



HAL
open science

Influence de la distance inter-véhiculaire sur la dispersion de polluants particulaires dans le sillage d'un véhicule simplifié à culot droit

Oumaïma Oussairan, Frédéric Murzyn, Georges Fokoua, Emilien Varea,
Béatrice Patte-Rouland

► To cite this version:

Oumaïma Oussairan, Frédéric Murzyn, Georges Fokoua, Emilien Varea, Béatrice Patte-Rouland. Influence de la distance inter-véhiculaire sur la dispersion de polluants particulaires dans le sillage d'un véhicule simplifié à culot droit. 25ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2022, Nantes, France. hal-04508779

HAL Id: hal-04508779

<https://hal.science/hal-04508779>

Submitted on 18 Mar 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Influence de la distance inter-véhiculaire sur la dispersion de polluants particulaires dans le sillage d'un véhicule simplifié à culot droit

O. Oussairan^{a,c}, F. Murzyn^a, G. Fokoua^b, E. Varéa^c, B. Patte-Rouland^c

a. ESTACALAB, Pôle Mécanique des Structures Composites et Environnement, Equipe Qualité de l'Air et Dépollution, ESTACA Campus Ouest, Rue Georges Charpak, 53000 Laval, oumaima.oussairan@estaca.fr

b. ESTACALAB, Pôle Mécanique des Structures Composites et Environnement, Equipe Qualité de l'Air et Dépollution, ESTACA Campus Paris Saclay, Avenue Paul Delouvrier, 78066 Saint Quentin en Yvelines

c. CORIA, UMR 6614, Normandie Université, Site Universitaire du Madrillet, 675 Avenue de l'Université, 76801 Saint Etienne du Rouvray

Résumé :

La caractérisation de l'écoulement et l'étude de la dispersion de polluants dans le sillage d'un véhicule simplifié à culot droit en présence d'un véhicule suiveur ont été effectuées. Des modèles simplifiés de type corps d'Ahmed à l'échelle 0.19 ont été utilisés. La vitesse de l'écoulement incident est fixée à $U_\infty = 14.3 \text{ m s}^{-1}$, ce qui correspond à un nombre de Reynolds basé sur la hauteur du modèle ($h_c = 54 \text{ mm}$) de 49 500. Tout d'abord, les champs de vitesses dans le sillage des véhicules ont été déterminés à l'aide d'un système LDV à 2 composantes. Puis, un système de génération de particules (PALAS DNP 2000) et un compteur de particules (ELPI) ont été employés pour la génération et le comptage des particules émises depuis l'échappement par le véhicule de tête et ce, pour différentes distances de séparation d avec un véhicule suiveur. Les premiers résultats obtenus par LDV montrent que pour $d \geq 2.78 h_c$, l'influence du véhicule suiveur ne se fait pas ressentir sur les caractéristiques moyennes et turbulentes du sillage (longueur de recirculation, zones de cisaillement...). En revanche, pour une distance inter-véhiculaire $d \leq 1.85 h_c$, on note un allongement de la zone de recirculation comparativement au cas du véhicule seul. Concernant les champs de concentration, les résultats mettent en évidence une forte influence de la zone de recirculation sur la dispersion des particules dans les 3 directions de l'espace. Dans cet article, le lien entre dynamique de l'écoulement et champs de concentration des particules issues des pots d'échappement est particulièrement analysé.

Abstract :

Flow characterization and pollutant dispersion studies in the wake of a simplified straight-ended vehicle in the presence of a follower vehicle were performed. Simplified Ahmed-type models at 0.19 scale were used. The incident flow velocity was set to $U_\infty = 14.3 \text{ m s}^{-1}$, which corresponds to a Reynolds number based on the model height ($h_c = 54 \text{ mm}$) of 49 500. First, the velocity fields in the vehicle wake were determined using a 2D LDV system. Then, a particle generator system (PALAS DNP 2000) and a particle counter (ELPI) were used to generate and count the particles emitted from the exhaust of the leading vehicle for different distances of separation from a following vehicle. The first results obtained by LDV show that for $d \geq 2.78 h_c$, the influence of the following vehicle is not felt on the mean and turbulent characteristics of the wake (recirculation length, shear zones. On the other hand, for an inter-vehicular distance $d \leq 1.85 h_c$, we note a lengthening of the recirculation zone compared to the case of the vehicle alone. Concerning the concentration fields, the results highlight a strong influence of the recirculation zone on the dispersion of particles in the 3 directions of space. In this paper, the link between flow dynamics and exhaust particles concentration fields is particularly analyzed.

Mots clefs : Sillage, Corps d’Ahmed, LDV, Soufflerie, Dispersion, Particules ultrafines, Distance inter-véhiculaire

1 Introduction

La qualité de l’air est devenue un enjeu majeur dans le monde en terme de santé publique et d’environnement car les coûts associés sont colossaux [5]. Différentes sources contribuent à l’émission de polluants comme les industries, l’agriculture, les systèmes de chauffage et les transports. Dans ce dernier secteur, si nous considérons l’automobile en particulier, des travaux récents ont montré que les polluants particuliers (PM, Particulate Matter) pouvaient provenir aussi bien de l’échappement que hors échappement (freins, remise en suspension de particules déposées sur les sols ou contact pneu/route). Une fois émis dans l’atmosphère par des véhicules en déplacement, ils peuvent s’infiltrer dans l’habitacle d’autres véhicules. Sachant qu’un véhicule peut être considéré comme un microenvironnement, les occupants (conducteur et passagers) peuvent ainsi se retrouver par effet d’accumulation exposés à une qualité de l’air fortement dégradée. Le trafic routier contribue à plus de 90% des émissions des particules ultrafines (particules dont le diamètre aérodynamique est inférieur à 100 nm) [13, 15]. En raison de leur minuscule taille, ces PUF peuvent pénétrer profondément le système respiratoire, accéder à la circulation sanguine et atteindre le cerveau. Parmi les impacts

sanitaires associés à l'exposition aux PUF, on peut citer les inflammations et les affections respiratoires et cardiovasculaires [4, 10]. Notons que ces PUF ont une capacité à transporter des traces de métaux lourds [24] également toxiques pour l'homme. Afin de limiter l'infiltration des particules dans l'habitacle d'un véhicule (via le système de ventilation, les vitres ou encore les défauts d'étanchéité), il apparaît nécessaire de mieux comprendre leur dynamique à partir du point d'émission (pot d'échappement) par les véhicules en déplacement. Bien que des études ont commencé à se pencher sur cette question, il reste encore beaucoup à faire.

Dans ce travail, nous nous concentrons tout particulièrement sur les PUF émises à l'échappement. Nous proposons d'étudier expérimentalement leur dispersion dans le sillage d'un véhicule émetteur (véhicule de tête, VT), en présence d'un véhicule suiveur (VS) et ce, pour différentes distances intervéhicules. Ici, le véhicule suiveur est placé à six différentes distances du véhicule de tête. Les champs de vitesses et de concentrations sont caractérisés en aval du VT. Pour cela, des campagnes d'essais ont été menées en soufflerie en utilisant des modèles simplifiés de véhicules automobiles appelés corps d'Ahmed [1]. Un travail de dimensionnement préalable a été réalisé permettant de définir notre échelle (0.19) par rapport au modèle original développé par Ahmed et al. [1]. Notre choix s'est porté sur des maquettes à culot droit. Les conditions expérimentales ont été définies pour reproduire le comportement d'un véhicule évoluant en milieu urbain [18]. Un soin particulier a été apporté aux dimensionnements du tuyau d'échappement et des débits d'éjection et de prélèvement des PUF. Dans la suite de cet article, les caractéristiques de l'installation expérimentale, des maquettes, des moyens de mesures et des écoulements du sillage en aval d'un corps d'Ahmed sont présentés ainsi que les méthodes d'analyse des données. Puis, nous présentons les résultats dans la section 3. Finalement, nous résumerons les conclusions et proposons des futurs travaux.

2 Dispositif expérimental, instruments, acquisition et traitement des données

2.1 Soufflerie et veine d'essais

Les campagnes de mesures ont été réalisées dans la soufflerie située à l'ESTACA Campus Ouest (Laval). Il s'agit d'une soufflerie à circuit ouvert fabriquée par DeltaLab (modèle EA 103). La vitesse maximale atteinte dans la soufflerie est de $U_{max} = 40 \text{ m s}^{-1}$. La veine d'essais mesure 1 m de long, 0.3 m de largeur et 0.3 m de hauteur. La calibration de la veine d'essais à vide a été accomplie dans un récent travail par Rodriguez [18]. Les principaux résultats montrent que l'intensité turbulente est inférieure à 1% dans le sens de l'écoulement à l'extérieur de la couche limite dont l'épaisseur maximale (δ) est de 12 mm à la sortie de la veine d'essais pour le plage de vitesse considérée.

2.2 Corps d'Ahmed et conditions expérimentales

Les corps d'Ahmed [1] sont des modèles simplifiés de véhicules fréquemment utilisés dans les études aérodynamiques [11, 22]. Ils ont montré leur capacité à reproduire des structures similaires se développant dans le sillage des véhicules réels. Le paramètre essentiel qui influence ces structures en aval et la force de traînée est l'angle de la lunette arrière (φ) du véhicule. Ahmed et al. [1], Lienhart and Becker [12], Spohn and Gilliéron [21] présentent une description détaillée des structures d'écoulement. Elles peuvent être catégorisées en 3 formes :

- $\varphi < \sim 10^\circ$: l'écoulement est bi-dimensionnel loin des parois. L'écoulement reste attaché sur la lunette tant que l'angle est inférieure à 10° . Deux tourbillons contra-rotatifs se développent dans le sillage proche. De plus, une forme torique est observée dans la région de recirculation ;
- $\sim 10^\circ < \varphi < \sim 30^\circ$: en dépassant les 10° , l'écoulement devient tri-dimensionnel en raison des interactions entre les différentes structures tourbillonnaires. Des tourbillons longitudinaux naissent sur les côtés des corps. Ainsi, l'écoulement est partiellement séparé de l'angle d'inclinaison arrière ;
- $\varphi > \sim 30^\circ$: la topologie de l'écoulement est similaire à celle observée pour $\varphi < \sim 10^\circ$. Cependant, l'écoulement est complètement détaché de la lunette arrière et les tourbillons longitudinaux n'existent plus.

Dans cet article, nous présentons les mesures réalisées en aval d'un corps d'Ahmed (à l'échelle 0.19) de culot droit ($\varphi = 0^\circ$) en présence et en absence d'un autre véhicule. Les modèles font 0.196 m en longueur (L_c), 0.054 m en hauteur (h_c) et 0.073 m en largeur (l_c). Le coefficient de blocage lié aux dimensions des modèles reste inférieur à 5%. Par conséquent, aucune correction n'est appliquée pour prendre compte des effets de parois [23]. Les modèles sont fixés sur la plaque inférieure de la veine d'essais à l'aide d'une tige cylindrique de 5 mm de diamètre. Le modèle repose sur quatre pieds cylindriques ayant une hauteur et un diamètre de 15 mm et 6 mm, respectivement. La garde au sol normalisée est $H_g = h_g/h_c = 0.28$. La Figure 1 représente un schéma annoté des maquettes considérées pour les mesures. Le premier corps appelé dans la suite véhicule de tête (VT) est placé dans l'axe central de la veine d'essais à $3.4 \times h_c$ de son entrée. Le repère des coordonnées $O(x, y, z)$ montré dans la Figure 1 est associé au VT. L'origine du repère est située au niveau du point médian du bord inférieur de la face arrière de la maquette du corps d'Ahmed. Le repère normalisé (x^* , y^* , z^*) représente les distances (x , y et z) normalisées par rapport à la hauteur de la maquette, h_c . Pour les mesures de concentrations, un tube (tuyau d'échappement) est collé sous le véhicule et se situe transversalement au quart de la largeur. La sortie (centre) du tube est situé à $x_{tp}^* = x_{tp}/h_c = 0$, $y_{tp}^* = y_{tp}/h_c = -0.06$ et $z_{tp}^* = z_{tp}/h_c = -0.31$. Ce choix est pris en tenant compte de la possibilité de le faire sortir de la veine par des trous présents sur la plaque inférieure de la veine d'essais. Le tuyau a des diamètres intérieur (ϕ_{tp}) et extérieur de 4 mm et 6 mm respectivement. Les paramètres de la garde au sol du tuyau d'échappement ont été choisis en tenant compte de l'épaisseur de la

couche limite et de la vitesse moyenne des particules à la sortie du pot d'échappement [23].

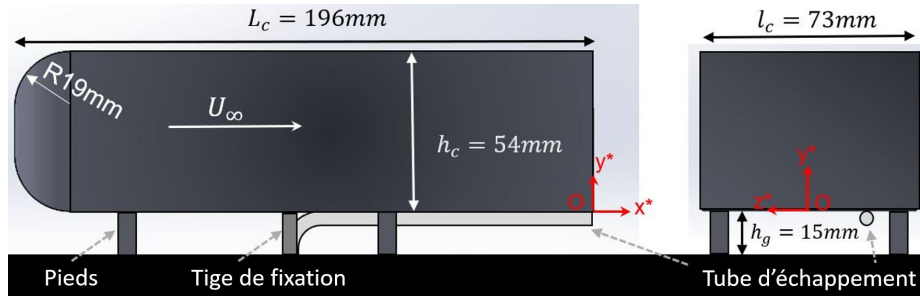


FIGURE 1 – Schémas annotés du modèle : vue de profil (gauche) et vue d'arrière (droite)

La vitesse de l'écoulement est définie de manière à maintenir constant le rapport de la vitesse de véhicule routier (U_∞) et la vitesse d'évacuation des particules du tuyau d'échappement (U_{tp}). Ce choix a été fait en raison des dimensions de la soufflerie qui empêche l'application de la similitude de Reynolds. L'Équation 1 montre le rapport des vitesses du véhicule et des particules émises au niveau du tuyau d'échappement entre le cas dans la soufflerie et le cas réel (dans un milieu urbain) [14].

$$\left(\frac{U_\infty}{U_{tp}}\right)_{soufflerie} = \left(\frac{U_\infty}{U_{tp}}\right)_{cas\ réel} \quad (1)$$

La vitesse des particules U_{tp} est donnée par le rapport entre le débit volumique Q_e ($m^3 s^{-1}$) à la sortie du tuyau et la section correspondante (m^2) selon l'Équation 2.

$$U_{tp} = \frac{4 \times Q_e}{\pi \times \phi_{tp}^2} \quad (2)$$

Le débit d'échappement est calculé suivant l'Équation suivante [17] :

$$Q_e = \frac{1}{2} e V_{cyl} \Omega_m \quad (3)$$

Avec $e = 0.9$ l'efficacité du moteur [8, 9], $\Omega_m = 2200 \text{ tr min}^{-1}$ la vitesse de rotation du moteur pour un véhicule déplaçant à $U_\infty = 50 \text{ km h}^{-1}$ et $V_{cyl} = 1.486 \text{ L}$ est la cylindrée du moteur [18]. En considérant pour le cas réel un diamètre du tuyau de 0.055 m , le débit d'échappement pour un véhicule dans un milieu urbain est $Q_{e,réel} = 2.45 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. D'après les Équations 1 et 2, $U_{tp} = 10.3 \text{ m s}^{-1}$ et $\frac{U_\infty}{U_{tp}} = 1.35$. En conservant ce rapport pour les essais en soufflerie et en tenant compte du diamètre du tuyau d'échappement utilisé dans nos mesures, la vitesse de l'écoulement incident dans la soufflerie a été fixée à $U_\infty = 14.3 \text{ m s}^{-1}$. Nous reviendrons sur la valeur de U_{tp} dans la sous-section 2.4. Finalement, le nombre de Reynolds basé à la hauteur de la maquette h_c est

$Re = 49,500$.

2.3 Mesures des vitesses

Les mesures des vitesses ont été réalisées à l'aide d'un système de vélocimétrie LASER à effet Doppler (LDV) (DANTEC Dynamics, modèle 2D Flow Explorer). Il permet l'enregistrement ponctuel des deux composantes horizontale (u) et verticale (v) de la vitesse. Les longueurs d'ondes des faisceaux LASER sont 660 nm et 785 nm. Les volumes de mesures pour u et v sont de $0.17 \times 0.17 \times 2.8 \text{ mm}^3$ et $0.20 \times 0.20 \times 3.34 \text{ mm}^3$ respectivement. Le nombre de franges d'interférence est de 30 dans les deux directions. Les distances entre deux franges successives sont de $5.45 \mu\text{m}$ et $6.40 \mu\text{m}$ dans la direction horizontale et verticale respectivement. La distance focale de la lentille est de 500 mm et le décalage en fréquence des faisceaux est de 80 MHz [16]. Le système 2D LDV est monté sur un système de traverses permettant le déplacement dans les trois directions de l'espace dans une plage de $410 \times 410 \times 410 \text{ mm}^3$. La gestion des paramètres d'acquisition pour la LDV et de déplacement pour la sonde LASER se fait à partir du logiciel BSA flow (v5.03.00). Considérant les recommandations de Algieri et al. [2], les particules d'ensemencement pour nos mesures sont formées avec un mélange de di-éthylène glycol $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}_3$ et d'eau. Le liquide utilisé est le SAFEX Inside Nebelfluid Extra Clean fourni par DANTEC. L'ensemencement est réalisée grâce au générateur SAFEX S 195 G. Le diamètre moyen des particules est $1.068 \mu\text{m}$. Le dispositif expérimental correspondant est présenté dans la Figure 2.

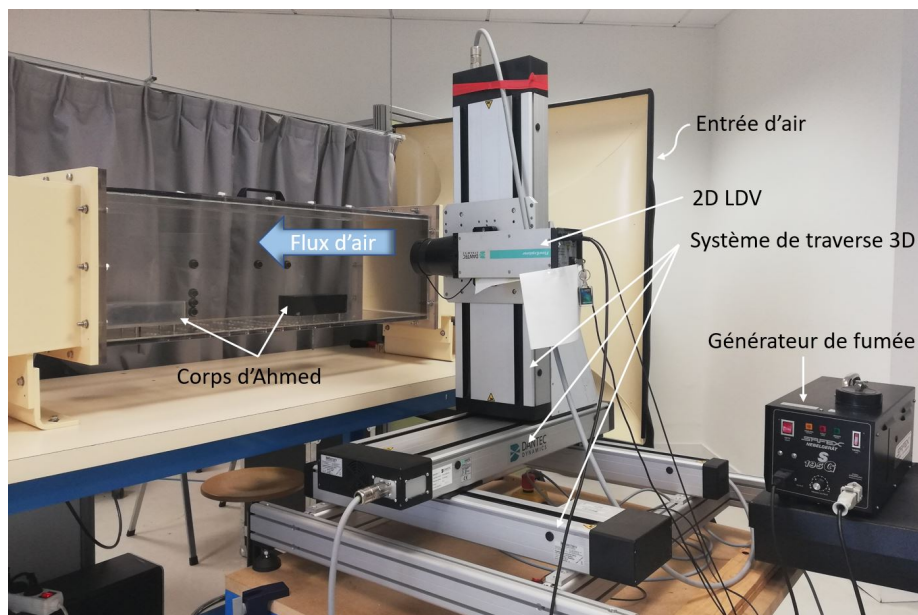


FIGURE 2 – Photo annotée du dispositif expérimental correspondant aux mesures de vitesses

2.4 Mesures des concentrations en nombre de particules (Particle Number Concentration PNC)

Le générateur de PUF sélectionné pour les mesures est le *PALAS DNP 2000*. Il s'agit d'un générateur d'aérosols à l'échelle nanométrique à partir de graphite monolithique. La génération de particules est basée sur des étincelles produites entre deux électrodes de graphite. Une étude préliminaire réalisée par Rodriguez [18] a montré que plus de 93% des particules ont un diamètre aérodynamique compris entre 30 nm et 109 nm. Dans cette étude, la fréquence des étincelles est réglée à son niveau le plus élevé (200 Hz) afin d'augmenter le rapport signal/bruit [6]. Le débit massique des particules émises est 6.5 mg h^{-1} . Afin d'assurer une reproduction uniforme des particules, l'azote qui est choisi comme gaz porteur, doit emporter toutes les particules générées entre les électrodes. Afin de ne pas endommager le matériel, la pression de l'écoulement d'azote ne doit pas dépasser 2.5 bar. Le débit volumique de l'azote est fixé à son maximum 8 L min^{-1} (correspondant à une pression de 2.3 bar). Sachant que le diamètre intérieur du tuyau d'échappement est de 4 mm, la vitesse d'éjection des particules U_{tp} est de 10.6 m s^{-1} (Équation 2).

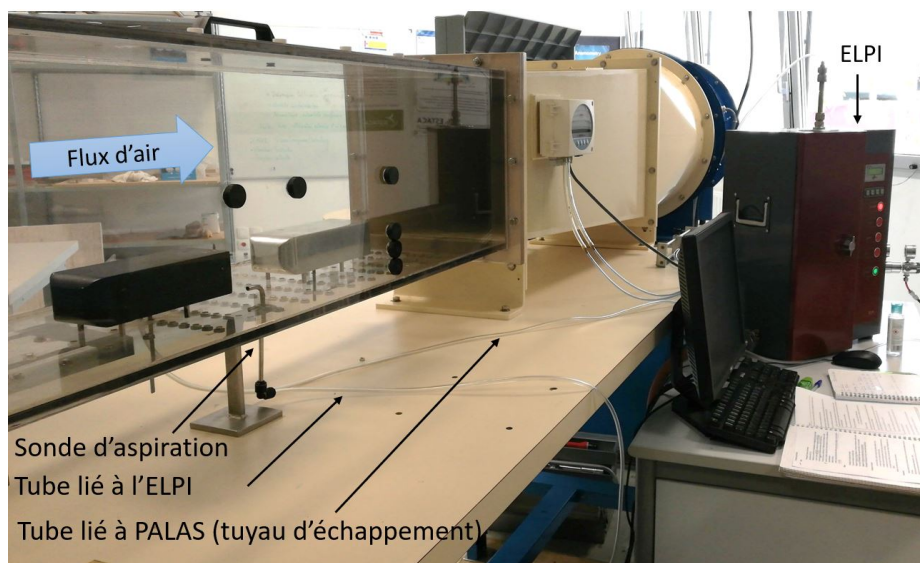


FIGURE 3 – Photo annotée du montage expérimental correspondant aux mesures de particules (PNC)

Les PUF émises sont ensuite collectées grâce au granulomètre ELPI (Electrical Low Pressure Impactor). Il permet la classification des particules selon leurs diamètres aérodynamiques. Dans cette étude, seule la concentration en nombre de particules (PNC) est analysée, quelque soit leur diamètre. La collecte s'effectue à l'aide d'une sonde d'aspiration coudée (ayant le même diamètre que le tuyau d'échappement) insérée dans la veine d'essais. La sonde est reliée par un tube à l'ELPI avec un débit

d'aspiration de 10 L s^{-1} . D'après l'Équation 2, la vitesse d'aspiration des PUF est 13.3 m s^{-1} . Le montage expérimental associé aux mesures PNC est présenté dans la Figure 3.

2.5 Acquisition et analyse des données

Dans ce travail expérimental, nous avons placé le véhicule suiveur à six distances inter-véhiculaires (d) allant de 50 mm à 300 mm avec un pas de 50 mm. Les distances normalisées correspondantes ($d^* = \frac{d}{h_c}$) sont 0.93, 1.85, 2.78, 3.70, 4.63 et 5.56. Les mesures LDV sont enregistrées avec le mode IR (*Individual Realization*), réglé dans le logiciel BSA flow. Ce mode assure que les données associées à une particule sont enregistrées si seulement si elles sont validées par le processeur. La durée d'acquisition est fixée 90 s et un nombre maximum de 5000 points est collecté. Des mesures de vitesses préliminaires sont réalisées en aval du véhicule de tête sans le véhicule suiveur et sont considérées comme cas de référence.

d^*	x^*	Pas d_x^*	Nombre de points	y^*	Pas d_y^*	Nombre de points	z^*
0.93	$0.09 < x^* < 0.83$	0.19	5	$0 < y^* < 1.02$	0.093	12	-0.67
1.85	$0.09 < x^* < 1.76$	0.19	10				-0.33
2.78	$0.09 < x^* < 1.76$	0.19	10				0
	$1.94 < x^* < 2.69$	0.37	3				
3.70	$0.09 < x^* < 1.76$	0.19	10	$y^* = 1.2$	(-)	1	0.33
	$2.13 < x^* < 2.50$	0.37	2				
	$3.06 < x^* < 3.61$	0.56	2				
4.63	$0.09 < x^* < 1.76$	0.28	7				
	$2.13 < x^* < 3.98$	0.37	6				
	$x^* = 4.54$	(-)	1				
5.56	$0.09 < x^* < 1.76$	0.28	7	0.67			
	$2.13 < x^* < 5.46$	0.55	7				

TABLE 1 – Points de mesures LDV pour la caractérisation du sillage entre les deux véhicules

Les mesures sont faites dans le sillage proche de $x^* = 0.09$ à 1.94 avec un pas normalisé ($d_x^* = \frac{d_x}{h_c}$) de 0.19 (11 positions) et dans le sillage lointain de $x^* = 2.87$ à 5.65 avec un pas normalisé de 0.93 (4 points). Selon l'axe des ordonnées (oy), le maillage s'étend de $y^* = 0$ à 1.02 avec un pas $d_y^* = \frac{d_y}{h_c}$ 0.09 (12 positions) et un point supplémentaire fixé à $y^* = 1.2$ (1 position) a été ajouté. 5 positions transversales sont prises en compte de $z^* = -0.67$ à 0.67 avec un pas $d_z^* = \frac{d_z}{h_c} = 0.33$. Le nombre total des points de mesure LDV correspondant est de 975. Le même maillage dans les axes (oy) et (oz) est considéré lorsque le VS est placé dans les six différentes positions citées en début du paragraphe, alors que le nombre de points en x dépend évidemment de la distance inter-véhiculaire. La Table 1 synthétise tous les points de mesures LDV en aval du VT en présence du VS. Globalement, le nombre de points de mesures LDV correspondant est de 4550. En tenant compte de l'ensemencement non

homogène des particules, et du mode d'enregistrement des données, la méthode ITTT (Inter arrival Time and Transit Time) [19] a été appliquée aux données LDV. Elle assure la fiabilité des résultats correspondants. Le maillage adopté pour les mesures des champs de concentrations couvre au mieux le volume existant entre les deux véhicules, en tenant compte du nombre et des positions des trous dans la plaque inférieure de la veine d'essais, permettant d'introduire la sonde coudée. Les PUF sont collectées en 1915 points allant pour $-0.04 < y^* < 1.07$ avec un pas $d_y^* = 0.09$ ou 0.19 pour les sillages proche et lointain ($x^* > 1.97$) respectivement, pour $-0.62 \leq z^* \leq 0.62$ avec un pas $d_z^* = 0.31$. Comme les mesures LDV, le nombre de points suivant l'axe x^* varie selon la distance inter-véhiculaire (Voir Table 2). Notons que ces mesures de concentrations ne sont pas effectuées lorsque la distance inter-véhiculaire est de 50 mm ($d^* = d/h_c = 0.93$) à cause du coude de la sonde qui empêche son positionnement entre les deux maquettes. Pour toutes ces mesures, le temps d'acquisition est de 65 s [20]. La méthode d'analyse de ces données est la même que celle utilisée par Rodriguez [18] et Rodriguez et al. [20].

d^*	x^*	Pas d_x^*	Nombre de points	y^*	Pas d_y^*	Nombre de points	z^*
0.93	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
1.85	$0.11 < x^* < 0.57$	0.46	2	$-0.04 < y^* < 1.07$	0.09 ou 0.19	13 ou 7	-0.62
	0.76	(-)	1				-0.31
2.78	$0.11 < x^* < 1.50$	0.46	4				0
	1.69	(-)	1				0.31
3.70	$0.11 < x^* < 2.43$	0.46	6				0.62
	2.61	(-)	1				
4.63	$0.11 < x^* < 3.35$	0.46	8				
	3.54	(-)	1				
5.56	$0.11 < x^* < 3.81$	0.46	9				
	$4.09 < x^* < 4.46$	0.37	2				

TABLE 2 – Points de mesure PNC

3 Résultats et discussion

3.1 Champs de vitesses moyens et fluctuants

Pour la présentation des résultats, les valeurs des composantes horizontale et verticale de la vitesse sont adimensionnées par $U_\infty = 14.3 \text{ m s}^{-1}$ après l'application de la méthode ITTT. Tout d'abord, la Figure 4 représente les cartographies 2D des champs dynamiques moyens et turbulents dans le plan de symétrie du véhicule $z^* = \frac{z}{h_c} = 0$ pour le cas référence (en absence du VS). Les Figures 4a et 4b montrent les champs moyennés normalisés des composantes horizontale ($\bar{u}^* = \frac{\bar{u}}{U_\infty}$) et verticale ($\bar{v}^* = \frac{\bar{v}}{U_\infty}$). La Figure 4a permet de mettre en évidence une zone importante de déficit

de vitesse dans le sillage proche du véhicule correspondant à la zone allant de la face arrière du véhicule ($x^* = \frac{x}{h_c} = 0$) jusqu'à $x^* = 1.40$. Cette zone est nommée zone de recirculation ($u^* = \frac{u}{U_\infty} < 0$). Nous distinguons aussi une symétrie par rapport à $y^* = \frac{y}{h_c} = 0.5$. Dans la Figure 4b, une antisymétrie est décrite par rapport à $y^* = 0.5$ en sillage proche ($x^* < 2$). D'après ces deux figures, nous pouvons distinguer le développement des deux tourbillons contra-rotatifs dans le sillage proche du véhicule. On trouve les centres des tourbillons supérieur A et inférieur B aux mêmes abscisses ($x^* = 0.71$) mais à des ordonnées différentes ($y^* = 0.84$ et 0.12 respectivement). A et B se développent en contre-sens comme le montrent les lignes de courant de la Figure 4a. Ces résultats sont en accord avec la littérature [3, 7, 14, 20]. Les Figures 4c et 4d montrent les cartographies d'énergie cinétique turbulente normalisée (Turbulent Kinetic Energy $TKE^* = \frac{1}{2} \frac{u'^2 + v'^2}{U_\infty^2}$, avec u' et v' les fluctuations de u et v respectivement) et des contraintes de Reynolds normalisées (Reynolds Shear Stress $RSS^* = \frac{u'v'}{U_\infty^2}$). Les niveaux maximaux d'énergie cinétique turbulente se trouvent dans la couche de cisaillement supérieure (Figure 4c). La TKE atteint une valeur maximale de $0.06 U_\infty^2$ en $x^* = 0.83$ et $y^* = 0.83$. Nous remarquons une zone de plus faible activité tourbillonnaire dans la couche de cisaillement inférieure. Ceci peut être expliqué par la hauteur de la garde au sol [18]. En revanche, les contraintes de Reynolds présentent des niveaux égaux en amplitude mais opposés en signe par rapport à $y^* = 0.5$.

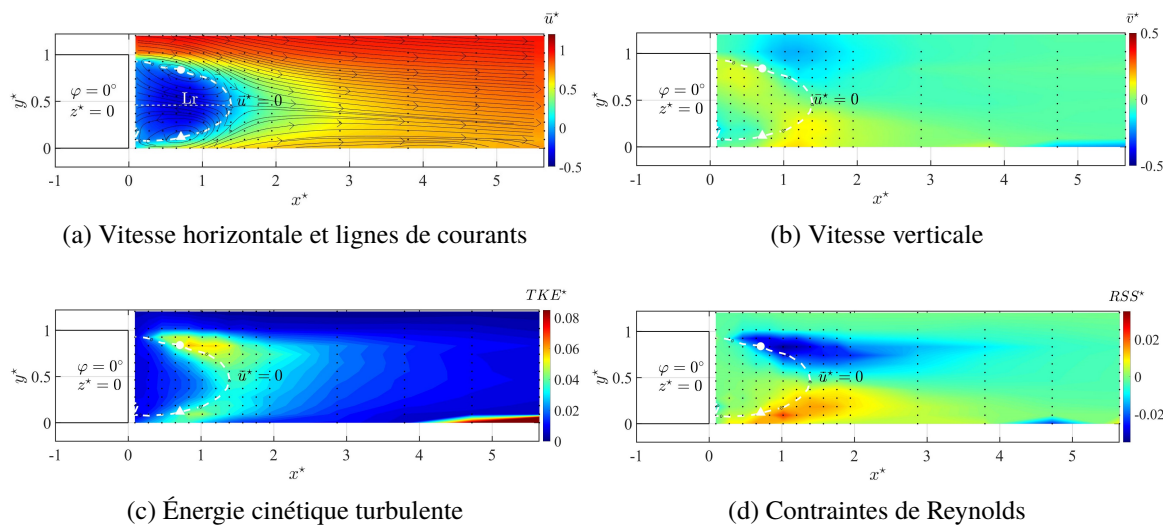


FIGURE 4 – Cartographies des champs dynamiques moyens et turbulents en amont du véhicule à culot droit dans son plan de symétrie $z^* = 0$. Le cercle et le triangle blancs correspondent aux tourbillons supérieur et inférieur respectivement.

Les Figures 5a et 5b représentent les cartographies des composantes horizontale et verticale de la vitesse dans les zones inter-véhiculaires pour les six positions du VS. Les lignes de courant sont tracées en noir (Figure 5a).

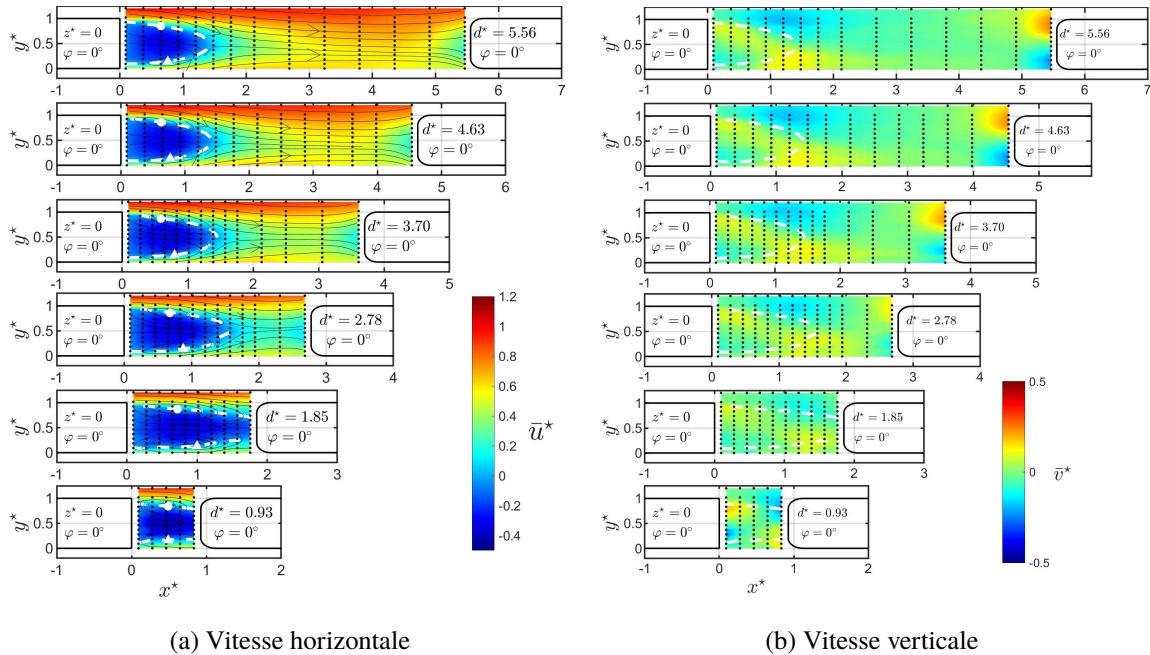


FIGURE 5 – Cartographies 2D de la vitesse horizontale (a) et la vitesse verticale dans le plan de centrale de la veine ($z^* = 0$). Le cercle et le triangle blancs indiquent les positions des centres des tourbillons supérieur et inférieur respectivement.

Elles montrent que la symétrie de l'écoulement dans la direction longitudinale par rapport à $y^* = 0.5$ est conservée. Les lignes blanches hachurées ($u^* = 0$) délimitent la zone de recirculation pour chaque cas de figure. Les positions des centres des tourbillons supérieur et inférieur sont marquées par un cercle et un triangle blancs respectivement. Elles ne diffèrent qu'au maximum de 4% par rapport au cas référence. On observe toujours l'antisymétrie de la vitesse verticale par rapport à $y^* = 0.5$ entre les deux véhicules (Figure 5b) comme remarqué dans le cas référent (Figure 4b) en sillage proche. D'après l'analyse de ces deux figures, nous pouvons conclure qu'au delà de $d^* = 2.78$, la topologie de l'écoulement n'évolue plus et l'influence du VS devient insignifiante. En parallèle, une augmentation de la longueur de la zone de recirculation est observée pour les cas où la distance inter-véhiculaire normalisée est de 1.85 et de 2.78 (équivalent à 100 et 150 mm). En outre, pour les cas où $d^* = 0.93$ et 1.85, la zone de recirculation occupe toute la distance inter-véhiculaire. Cela pourrait être expliqué par un effet d'aspiration. Notons que pour $d^* = 0.93$, le VS est placé dans la zone de recirculation déterminée pour un véhicule seul. Par ailleurs, les champs 2D dans le plan (x^*y^*) de l'énergie cinétique turbulente et des contraintes de Reynolds sont aussi calculés dans le plan central de la veine d'essais. Les résultats sont représentés dans les Figures 6a et 6b respectivement. D'une part, nous observons dans la Figure 6a que les niveaux élevés des concentrations se trouvent toujours dans la couche de cisaillement supérieure sur une large distance.

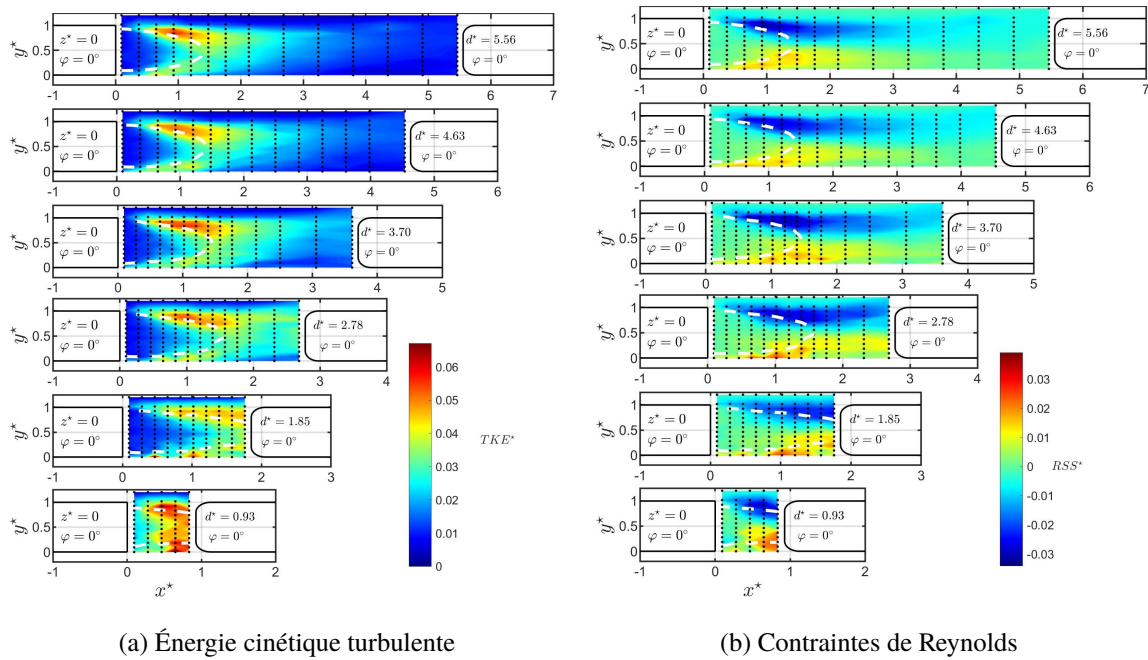


FIGURE 6 – Cartographies 2D de l'énergie cinétique turbulente (a) et des contraintes de Reynolds (b) dans le plan $z^* = 0$

La zone avec les niveaux les plus élevés se situe aux frontières de la zone de recirculation. La TKE^* atteint une valeur maximale de 0.065 pour $d^* = 0.93$ en $x^* = 0.46$ et $y^* = 0.93$. À partir de $d^* = 2.78$, les cartographies de TKE^* se ressemblent indépendamment de d^* . Pour ce qui concerne les contraintes de Reynolds représentées sur la Figure 6b, on remarque une symétrie en amplitude par rapport à $y^* = 0.5$. La valeur maximale des RSS^* en amplitude (0.032) est mesurée pour $d^* = 0.93$ en $x^* = 0.65$ et $y^* = 0.93$.

À la lumière de ces résultats, on peut conclure que $d = 2.78 h_c$ est la distance critique au delà de laquelle l'influence du VS est négligeable aussi bien pour les champs moyens que pour les champs fluctuants.

3.2 Champs de concentrations des PUF

Pour la présentation des résultats, les concentrations finales totales moyennes en aval du véhicule à culot droit (\bar{C}_{ft}^*) sont normalisées par la valeur maximale mesurée à la sortie du tuyau d'échappement (C_{ref}). C_{ref} vaut $5.13 \times 10^7 \text{ part.cm}^{-3}$. Notons également que les valeurs de concentrations ambiantes mesurées avant génération des particules ont été soustraites pour la présentation des résultats finaux. Les cartographies de PNC^* dans le sillage du VT pour les cinq distances inter-véhiculaires sont présentées dans la Figure 7 pour $z^* = 0$. Les points noirs correspondent aux points de mesures

alors que les lignes blanches désignent les limites des zones de recirculation définies précédemment.

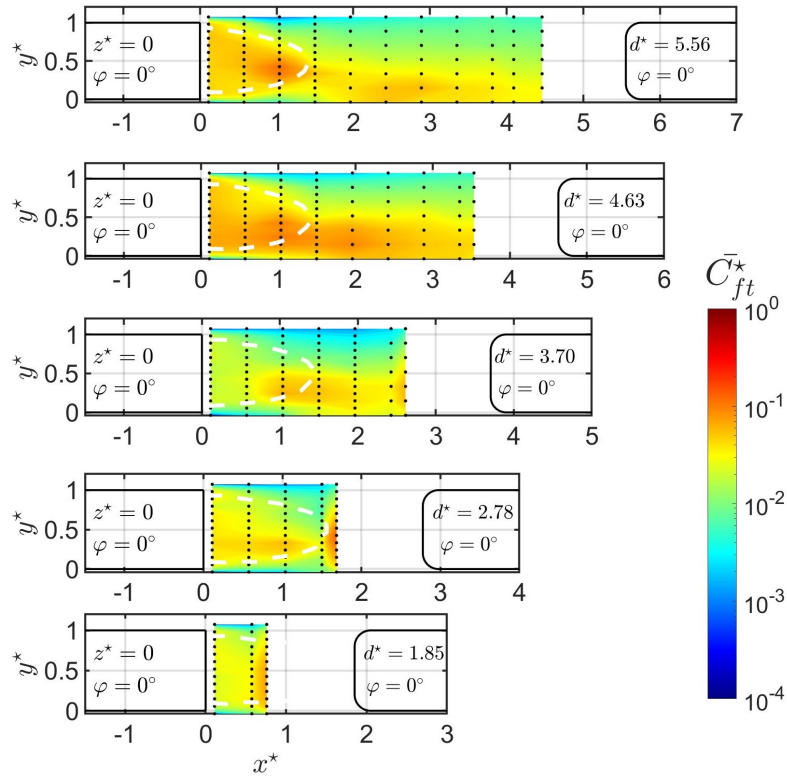


FIGURE 7 – Cartographies des champs de concentration en nombre totale finale (\bar{C}_{ft}^*) dans le sillage du véhicule à culot droit pour cinq distances inter-véhiculaires dans le plan de symétrie $z^* = 0$

Les niveaux des concentrations les plus importants sont détectés pour $d^* = 4.63$ et 5.56 et préférentiellement dans la moitié inférieure ($y^* = 0.5$). Indépendamment de la position du VS, les valeurs de concentrations sont inférieures à $1 \times 10^{-1} C_{ref}$. Néanmoins, les niveaux de PNC* restent élevés (supérieurs à $1 \times 10^{-2} C_{ref}$) sur tout l'espace inter-véhiculaire ($0 < y^* < 1$). Lorsqu'on s'éloigne de la source d'émission, des niveaux compris entre $2 \times 10^{-2} C_{ref}$ et $5.6 \times 10^{-2} C_{ref}$ sont également mesurés dans le sillage lointain ($x^* \geq 1.9$) ou dans la demi-hauteur supérieure du véhicule. Pour $d^* \leq 2.78$, des niveaux élevés de PNC* sont mesurés en amont du VS (valeur maximale de $1.3 \times 10^{-1} C_{ref}$ en $x^* = 1.69$ et $y^* = 0.43$ pour $d^* = 2.78$ et de $7.7 \times 10^{-2} C_{ref}$ en $x^* = 0.76$ et $y^* = 0.33$ pour $d^* = 0.93$). Le même phénomène est observé pour $d^* > 2.78$ mais avec des niveaux moins importants. Ceci peut être dû à un effet de blocage provoqué par le VS. On peut distinguer que les PUF ont plutôt tendance à s'accumuler dans la zone de recirculation ainsi que dans la couche de cisaillement inférieure où on a trouvé des niveaux de RSS* positifs et élevés (Figure 6b). Enfin, pour

les plus grandes distances inter-véhiculaires, les niveaux de concentrations diminuent en s'éloignant du VT. Pour bien illustrer cela, les Figures 8a et 8b représentent des vues arrière des champs de concentrations dans le plan (y^*, z^*) pour 2 positions longitudinales ($x^* = 0.57$ et $x^* = 1.5$). On note que les mesures de PNC* ne sont pas réalisées en $x^* = 1.5$ pour $d^* = 1.85$ pour des raisons techniques (impossible d'introduire la sonde coudée). Tout d'abord, nous détectons évidemment des niveaux très élevés des concentrations en face du tuyau d'échappement correspondant à $z^* = -0.31$. Pour la position $x^* = 0.57$ (Figure 8a), on se situe dans la zone de recirculation. Nous retrouvons les valeurs les plus importantes pour $d^* = 4.63$ et 5.56 .

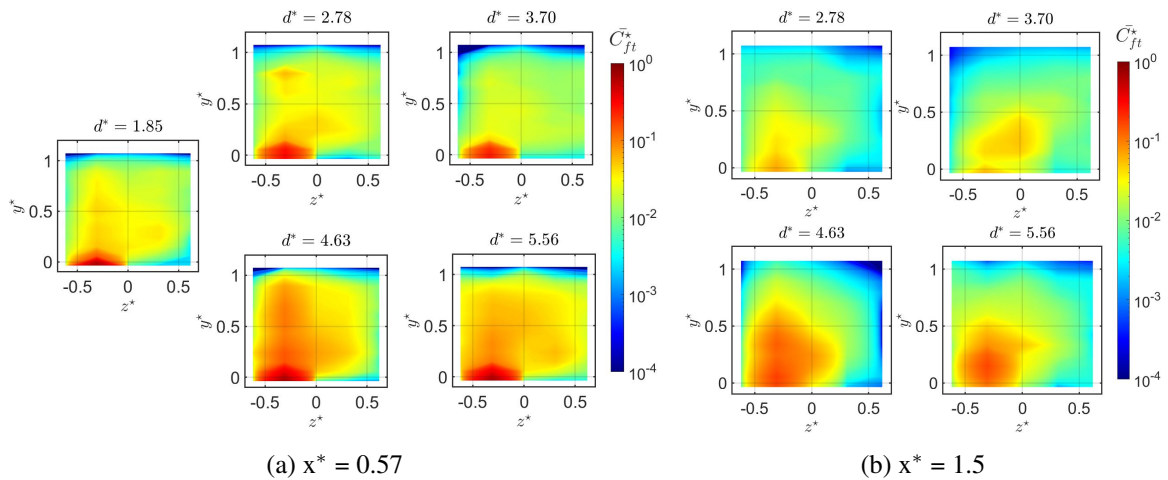


FIGURE 8 – Cartographies des champs de concentration en nombre totale finale (\bar{C}_{ft}^*) dans le sillage du véhicule à culot droit, vues arrière : $x^* = 0.57$ (a) et $x^* = 1.5$ (b)

La zone des valeurs supérieures à $1 \times 10^{-1} C_{ref}$ s'étend jusqu'à $y^* = 0.9$, et aussi dans la demi-largeur négative du véhicule ($z^* \leq 0$). Les PUF atteignent également la demi-largeur positive ($z^* > 0$) du véhicule avec des valeurs de concentrations comprises entre $1 \times 10^{-2} C_{ref}$ et $5 \times 10^{-2} C_{ref}$. Cela témoigne d'un mélange effectué par les structures tourbillonnaires qui conduit à une certaine homogénéisation des concentrations. Pour les trois autres distances inter-véhiculaires ($d^* = 3.70, 2.78$ et 1.85), le constat est relativement similaire mais avec des valeurs moins importantes de concentrations (comprises entre $1 \times 10^{-3} C_{ref}$ ($z^* > 0$) et $7.4 \times 10^{-1} C_{ref}$ en $z^* = -0.31$). Les valeurs de concentrations dans le plan transversal situé à $x^* = 1.5$ (Figure 8b) sont comprises entre $4 \times 10^{-4} C_{ref}$ et $5 \times 10^{-1} C_{ref}$ pour $d^* = 4.63$ et 5.56 , et entre $2 \times 10^{-4} C_{ref}$ et $3 \times 10^{-2} C_{ref}$ pour $d^* = 2.78$ et 3.70 . On rappelle qu'en $x^* = 1.5$, on n'est plus dans la zone de recirculation. Ces valeurs plus faibles tendent à indiquer que les structures tourbillonnaires de la zone de recirculation favorisent la dispersion accrue (mélange) des PUF. Finalement, afin de synthétiser les résultats précédents et avoir une vue entière de la dispersion des PUF, les évolutions en 3D des concentrations en nombre pour les cinq distances inter-véhiculaires ($d^* = 1.85, 2.78, 3.70, 4.63$ et 5.56) et aux différentes po-

sitions de mesures longitudinales sont représentées en Figure 9. Nous constatons que les valeurs des concentrations sont très élevées dans l'axe du tuyau d'échappement ($z^* = -0.31$).

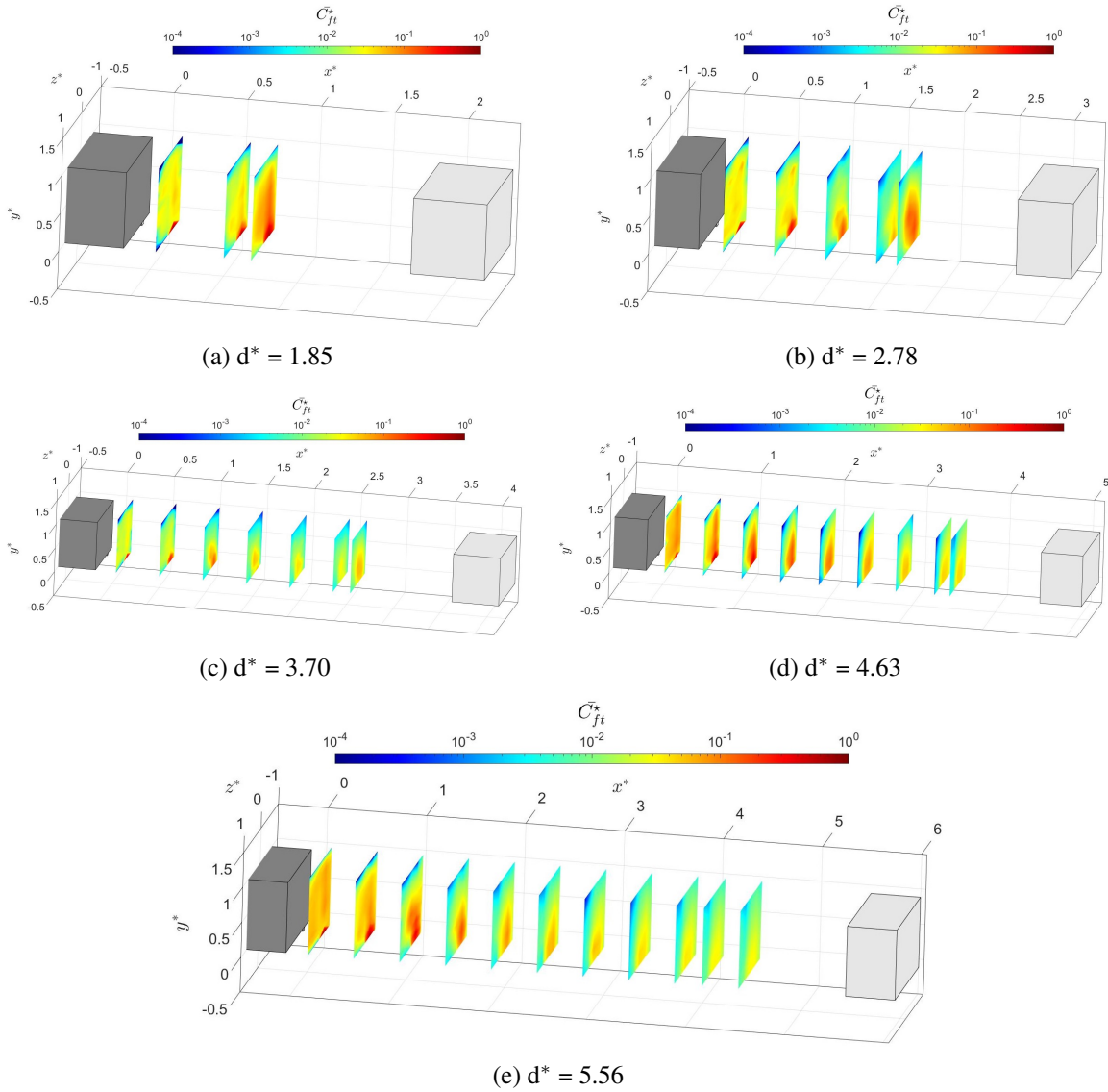


FIGURE 9 – Représentation 3D de l'évolution de la concentration en nombre totale finale (\bar{C}_{ft}^*) pour cinq distances inter-véhiculaires

La zone de recirculation couvre les niveaux importants de concentrations. Cette zone de recirculation joue donc un rôle essentiel dans le mélange des PUF dans les directions longitudinale et verticale. Les particules se diffusent verticalement grâce aux tourbillons contra-rotatifs qui permettent leur trans-

port de $y^* = -0.04$ (position du pot d'échappement) jusqu'à des hauteurs $y^* \sim 1$. Nous distinguons aussi qu'en s'éloignant du VT, les champs de concentrations ont tendance à redevenir symétriques (homogénéisation) conformément à ce qui est observé pour les écoulements du sillage (Voir sous-section 3.1). Par ailleurs, lorsque la distance inter-véhiculaire est $d^* = 1.85$ ou 2.78 , les valeurs de concentrations mesurées dans le plan le plus proche possible du VS sont élevées (supérieures à $1 \times 10^{-2} C_{ref}$), en exposant les passagers du VS à des niveaux de concentrations potentiellement élevées.

4 Conclusions et futurs travaux

Dans ce travail, la dispersion des PUF émises à l'échappement dans le sillage d'un véhicule est étudiée expérimentalement en présence d'un véhicule suiveur. Des maquettes de type corps d'Ahmed à culot droit à échelle réduite ont été utilisées pour les essais réalisés dans une soufflerie à circuit ouvert. La vitesse incidente est de 14.3 m s^{-1} , ce qui correspond à un nombre de Reynolds basé sur la hauteur du véhicule $Re = 49\,500$. L'analyse des écoulement moyens et fluctuants montrent que pour une distance inter-véhiculaire adimensionnée $d^* \geq 2.78$, l'influence du VS sur la dynamique de l'écoulement devient négligeable. Ensuite, la dispersion des PUF est caractérisée en utilisant un PALAS (générateur de PUF) et ELPI (compteur de PUF). Les champs de concentrations sont déterminés dans la zone inter-véhiculaire. Les résultats montrent que la zone de recirculation joue un rôle primordial dans la dispersion des particules. Les niveaux de PNC les plus élevés sont enregistrés dans cette zone et dans le plan du tuyau d'échappement. Dans le futur, d'autres études pourront s'intéresser aux rôles de la vitesse incidente, de l'angle d'inclinaison de la lunette arrière et de la position du tuyau d'échappement. Enfin, une étude expérimentale granulométrique des PUF en aval du véhicule suiveur pourra également être très utile pour compléter les connaissances sur le sujet (tri ou pas des particules selon leur taille).

Références

- [1] S. R. Ahmed, G. Ramm, and G. Faltin. Some salient features of the time-averaged ground vehicle wake. *SAE Transactions*, pp. 473–503, 1984.
- [2] A. Algieri, S. Bova, and C. De Bartolo. Experimental and numerical investigation on the effects of the seeding properties on lda measurements. 2005.
- [3] D. Barros. *Wake and drag manipulation of a bluff body using fluidic forcing*. Thèse, École Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique, 2015.
- [4] R. Burnett, H. Chen, M. Szyszkowicz, N. Fann, B. Hubbell, C. A. Pope, J. S. Apte, M. Brauer, A. Cohen, S. Weichenthal, et al. Global estimates of mortality associated with long-term ex-

- posure to outdoor fine particulate matter. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(38) :9592–9597, 2018.
- [5] CE Delft. Health costs of air pollution in european cities and the linkage with transport, 10 2020.
- [6] F. Gérardin, C. Gentric, and N. Midoux. Particle dispersion in the near-wake of an isolated rotating wheel : experimental and cfd study. *Journal of aerosol science*, 76 :56–71, 2014.
- [7] K. Gosse. *Etude expérimentale de la dispersion d'un scalaire passif dans le proche sillage d'un corps d'Ahmed*. Thèse, Université de Rouen, 2005.
- [8] C. Hancke. Le système de production psa et l'expertise des métiers au service des objectifs du groupe : voies d'amélioration de performances moteurs essence et diesel. 2009.
- [9] J. B. Heywood. *Internal combustion engine fundamentals*. McGraw-Hill Education, 2018.
- [10] A. Ibaldo-Mulli, H.-E. Wichmann, W. Kreyling, and A. Peters. Epidemiological evidence on health effects of ultrafine particles. *Journal of Aerosol Medicine*, 15(2) :189–201, 2002.
- [11] C. Leclerc. *Réduction de la traînée d'un véhicule automobile simplifié à l'aide du contrôle actif par jet synthétique*. Thèse, 2008.
- [12] H. Lienhart and S. Becker. Flow and turbulence structure in the wake of a simplified car model. *SAE transactions*, pp. 785–796, 2003.
- [13] M. Manigrasso and P. Avino. Fast evolution of urban ultrafine particles : Implications for deposition doses in the human respiratory system. *Atmospheric environment*, 51 :116–123, 2012.
- [14] 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(4) :612–617, 2015.
- [15] J. F. Mejía, L. Morawska, and K. Mengersen. Spatial variation in particle number size distributions in a large metropolitan area. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8(5) :1127–1138, 2008.
- [16] PALAS. Manuel de palas dnp 2000. Rapport technique Version V001072009, 2009.
- [17] B. Roberge, L. Menard, A. Turcotte, Y. Beaudet, and L. Lazure. Evaluation d'un système d'évacuation des gaz d'échappement lors de l'entretien des chariots élévateurs au propane. pp. 45, 2006.

- [18] R. Rodriguez. *Etude expérimentale de la dispersion de particules ultrafines dans le sillage de modèles simplifiés de véhicules automobiles*. Thèse, École centrale de Nantes, 2018.
- [19] R. Rodriguez, F. Murzyn, J. Aubry, A. Mehel, and F. Larrarte. An innovative ldv data processing method for statistical error corrections. application to homogeneous and non-homogeneous seeding. *Flow Measurement and Instrumentation*, 60 :67–77, 2018.
- [20] R. Rodriguez, F. Murzyn, A. Mehel, and F. Larrarte. Dispersion of ultrafine particles in the wake of car models : A wind tunnel study. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 198 :104109, 2020.
- [21] A. Spohn and P. Gilliéron. Flow separations generated by a simplified geometry of an automotive vehicle. 1, 2002.
- [22] A. Thacker, S. Aubrun, A. Leroy, and P. Devinant. Effects of suppressing the 3d separation on the rear slant on the flow structures around an ahmed body. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 107 :237–243, 2012.
- [23] G. West and C. Apelt. The effects of tunnel blockage and aspect ratio on the mean flow past a circular cylinder with reynolds numbers between 104 and 105. *Journal of Fluid mechanics*, 114 :361–377, 1982.
- [24] J. Zhou, S. Wu, Y. Pan, L. Zhang, Z. Cao, X. Zhang, S. Yonemochi, S. Hosono, Y. Wang, K. Oh, et al. Enrichment of heavy metals in fine particles of municipal solid waste incinerator (mswi) fly ash and associated health risk. *Waste management*, 43 :239–246, 2015.