ont fait des mesures à l'aide d'une grille montée à l'arrière d'un véhicule dans la région de proche sillage avec 9 capteurs au total placés à des distances allant de 0,45m et à 0,8m du pare-choc. Leur étude donne une idée sur la dynamique de la dispersion des particules mais la zone couverte reste très limitée. Compte tenu des difficultés d'avoir un nombre important de mesures de concentrations à différents endroits du sillage d'un véhicule, quelques travaux ont opté pour l'étude de la dispersion des particules ultrafines dans le sillage des maquettes de véhicule en soufflerie. C'est ainsi que Kanda et al. (2006) ont travaillé avec deux types de maquettes de véhicules (une voiture et un camion). Ils ont montré que la dispersion des gaz d'échappement augmente de façon significative dans le sillage en présence du véhicule par rapport au cas sans véhicule. Carpentieri and al. (2012) ont étudié l'influence de la couche limite qui se développe sur le fond grâce à un plancher mobile. Ils ont montré que la dispersion des particules ultrafines en très proche sillage est atténuée alors qu'elle est augmentée plus loin dans le sillage. Néanmoins, ces deux études ont utilisé un gaz traceur dans le

sillage pour simuler la dispersion des particules. Or, ce dernier ne subit pas de transformation contrairement aux particules solides qui peuvent subir des mécanismes de dépôt et d'agglomération (Carpentieri et al. 2011) modifiant leur dynamique de dispersion (Mehel et Murzyn, 2015).

Le travail numérique présenté s'inscrit dans ce contexte. Il s'agit alors d'injecter des particules solides en lieu et place des gaz traceurs. En particulier, on cherche à caractériser finement l'influence des structures tourbillonnaires et de la turbulence sur la dispersion de nanoparticules de carbone. Pour cela, notre démarche s'intéresse dans un premier temps à l'écoulement qui se développe dans le sillage d'un obstacle simple et bien référencé dans la littérature : le cylindre. Notre cylindre a un diamètre $d=2.5\text{cm}$ et la vitesse amont est $U=5,56\text{ m/s}$ pour un nombre de Reynolds $Re=9300$. Après la présentation des conditions de notre modélisation numérique (choix du modèle de turbulence, définition du maillage...), les principaux résultats seront présentés en se focalisant particulièrement sur les champs de concentration à différentes distances à l'aval du cylindre. La dernière partie sera consacrée à la synthèse des résultats et à une présentation des perspectives et des futurs développements. En particulier, pour notre prochaine étape, le cylindre sera remplacé par une géométrie simplifiée de véhicule (corps d'Ahmed) afin de se rapprocher plus encore d'une situation réelle pour laquelle nos résultats pourront être comparés avec des données expérimentales obtenues en soufflerie.

2 Méthode numérique

Notre étude repose sur une simulation 2D de l'écoulement avec une approche eulérienne type URANS (Unsteady Reynolds Average Navier-Stokes) combinée à un suivi lagrangien des particules. Nos simulations ont été effectuées à l'aide du code commercial Fluent (version 16.1). La résolution statistique des équations de Navier-Stokes moyennées de l'équation (Eq. 1) fait apparaître des nouveaux termes, à savoir les corrélations doubles qui forment le tenseur de Reynolds. Ainsi, pour la résolution de la turbulence que représente cette corrélation double, nous avons opté pour le modèle Reynolds Stress Model (RSM) associé à un traitement proche paroi type Enhanced Wall Treatment (EWT). Ce choix découle d'une étude préliminaire comparative avec la littérature existante concernant particulièrement deux paramètres caractéristiques liés à la topologie de l'écoulement monophasique du sillage d'un cylindre : l'angle de décollement θ et la longueur de recirculation adimensionnée par le diamètre du cylindre (notée Lr/d). Les résultats principaux de cette étude sont présentés dans le tableau 1. L'analyse de ce dernier montre que nos résultats sont en bon accord avec différentes études expérimentales ([5], [6]). Norberg et al. (1994) [5] affirmait que Lr/d de l'écoulement en aval du cylindre diminue de 1,8 à 0,8 lorsque le nombre de Reynolds augmente entre 1500 à 15000. De même Perrin (2005) [6] trouve que l'angle de décollement reste constant quand Re passe de 1000 à 100000 (tableau 1).

	Lr/d	θ	Re
Norberg et al. (1994) [5]	1,8 à 0,8	-	1500< Re <15000
Thèse de Perrin (2005) [6]	-	80	1000< Re <100000
Notre étude	0,9	81	$Re= 9300$

Tableau 1. Calibration du modèle numérique avec la littérature existante

$$\rho \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial (\bar{U}_i \bar{U}_j)}{\partial x_j} = \rho \bar{F}_i - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} [\bar{\tau}_{ij} - \rho \overline{u'_i u'_j}], \quad (\text{Eq. 1})$$

$$\text{avec } \bar{\tau}_{ij} = \mu \left[\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right]$$

Le terme $\rho \overline{u'_i u'_j}$ est analogue à une contrainte supplémentaire issue du mouvement d'agitation turbulente. Il s'agit de la contrainte de Reynolds ou tension de Reynolds.

L'interaction des nanoparticules avec la turbulence de l'écoulement est assurée par le biais du modèle EIM (Eddy-Interaction Model) de dispersion des particules par la turbulence. C'est un modèle stochastique utilisé pour modéliser les fluctuations turbulentes de l'écoulement. Il consiste à générer des vitesses fluctuantes du fluide porteur respectant l'intensité turbulente moyenne locale et maintenues constantes pendant un temps donné [7]. La vitesse fluctuante du fluide vu par la particule notée par u_i^* est générée via l'équation ci-dessous :

$$u_i^* = G \sqrt{\langle u_i'^2 \rangle} \quad (\text{Eq. 2})$$

Avec $\sqrt{\langle u_i'^2 \rangle}$ l'écart type de la valeur moyenne des vitesses fluctuantes et G un nombre aléatoire de la distribution gaussienne centrée et réduite.

2.1 Géométrie et Maillage

Les figures 1 et 2 représentent respectivement la géométrie et le maillage du domaine d'étude avec un zoom sur le maillage couche limite (Figure 2). Les paramètres dimensionnels du domaine d'étude ont été choisis en accord avec l'étude de Nishino et al. (2008) [8]. La longueur entre le centre du cylindre à l'entrée et entre le centre du cylindre et la sortie du domaine sont respectivement $L_i=10d$ et $L_o=20d$. La hauteur du domaine est $H=10d$. On note U_∞ la vitesse infinie amont, x la direction principale de l'écoulement (axe horizontal) et y la direction verticale. L'origine du repère est prise comme le milieu du cylindre au point de coordonnées $(x=0, y=0)$. Dans la couche limite au voisinage de la paroi du cylindre, 10 couches sont créées avec un taux de progression de 1,2 à partir de la taille de la première couche. Au-delà, et dans la limite d'un rayon de 7cm, la taille des éléments est de 2mm. Loin de la paroi, la taille de la maille est de 5mm. Le nombre de mailles est 28402 pour 14623 nœuds.

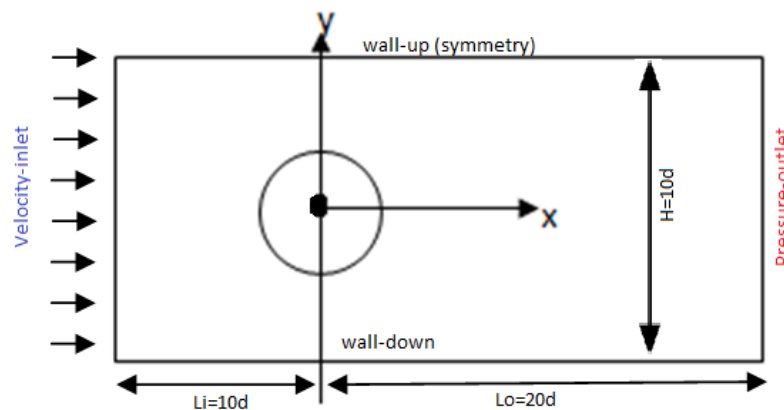


Figure 1 : géométrie du domaine d'étude

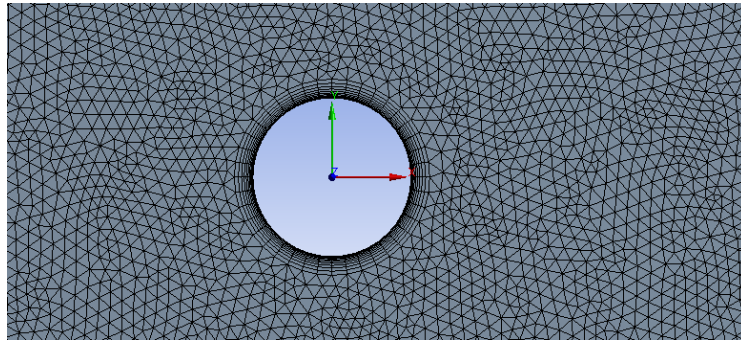


Figure 2 : Maillage du domaine

2.2 Conditions de simulation

Pour le fluide porteur, la vitesse d'entrée de l'air est $U_\infty=5,56\text{m/s}$. Le nombre de Reynolds associé est

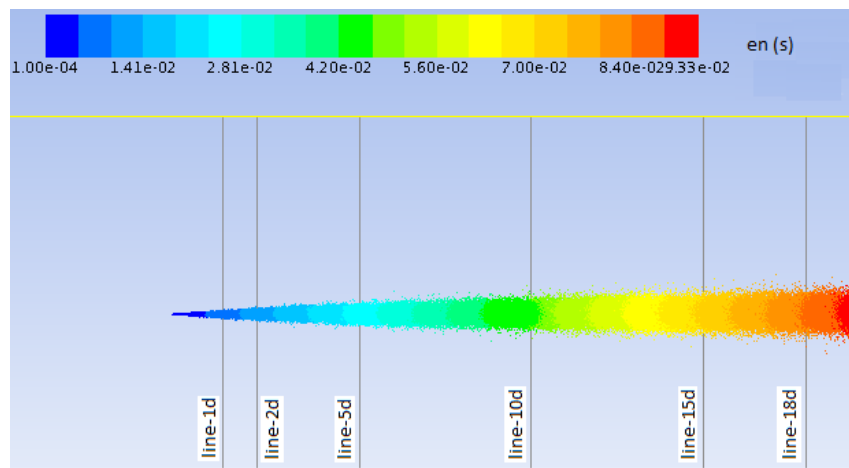
$Re= \frac{U_\infty d}{\nu} =9300$, il est fonction du diamètre d et la viscosité cinématique ν du fluide. La pression de

sortie relative du fluide est $P=0$ bar. En ce qui concerne les particules, l'injecteur simulant le pot d'échappement est placé en dessous du cylindre à une position ($x/d=0$, $y/d=-0.62$). 1000 nanoparticules de carbone (de masse volumique $\rho_p=2000\text{ kg/m}^3$) et de diamètre $d_p=10\text{nm}$ sont injectées à chaque pas de temps τ ($\tau=10^{-4}\text{s}$) avec un débit massique $\dot{m}=6,2510^{-11}\text{ kg/s}$. Ce débit a été calculé en prenant en compte la norme EURO 6 concernant la limitation des émissions des particules pour les véhicules ($4,5\text{mg/km}$) et la vitesse limite en zone urbaine ($U_{\text{umax}}=50\text{ km/h}$). Le nombre d'itération total est de 2500. La diffusion brownienne n'est pas prise en compte dans cette présente étude.

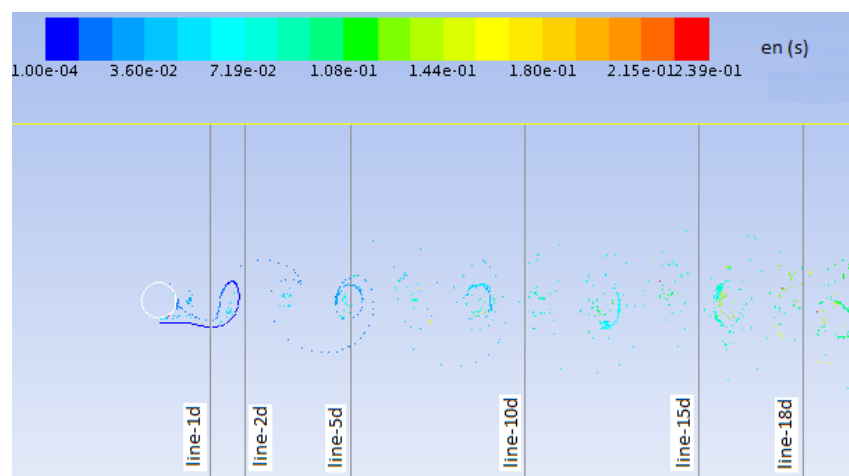
3 Résultats

L'évaluation de l'influence de la turbulence sur la dynamique des nanoparticules (NP) s'est faite en comparant les résultats obtenus lorsque le modèle de dispersion des particules par la turbulence (EIM) est activé avec ceux pour lesquels il ne l'est pas. Pour prendre en compte l'effet des structures tourbillonnaires sur la dispersion des nanoparticules dans le sillage, nous avons également simulé l'écoulement sans cylindre tout en injectant les particules à la même position. Cette démarche nous permet d'avoir une situation de référence (sans la présence du cylindre, Figure 3a).

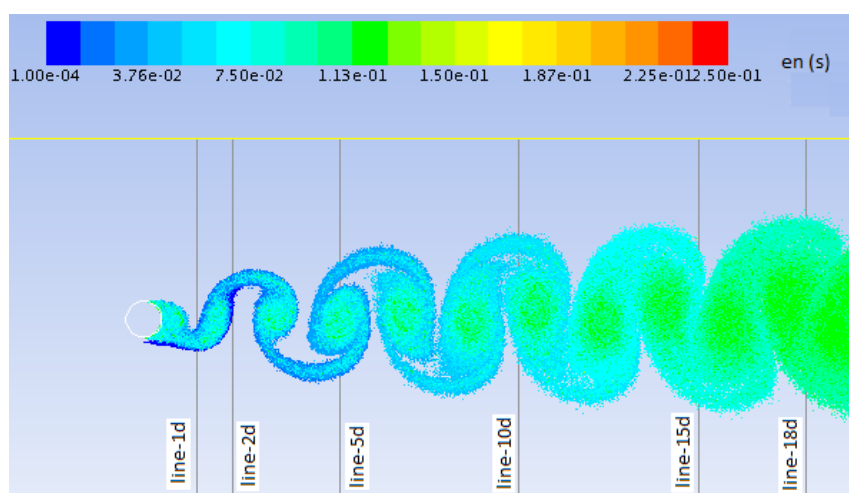
Les figures 3a-b-c représentent les différentes cartographies de positionnement des nanoparticules de carbone à l'instant $t=0,25\text{s}$ colorées par leur temps de résidence. Dans cette étude, le temps de résidence est le temps de séjour des nanoparticules dans le domaine de calcul. Il est très variable et dépend essentiellement, pour une taille de particules donnée, de leur interaction avec les structures tourbillonnaires turbulentes. La figure 3a représente le cas de référence (sans cylindre). La figure 3b correspond aux résultats avec cylindre lorsque le modèle de dispersion (EIM) n'est pas activé et la figure 3c au cas où ce modèle est activé.



(a)



(b)



(c)

Figure 3: Contours des positions de nanoparticules colorées par leur temps de résidence: a) sans cylindre avec EIM; b) cylindre sans EIM et c) cylindre avec EIM.

L'analyse globale des figures 3a à 3c montre que la structure de l'écoulement a une forte influence sur la dynamique des nanoparticules. En effet, sans la présence du cylindre (Figure 3a), c'est-à-dire en l'absence des structures tourbillonnaires, les NP ont tendance à suivre la longitudinale passant par le point d'injection avec un temps de résidence plus faible dans le domaine (maximum autour de 0.1s). En présence du cylindre, les nanoparticules sont captées par les structures tourbillonnaires formées dans son sillage. Celles-ci se regroupent sous forme de filaments sur la périphérie des vortex constituant l'allée de Bénard Von-Karman (Figure 3b). Le temps de résidence maximal est dans ce cas de ~ 0.24 s. En activant le modèle EIM, on remarque que les nanoparticules ont un champ de dispersion très étendu dans le sillage et que celles ayant un temps de résidence élevé se trouvent au centre des structures tourbillonnaires formant l'allée de Bénard Von-Karman (Figure 3c). Ceci tend à montrer que les tourbillons piègent les nanoparticules.

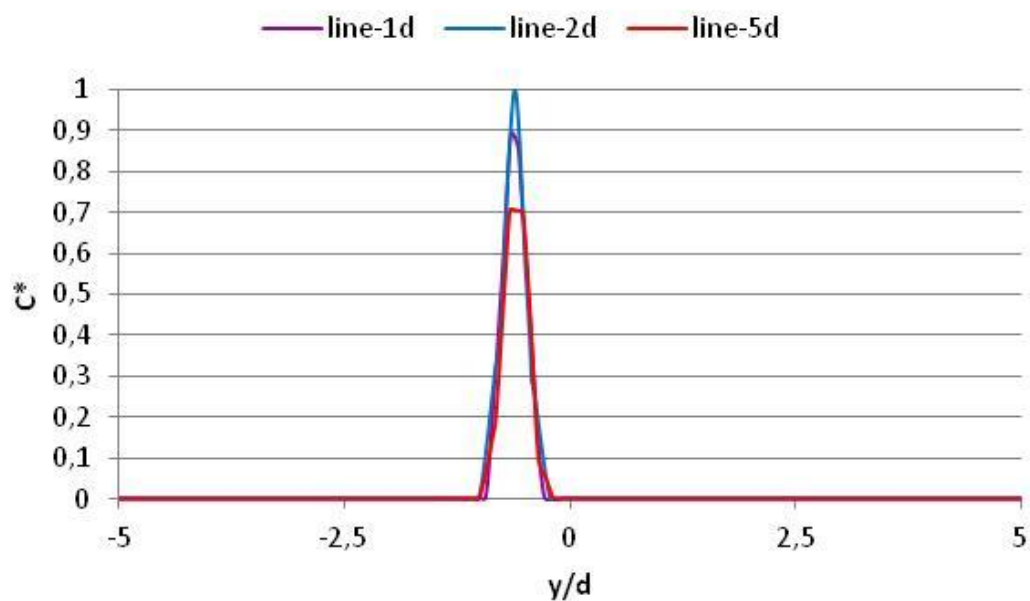
Pour développer notre analyse, nous nous sommes également intéressés à l'évolution de la concentration des nanoparticules de carbone dans différents plans verticaux à l'aval du cylindre et ce, pour différentes distances adimensionnées x/d . Lorsque $1 < x/d < 10$, on considérera que nous sommes en sillage proche. Le sillage lointain est associé au cas où $x/d > 10$. Les figures 4, 5 et 6 représentent les profils verticaux de la concentration adimensionnée C^* ($C^* = C/C_{\max}$, C_{\max} étant la valeur maximale obtenue pour chaque cas correspondant aux figures 4, 5 et 6).

Comme évoqué précédemment (Figure 3), le premier élément qui ressort des figures 4, 5 et 6 est la mise en évidence de la diminution de la concentration des particules lors du passage du sillage proche au sillage lointain et ce, quelle que soit la configuration testée (avec ou sans cylindre, modèle EIM activé ou pas). Sur ces figures, la dispersion latérale est représentée par l'élargissement de la courbe à sa base et la diminution de l'amplitude du pic de concentration. Sur la figure 4 (cas sans cylindre), en l'absence des structures tourbillonnaires, la dispersion reste limitée. Elle s'opère d'une manière symétrique autour de la position d'injection $y/d = -0.62$. En effet, les particules ont une composante horizontale de la vitesse beaucoup plus importante que la composante verticale.

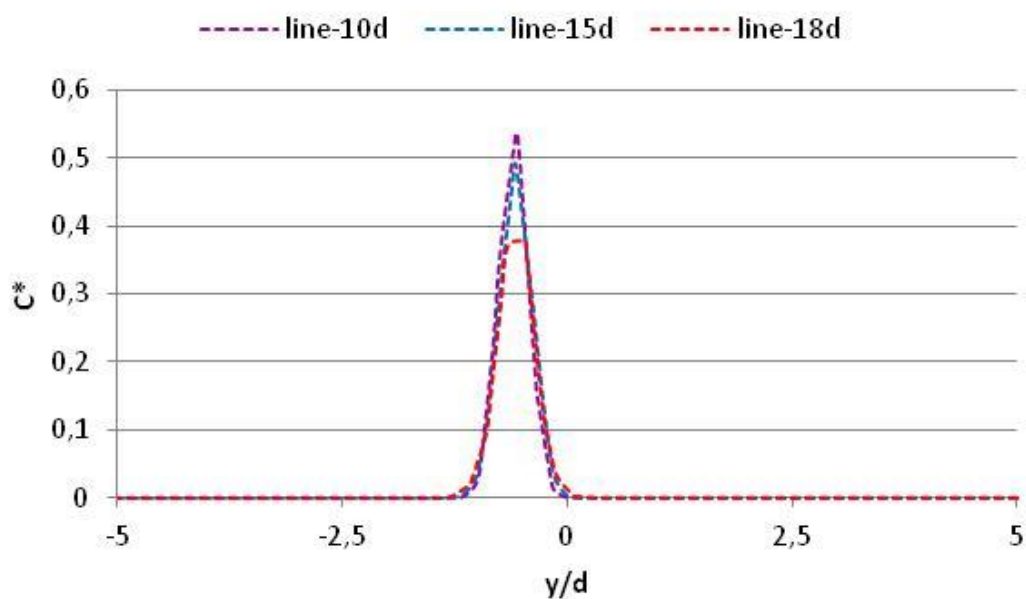
Les figures 5a et 5b (avec cylindre, modèle EIM non activé) et 6a et 6b (avec cylindre, modèle EIM activé) nous renseignent sur l'influence de la turbulence sur les champs de concentration. Lorsque le modèle de dispersion EIM est activé, on remarque que la dispersion des nanoparticules est plus homogène et plus étendue (Figure 6) que dans le cas où le modèle EIM est désactivé (Figure 5). Par exemple, on s'aperçoit que le champ de dispersion en $x/d=18$ s'étend entre $y/d=-2,5$ et $y/d=2,5$ (Figure 6b) alors que cette caractéristique n'est pas aussi marquée sur la figure 5b où la dispersion s'étend entre $y/d=-1$ et $y/d=1$. Par ailleurs, on note un pic beaucoup plus marqué en $x/d=5$ sur la figure 5b qui indique le passage d'un tourbillon chargé en particules qu'on retrouve sur la figure 3c. En très proche sillage ($x/d=1$), les figures 5 et 6 montrent que les particules sont simplement entraînées par l'écoulement, la dispersion (base du pic de concentration) étant réduite. Cela s'explique par la proximité de la mesure avec la position de l'injecteur. En $x/d=2$, lorsque le modèle EIM n'est pas activé, la concentration adimensionnée est nulle (Figure 5a). Cela s'explique par le fait qu'à cet endroit, on se trouve dans une zone de lâché des structures tourbillonnaires en provenance de la zone de recirculation. Cette dernière s'étend sur une longueur de 0,0225m (Tableau 1) par rapport à la paroi du cylindre. Ce lâché s'effectue alternativement de part et d'autre de l'axe central ($y/d=0$) ce qui explique que la ligne $x/d=2$ enregistre le passage des particules de façon sinusoïdale. Le temps final de notre simulation ($t=0,25$ s), se situe en phase de remontée des structures contenant les nanoparticules au dessus de la ligne centrale en $y/d=0$ (Figure 3b).

Pour caractériser les effets des structures tourbillonnaires, les résultats associés à la présence du cylindre sont comparés à ceux obtenus en l'absence de ce dernier. Pour cela, l'analyse des figures 5 et 6 montrent que les structures tourbillonnaires entraînent une dispersion accrue de part et d'autre de l'allée de Von-Karman. En effet, nous remarquons des pics de concentrations de part et d'autres par rapport au centre du cylindre qui se trouve à $y/d=0$. D'autre part, les NP qui se trouvent aux centres des

tourbillons sont celles qui ont un plus grand temps de séjour (figure 3c). Cela nous amène donc à penser qu'elles ont été piégées dans ces tourbillons constituant l'allée de Von Karman.

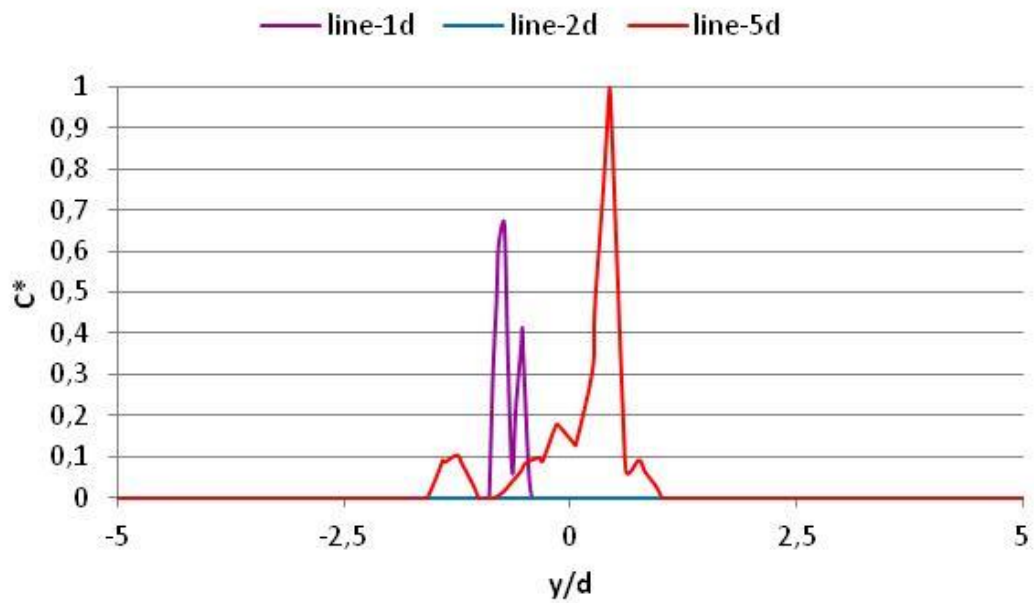


(a)

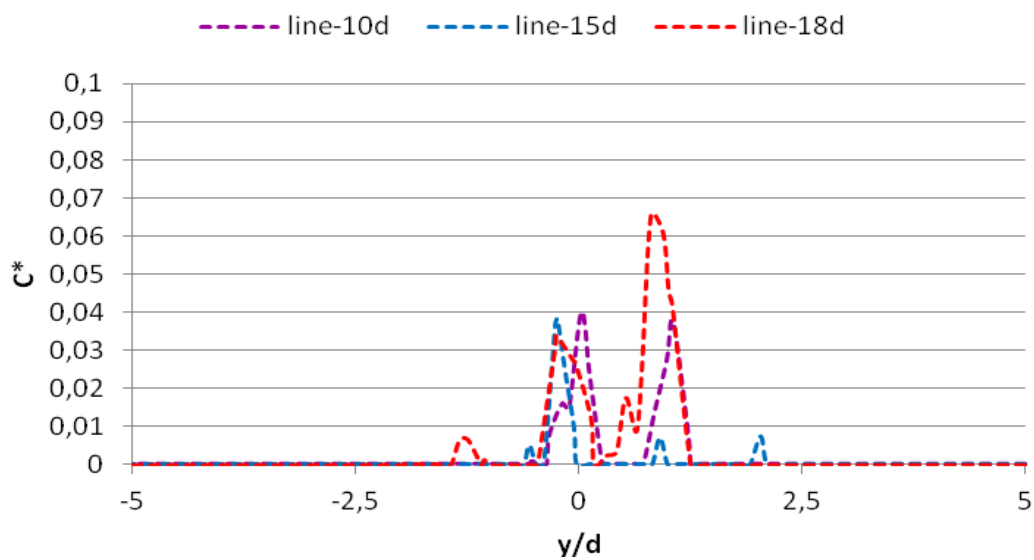


(b)

Figure 4 : Evolution de la concentration des nanoparticules sans présence du cylindre : a) domaine du sillage proche; b) domaine du sillage lointain



(a)



(b)

Figure 5 : Evolution de la concentration des nanoparticules dans le sillage du cylindre sans prise en compte du modèle de la dispersion turbulente (EIM) : a) sillage proche ; b) sillage lointain

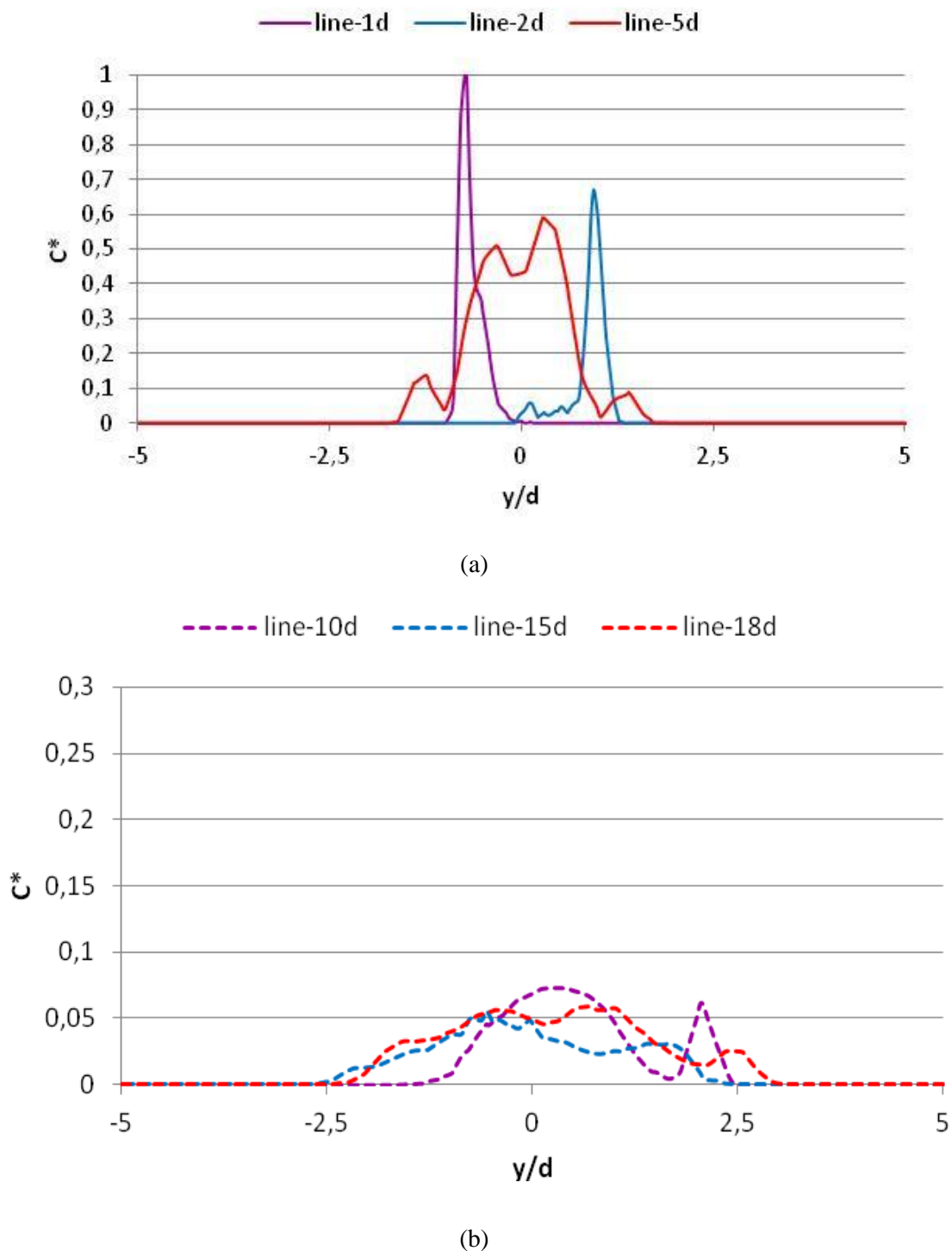


Figure 6 : Evolution de la concentration des nanoparticules dans le sillage du cylindre avec prise en compte du modèle de la dispersion turbulente (EIM) : a) sillage proche ; b) sillage lointain

4 Conclusion

Dans ce travail, une étude numérique de la dispersion de nanoparticules solides dans le sillage d'un cylindre est présentée. Notre intérêt s'est porté en particulier sur une analyse de l'influence des structures tourbillonnaires turbulentes qui se développent dans le sillage sur la capture et le transport

de ces nanoparticules. Nos résultats mettent en évidence que la dynamique de dispersion de ces particules est fortement liée à la structure de l'écoulement de sillage. En particulier, nous mettons en évidence que les particules peuvent être piégées par les tourbillons de sillage. La prochaine étape de notre travail consistera à simuler la dispersion de ces mêmes nanoparticules de carbone dans le sillage d'un modèle de véhicule automobile classiquement utilisé, le corps d'Ahmed. Il s'agit d'un modèle géométrique simplifié pour lequel seul l'angle d'inclinaison de la lunette arrière influence la topologie de l'écoulement de sillage. Notre intérêt se portera en particulier sur le cas d'un corps d'Ahmed à culot droit pour nous permettre une étude comparative avec des données expérimentales acquises en soufflerie.

Remerciements

L'Université des Sciences des Techniques et Technologiques de Bamako (Mali), l'Université de Lorraine (France) et l'ESTACA (France) sont remerciés pour leurs soutiens financiers et techniques.

Références

- [1] Statistiques sanitaires mondiales 2012. Organisation Mondiale de la Santé. Genève, 2012. 978-92-4-256444-0.
- [2] Résumé sur Assainissons de l'air pour les enfants. Unicef, 2016-pdf
- [3] Les conséquences économiques de la pollution de l'air extérieur. L'ESSENTIEL STRATÉGIQUE. OCDE, juin 2016
- [4] J.L. Roumégas et M. Saddier. Rapport d'évaluation des politiques publiques de lutte contre la pollution de l'air, Mai 2016.
- [5] A. Mehel, A. Tanière, B. Oesterlé, J.R. Fontaine. The influence of an anisotropic Langevin dispersion model on the prediction of micro- and nanoparticle deposition in wall-bounded turbulent flows, *Journal of Aerosol Science*, 2010, 41, 729-744.
- [6] M. Carpentieri, and P. Kumar. Ground-fixed and on-board measurements of nanoparticles in the wake of a moving vehicle. *Atmospheric Environment*, 2011, 45, 5837-5852.
- [7] I. Kanda, K. Uehara, Y. Yamao, Y. Yoshikawa, T. Morikawa. A wind-tunnel study on exhaust gas dispersion from road vehicles—Part I: Velocity and concentration fields behind single vehicles. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2006 94, 639-658.
- [8] M. Carpentieri, P. Kumar, A. Robins. Wind tunnel measurements for dispersion modelling of vehicle wakes. *Atmospheric Environment*, 2012, 62, 9-25.
- [9] A. Mehel and F. Murzyn, Effect of air velocity on nanoparticles dispersion in the wake of a vehicle model: Wind tunnel experiments, *Atmospheric Pollution Research* 6, July 2015, Pages 612-617
- [10] C. Norberg. LDV measurements in the near wake of a circular cylinder. In *Proceedings of the 1998 Conference on Bluff Body Wakes and Vortex-Induced Vibration* (eds P. W. Bearman C. H. K. Williamson), pages 1–12, Washington, DC, USA, 1998.
- [11] R. Perrin. Analyse physique et modélisation d'écoulements incompressibles instationnaires turbulents autour d'un cylindre circulaire à grand nombre de Reynolds. Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 2005
- [12] A. Mehel. Evolution spatio-temporelle d'un aérosol de nanoparticules : phase1. Etude de la déposition. Postdoc, décembre 2008
- [13] T. Nishino, G.T. Roberts, X. Zhang. Unsteady RANS and detached-eddy simulations of flow around a circular cylinder in ground effect. *Journal of Fluids and Structures* 24 (2008) 18-33.

- [14] C. A. Pope III, R.T. Burnett, M. C. Turner, A. Cohen, D. Krewski, M. Jerrett, S. M. Gapstur, and M.J. Thun. Lung Cancer and Cardiovascular Disease Mortality Associated with Ambient Air Pollution and Cigarette Smoke: shape of the Exposure–Response Relationships. *Environmental Health Perspectives*, 2010.
- [15] R.W. Atkinson, G.W. Fuller, H.R. Anderson, R.M. Harrison, B. Armstrong, 2010. Urban ambient particle metrics and health: a time-series analysis. *Epidemiology* 21, 501-511.
- [16] D. Brugge, J.L. Durant, C. Rioux, 2007. Near-highway pollutants in motor vehicle exhaust: a review of epidemiologic evidence of cardiac and pulmonary health risks. *Environmental Health* 6, 23.