

QUE RESPIRONS-NOUS DANS NOS VOITURES ?

Caractérisation des polluants s'infiltrant dans les habitacles des véhicules

Amine Mehel
Enseignant-chercheur, ESTACA'Lab



300 différents types de polluants peuvent s'infiltrer dans l'habitacle des véhicules

L'ESTACA'Lab est le laboratoire de recherche de l'ESTACA, école d'ingénieurs spécialisée dans les systèmes de transports.

Amine Mehel est enseignant-chercheur au sein du pôle Matériaux, Mécanique et Énergétique ainsi que membre du groupe Qualité de l'air et traitement de la pollution, qu'il a contribué à créer à son arrivée à l'ESTACA, en 2010. Titulaire depuis 2006 d'un doctorat en mécanique des fluides délivré par l'École centrale de Nantes, il a axé ses travaux sur le transport et la dispersion des polluants dans les interactions avec des écoulements turbulents, la caractérisation et la mesure des polluants, la modélisation de la dynamique des particules ultrafines et les simulations CFD des flux multiphasiques.

L'habitacle d'un véhicule est un petit espace confiné dans lequel peuvent s'infiltrer des polluants extérieurs ou les émissions de ce même véhicule. En fonction des conditions de circulation et de la ventilation, ces polluants peuvent s'accumuler et avoir des conséquences néfastes sur la santé des passagers. Ces substances de différentes sortes (particules gazeuses ou ultrafines) peuvent atteindre des concentrations supérieures à celles constatées dans l'air extérieur.

Nos travaux de recherche portent principalement sur le processus d'infiltration, qui concerne de nombreux types de polluants. Le processus d'infiltration dépend de trois facteurs principaux : concentration des polluants dans l'air extérieur, topologie du flux aux points d'émission et paramètres internes au véhicule, comme le réglage de la ventilation. Nous procédons à des mesures embarquées et à des études en soufflerie, qui nous aident à identifier la dynamique des polluants en interaction avec la topologie du flux. Ces mesures, qui portent sur la dispersion des polluants à partir des sources d'émission et sur leur infiltration via les prises d'air, prennent en compte les niveaux de pollution à l'échelle locale.

L'étude de la dispersion en soufflerie montre que les particules ultrafines émises par les pots d'échappement s'accumulent au cœur des tourbillons qui se forment dans le voisinage immédiat du sillage des véhicules. Les prises d'air étant généralement situées à l'avant, ce phénomène accentue l'infiltration dans l'habitacle des véhicules suivants. On a également constaté que la distance entre les voitures, le mode de ventilation, la densité du trafic et la topologie de la route peuvent accentuer la pollution de l'air dans l'habitacle. En comprenant bien les effets de ces différents paramètres, nous pouvons améliorer la qualité de l'air dans l'habitacle des véhicules.

INTRODUCTION

Les concentrations de polluants gazeux et particulaires toxiques sont très élevées dans les zones urbaines, notamment à proximité des principaux axes de circulation et des autoroutes. Les véhicules routiers constituent d'ailleurs la première source d'émissions directes^{1,2,3}. Les polluants sont transportés depuis les secteurs à forte concentration vers les secteurs avoisinants, en particulier les véhicules. Ils peuvent s'infiltrer dans l'habitacle des véhicules et s'y accumuler : les passagers sont alors encore plus exposés à la pollution. Plusieurs études toxicologiques et épidémiologiques constatent d'ailleurs un lien entre l'exposition à ces niveaux élevés de polluants toxiques (parmi lesquels les particules ultrafines (PUF) et les oxydes d'azote (NOx)) et la recrudescence des maladies respiratoires, des allergies et de l'asthme⁴, entre autres problèmes de santé à long terme, comme le cancer du poumon et les pathologies cardiovasculaires⁵.

L'évaluation de l'exposition à ces polluants repose sur deux caractéristiques clés : la concentration et la taille des particules (pour les PUF). Il a été démontré que le rapport entre les concentrations intérieures et les concentrations extérieures

(I/E) durant le processus d'infiltration dépend en grande partie de paramètres internes au véhicule : kilométrage, âge, vitesse, réglages de la ventilation, mode de ventilation (recyclage activé ou désactivé)⁶. Les paramètres externes interviennent aussi, notamment la topologie du flux local^{7,8,9}. Dans nos travaux de recherche, nous nous sommes intéressés aux concentrations de polluants selon deux approches. La première consiste à mesurer les concentrations embarquées de polluants (internes et externes) en fonction des différents réglages de ventilation et de la distance inter-véhicules.

La seconde, menée en soufflerie, porte sur le processus d'infiltration à petite échelle. Dans cette étude, nous nous intéressons d'abord à la dispersion des PUF à partir du point d'émission (le pot d'échappement) et à leur interaction avec le flux dans le sillage immédiat du véhicule et au niveau des prises d'air. Ensuite, nous examinons l'infiltration des PUF dans une voiture en modèle réduit. La conjugaison de ces deux approches nous permet non seulement d'affiner la méthodologie de mesure (par exemple, la position de la sonde extérieure) mais aussi de comprendre le processus d'infiltration des polluants, l'objectif étant de mettre au point des solutions d'amélioration de la qualité de l'air dans l'habitacle.

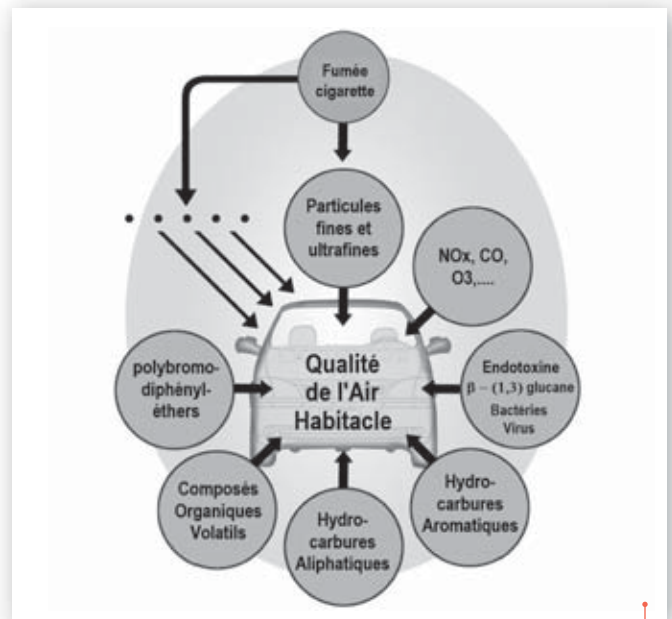


Figure 1 : Types de polluants communément trouvés dans l'habitacle des véhicules (selon Muller et al. (2011) [8])

POLLUANTS PRÉSENTS DANS L'HABITACLE DES VOITURES

Dans un espace aussi réduit et confiné que l'habitacle d'une voiture, on trouve parfois plus de 300 types de gaz carbonés, notamment des Composés organiques volatils (COV)¹⁰, des comburants gazeux (NOx, CO, etc.) et des particules^{11,12} (cf. figure 1).

On trouve des COV¹³ en quantité dans les véhicules neufs. Ceux-ci proviennent des émissions de différents produits : cuir naturel ou artificiel, polystyrène, polyéthylène, polypropylène, polyamide, colles, peintures, mousse de polyuréthane, etc. Ces matériaux composent les tableaux de bord, les garnitures intérieures, les revêtements des sièges, les matériaux de revêtement du plancher, etc. Malheureusement, les concentrations des produits chimiques relâchés par ces composants dans l'espace confiné de l'habitacle d'une voiture sont largement supérieures (jusqu'à dix fois) à celles constatées dans l'air ambiant¹⁴.

La pollution de l'habitacle provient aussi de l'extérieur. C'est même le processus d'infiltration qui contribue en priorité à la hausse de la concentration des particules ultrafines (PUF), des matières particulaires (PM), des NOx, du CO, du SO₂ et du HC dans les habitacles. Le processus d'infiltration est un corollaire de l'entrée d'air dans l'habitacle, laquelle est due à la ventilation, aux fenêtres ouvertes ou aux fuites. Il a été démontré que le rapport entre les concentrations intérieures et les concentrations extérieures (I/E) lors du processus d'infiltration dépend largement de paramètres internes au véhicule tels que son kilométrage, son âge, sa vitesse et les réglages de sa ventilation, ainsi que son mode de ventilation

(recyclage activé ou désactivé)⁵. Toutefois, il est également fonction de paramètres externes comme le trafic, la topologie de la route ou la météo¹⁶. Les nanoparticules ultrafines ont fait l'objet de nombreuses études car leur niveau de toxicité est suffisamment élevé pour qu'elles soient considérées comme cancérigènes par le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) ou l'Organisation mondiale de la santé (OMS). Elles ont également des effets néfastes non négligeables sur la santé, à l'instar des COV^{4,5}. Leur dynamique particulière induit des niveaux de concentration très variables, car les particules de petite taille sont très sujettes à l'influence des turbulences et de la diffusion brownienne¹⁷. Par conséquent, il est important de caractériser la topologie du flux local avant de pouvoir comprendre le processus d'infiltration des polluants dans l'habitacle des véhicules.

CARACTÉRISATION DE L'INFILTRATION DES POLLUANTS DANS L'HABITACLE DES VÉHICULES : APPROCHES EXPÉRIMENTALES TYPIQUES

Nous avons déjà mentionné notre approche, originale mais nécessaire, consistant à associer des mesures embarquées et en laboratoire pour comprendre le transport des polluants depuis leur point d'émission jusqu'à leur infiltration dans l'habitacle. Dans ce paragraphe, nous allons décrire le dispositif expérimental typique de mesure embarquée permettant d'évaluer le rapport I/E de plusieurs polluants. Nous décrivons également les études en soufflerie permettant de caractériser la dispersion des PUF en corrélation avec la topologie du flux. Nous détaillons ci-dessous la méthodologie utilisée pour les deux approches dans le cadre du projet « CAPTIHV », mené pour identifier les polluants issus du transport automobile et leur infiltration dans les habitacles des véhicules.

* La diffusion brownienne désigne le mouvement aléatoire des petites particules causé par la collision des molécules dans l'air.



Figure 2 : Sondes extérieure (a) et intérieure (b) utilisées pour mesurer les concentrations de polluants © Amine Mehel

La première approche regroupait des mesures embarquées simultanées des concentrations intérieures et extérieures de polluants gazeux (NOx) et de particules ultrafines dans des conditions réelles de roulage, en région parisienne. Le rapport entre les concentrations intérieures et extérieures (I/E) a été mesuré en termes de concentrations massiques de polluants gazeux et de particules, et de concentrations numériques pour les PUF. L'échantillonnage a été obtenu à l'aide de deux sondes installées du côté gauche du véhicule et à la hauteur de la bouche du passager pour l'air intérieur (figure 2). Enfin, nous avons effectué un enregistrement vidéo synchronisé pour bénéficier d'informations supplémentaires. Ce dispositif permet d'analyser ultérieurement tout événement particulier survenant à l'avant du véhicule.

Pour cette étude, nous avons utilisé un véhicule utilitaire Renault Kangoo (modèle 2006, équipé de filtres d'habitacle fournis par le constructeur). Il convient de noter que les fenêtres étaient fermées lors de tous les déplacements, que la ventilation était activée (sur un débit intermédiaire) et que le recyclage de l'air était éteint. Le débit de la ventilation était réglé en position intermédiaire tout au long de l'étude. Des mesures ont également été effectuées en vue de caractériser l'influence des paramètres de ventilation et des fenêtres sur le rapport I/E à bord de deux véhicules successifs. Celui

placé en amont était une Kangoo tandis que celui placé en aval était soit un véhicule équipé d'un moteur diesel de 2006 et de filtres d'habitacle fournis par le constructeur, soit un véhicule à essence de 2016 doté de filtres d'habitacle fournis par le constructeur et affichant 20 000 km au compteur. L'originalité de ces mesures sur deux véhicules successifs tient à la réduction de l'influence du type de voiture amont (type de moteur, type de modèle, etc.) sur les émissions à l'avant du véhicule faisant l'objet de l'étude.

La campagne de mesures embarquées a été conduite entre le mois d'avril 2016 (temps ensoleillé, températures entre 5°C et 20°C) et le mois de décembre 2017 (températures entre 1°C et 15°C). Plusieurs itinéraires ont été testés à différents moments de la journée (matin, milieu de journée, soirée). En fonction du type de route (autoroute, urbain, périphérique), le trafic allait de fluide à dense. Nous avons parcouru une distance totale de 107 km sur une période de trois heures. Les mesures ont été effectuées à des vitesses allant de 10 km/h⁻¹ à 130 km/h⁻¹. Pour les mesures en soufflerie, nous nous sommes intéressés à l'évaluation de la dispersion des PUF en aval d'une maquette de type corps d'Ahmed en modèle réduit¹⁹, (figure 3a). Le deuxième modèle de voiture, (b) de type MIRA, est utilisé en tant que voiture suiveuse. Doté de trois prises d'air, il est creux, de façon à permettre les mesures et l'infiltration des PUF.



Figure 3 : Maquettes de voitures utilisées pour étudier les infiltrations : (a) corps d'Ahmed, (b) maquette MIRA © Amine Mehel

Le flux d'air étudié a été fixé à une vitesse de $U_{\infty}=12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, ce qui correspond aux zones urbaines. Nous avons cherché à simuler la dispersion des PUF à partir des pots d'échappement des véhicules dans les zones urbaines en aval de la maquette, puis leur infiltration dans un modèle Mira en aval. Pour y parvenir, nous avons injecté des PUF d'une taille allant de 20 à 100 nm, puis nous avons caractérisé leur dispersion en corrélation avec leurs interactions avec le champ d'écoulement²⁰.

LE RAPPORT I/E ET LES PARAMÈTRES D'INFLUENCE

Nous avons déjà pu constater que plusieurs paramètres internes influent sur le rapport I/E, notamment le mode de ventilation (air frais venant de l'extérieur, Air extérieur ou Air recyclé). Ces éléments ont été confirmés par les résultats du projet CAPTIHV. En effet :

- quand le mode ventilation Air recyclé est activé, seul 22 à 40 % du NO_2 s'infiltré dans l'habitable. Pour les PUF, les taux oscillent entre 25 % et 90 %.
- quand le mode Air extérieur est activé, tous ces polluants s'infiltrent dans l'habitable.

Le tableau ci-dessous présente les rapports moyens de la campagne de mesures effectuée sur l'intégralité d'un véhicule (Kangoo) :

Polluant	Valeur	C_{int} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) [(#/ cm^3) pour PN]	C_{ext} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) [(#/ cm^3) pour PN]	Rapport (I/E) ($\overline{R_{I/E}}$ pour la valeur moyenne)	Rapport (I/E) moyen $R_{I/E}$
NO_2	Moyenne	80	117	0,82	0,68
	Maximum	1457	4757	50,00	-
PN	Moyenne	42 000	44 000	1,11	0,95
	Maximum	391 000	421 000	24,18	-
PM_{10}	Moyenne	27	28	1,07	0,96
	Maximum	582	1760	16,17	-
$\text{PM}_{2,5}$	Moyenne	26	25	1,10	1,04
	Maximum	1 760	1 760	8,60	-

Tableau 1 : Rapports de concentration I/E observés pour différents polluants lors de la campagne de mesures embarquées effectuée sur l'intégralité d'un véhicule

Nous remarquons qu'en fonction du type de polluant, les valeurs moyennes peuvent être supérieures à 1, ce qui signifie que les passagers peuvent être plus exposés que s'ils étaient à l'extérieur de l'habitable. Nous observons également que le rapport $R_{I/E}$ pour le NO_2 , les PN et les PM_{10} , contrairement au rapport instantané moyen ($\overline{R_{I/E}}$), est inférieur à 1. C'est notamment le cas pour le NO_2 (0,68), ce qui tend à prouver que les passagers sont moins exposés au NO_2 dans le véhicule même si le mode de ventilation est réglé sur Air extérieur.

Au-delà des paramètres internes au véhicule, les paramètres externes, notamment le type de route, la densité du trafic ou la météorologie, peuvent également avoir une incidence sur les rapports I/E. Fruin et al.²¹ ont conduit une vaste campagne de caractérisation des niveaux de polluants de l'air extérieur où les PM (concentrations en masse particulaire), les PUF (concentrations en nombre), les NOx, le CO et le CO_2 ont été mesurées. Cette campagne a montré que le type de route (autoroute, tunnel, route à grande circulation) constitue le

Voici deux définitions concernant le calcul du rapport I/E moyen :

$$\overline{R_{I/E}} = \left(\frac{C_{\text{int}}}{C_{\text{ext}}} \right) \quad (1)$$

$$R_{I/E} = \frac{C_{\text{int}}}{C_{\text{ext}}} \quad (2)$$

La première (équ. 1) permet d'établir la moyenne des rapports instantanés (c'est-à-dire la moyenne globale du rapport entre la concentration dans l'habitable et la concentration extérieure, qui est mesurée toutes les dix secondes. La seconde, qui est généralement présentée dans les études, renvoie au rapport entre les concentrations moyennes dans l'habitable et les concentrations moyennes à l'extérieur).

Le rapport moyen instantané $\overline{R_{I/E}}$ est indiqué pour caractériser le processus d'infiltration, par exemple lors de la caractérisation des filtres habitacle. Le $R_{I/E}$ est le rapport entre la concentration moyenne dans l'habitable et la concentration moyenne à l'extérieur. Étant donné que l'on s'appuie sur les concentrations moyennes mesurées pendant tout le trajet, il s'avère possible d'évaluer l'exposition des passagers, ce qui en fait un outil plus indiqué dans notre cas.

principal facteur de variation des concentrations de PM, PUF et NO . C'est également la conclusion à laquelle a abouti le projet CAPTIHV. En effet, les tunnels contribuent à l'accroissement des concentrations extérieures et dans l'habitable selon un ratio de 1,6 à 1,9 respectivement pour le NO_2 et selon un ratio de 2 pour les PN. En outre, le temps passé dans un tunnel a aussi son influence. Plus on s'y attarde, plus les concentrations augmentent (figure 4). Ainsi, les tunnels ont un fort impact sur le rapport I/E, comme cela a été constaté par Kaminsky²². Le projet CAPTIHV a également montré que le boulevard périphérique parisien influe considérablement sur la concentration des polluants ci-dessus dans l'habitable et à l'extérieur, selon un ratio de 1,6.

Les mesures embarquées à deux véhicules ont également permis d'évaluer l'influence de la distance inter-véhicules sur le rapport I/E. Sachant que la topologie du sillage de l'écoulement de la voiture dépend de la distance par rapport au véhicule amont, ce paramètre influe sur la dynamique des particules et

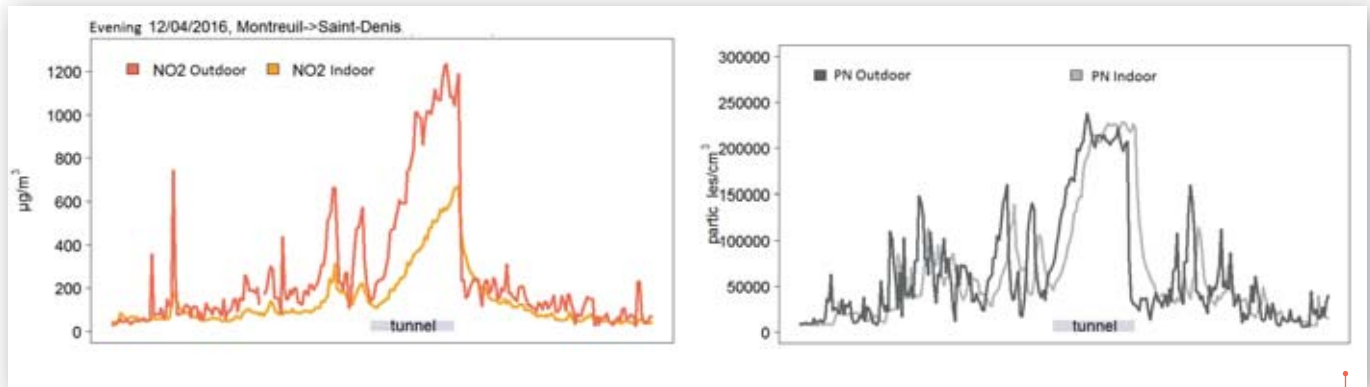


Figure 4 : Évolution dans le temps des concentrations de NO2 et de PN dans l'habitacle et à l'extérieur sur une route typique comportant un tunnel

donc sur leur infiltration. Cet aspect a également été étudié en détail lors des études en soufflerie (paragraphe suivant).

Les mesures embarquées ont permis de déterminer l'évolution dans le temps des concentrations à l'intérieur et à l'extérieur du véhicule, ainsi que les rapports I/E. Les résultats sont exposés dans la figure 2 pour les NOx et dans la figure 3 pour les PUF.

IMPACT DE LA TOPOLOGIE DU FLUX SUR L'INFILTRATION DE PUF DANS L'HABITACLE DES VÉHICULES

Pour bien comprendre l'influence de la proximité entre plusieurs voitures en déplacement et, plus spécifiquement, celle des distances inter-véhicules, nous avons procédé à des mesures en soufflerie qui permettent de caractériser de façon plus détaillée le lien entre la topologie du flux et les mécanismes de dispersion / infiltration des PUF.

La figure 5 montre la topologie du flux dans l'écoulement du sillage du corps d'Ahmed en première position. On y observe deux structures tourbillonnaires contrarotatives, qui constituent ce que l'on appelle la zone de recirculation.

Les particules ultrafines émises par le pot d'échappement de la maquette du corps d'Ahmed interagissent avec ces tourbillons, qui à leur tour influent sur la dynamique des particules et donc sur leur dispersion. Les concentrations sont présentées sous forme adimensionnées dans la figure 6. Dans la zone de recirculation, la

dispersion verticale des PUF est renforcée par la présence de deux tourbillons (figure 6). Comme attendu, le point de concentration maximale correspond au point d'émission situé au niveau du pot d'échappement.

La maquette suiveuse MIRA est équipée de trois entrées d'air. Elles ont été ouvertes à tour de rôle et des mesures de concentration ont été prises à l'extérieur et à l'intérieur de la maquette pour connaître les rapports I/E.

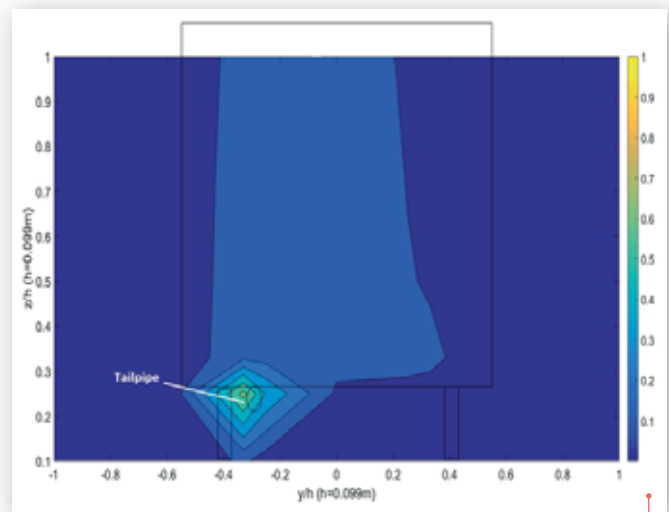


Figure 6 : Champ des concentrations en nombre de particules sur le plan yz à une distance de x/H=0,5 de l'arrière du corps d'Ahmed

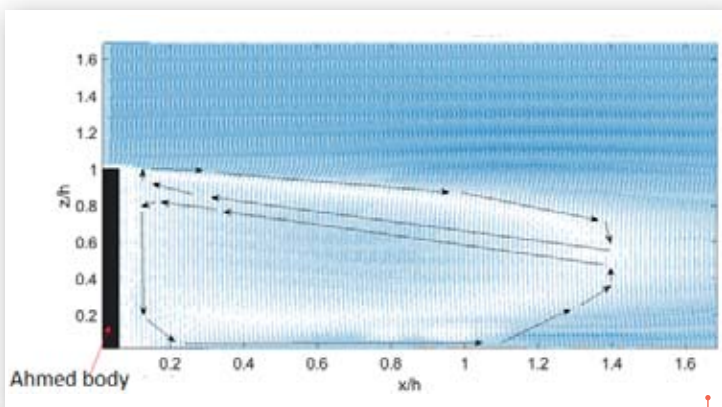


Figure 5 : Topologie de l'écoulement du sillage du corps d'Ahmed à culot droit

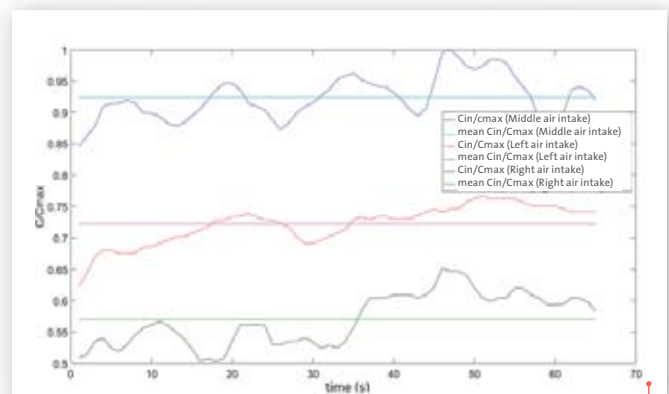


Figure 7 : Influence de la position de l'entrée d'air sur les concentrations adimensionnées intérieures en nombre de particules

Les résultats ont montré que la position de l'entrée d'air influence le processus d'infiltration. Comme on peut le constater dans la figure 7, la concentration adimensionnée est plus élevée pour la prise d'air centrale (située au milieu) que pour celle de gauche, qui, à son tour, est supérieure à celle mesurée pour celle de droite. Ceci s'explique par la distribution de la concentration en nombre de particules, qui montre que les PUF se dispersent verticalement avant de s'accumuler dans la zone de recirculation et de se diffuser de façon longitudinale et transversale.

CONCLUSION

La pollution à l'intérieur des véhicules automobiles est induite par les émissions de polluants internes et par les polluants externes qui s'y infiltrent. Il s'agit principalement de NO_x, CO, CO₂, PUF, PM et VOC spécifiques (BTEX). Dans les deux cas, les paramètres internes au véhicule tels que la position des fenêtres, l'âge du véhicule et, en particulier, le mode de ventilation et le débit peuvent influencer sur les concentrations de polluants dans l'habitacle. En outre, le processus d'infiltration des polluants est conditionné à la fois par ces paramètres internes et par des paramètres externes tels que le type et la densité du trafic, le type de route (tunnels, etc.) ainsi que le type et la vitesse des véhicules meneurs (en amont du véhicule étudié).

Dans nos études, notamment dans le cadre du projet CAPTIHV, nous avons eu recours à deux approches pour examiner la dispersion et l'infiltration des polluants gazeux et particulaires à l'intérieur de l'habitacle. Grâce aux mesures effectuées en soufflerie, nous avons réussi à connaître la distribution des concentrations en polluants émis par le pot d'échappement d'une maquette de voiture. Ces concentrations sont fortement corrélées à l'écoulement de sillage, lequel dépend à son tour des caractéristiques aérodynamiques de la voiture. Le processus d'infiltration a été étudié à l'aide de mesures embarquées et d'essais en soufflerie utilisant une maquette creuse dotée de trois entrées d'air situées à trois endroits différents. Il a été démontré que l'infiltration des polluants, notamment des PUF, dépend des distances inter-véhicules et de la position de l'entrée d'air.

Cela montre que l'amélioration de la qualité de l'air dans l'habitacle d'un véhicule peut s'avérer très compliquée et qu'il est donc nécessaire de mener de nombreuses études et simulations à différentes échelles (en local, en amont et à l'intérieur de l'habitacle) pour espérer approfondir nos connaissances et mettre en place des solutions permettant d'obtenir un air plus propre dans les habitacles.

Il est déjà possible de formuler quelques recommandations. Par exemple, dans un contexte de circulation dense ou sur certains types d'infrastructures (notamment les tunnels), il est préférable d'activer le mode recyclé. Néanmoins, il vaut mieux ne pas le laisser fonctionner pendant plus de 15 minutes car la concentration de CO₂ dans l'habitacle a tendance à augmenter, ce qui n'est pas recommandé au volant. Enfin, nous conseillons de conserver une distance d'au moins cinq mètres par rapport à la voiture située devant, de façon à réduire au maximum l'infiltration des polluants.

RÉFÉRENCES

- 1 Biswas S., Hu S., Verma V., Herner J., Robertson W.J., Ayala A. et Sioutas C. Physical Properties of particulate matter (PM) from late model heavy duty diesel vehicles operating with advanced emission control technologies. *Atmospheric environment*, 42, 2008
- 2 Morawska L., Ristovski Z., Jayaratne E.R., Keogh D.U. et Ling, X. Ambient nano and ultrafine particles from motor vehicle emissions: characteristics, ambient processing and implications on human exposure. *Atmospheric Environment* 42, 8113-8138, 2008
- 3 Boulter P. G., Borken-Kleefeld J. et Ntziachristos L., The Evolution and Control of NO_x Emissions from Road Transport in Europe, *The Handbook of Environmental Chemistry*, chap. Urban Air Quality in Europe, 26, 31-53, 2012
- 4 Li N., Hao M.Q., Phalen R. F., Hinds W.C. et Nel A. E. Particulate air pollutants and asthmas. A paradigm for the role of oxidative stress in PM-induced adverse health effects. *Clinical Immunology*, 109, 250-265, 2003
- 5 Delfino R.J., Malik S. et Sioutas C., 2005. Potential role of ultrafine particles in associations between airborne particle mass and cardiovascular health. *Environmental Health Perspectives* 113, 934-946
- 6 Hudda N., Eckel S. P., Knibbs L. D., Sioutas C., Delfino R. J. et Fruin S. A. Linking in-vehicle ultrafine particle exposures to on-road concentrations. *Atmospheric Environment* 59, 578-586, 2012
- 7 Goel A. et Kumar P. Zone of influence for particle number concentrations at signalised traffic intersections. *Atmospheric Environment*, 123, 25-38, 2015
- 8 Takano Y. et Moonen P. On the influence of roof shape on flow and dispersion in an urban street canyon. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 123, 107-120, 2013
- 9 Mehel A. et Murzyn F. 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
- 10 Yoshida T., Matsunaga I., Tomioka K. et Kumagai S. Interior air pollution in automotive cabins by volatile organic compounds diffusing from interior materials: I. Survey of 101 types of Japanese domestically produced cars for private use. *Indoor Built Environ*; 15: 425-444, 2006
- 11 IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risk to Humans. Diesel and Gasoline Engine Exhausts and Some Nitroarenes. Lyon (FR): International Agency for Research on Cancer; 1989. (IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, No. 46.) 1, Composition of Engine Exhausts
- 12 C. L. Myung et S. Park. Exhaust nanoparticle emissions from internal combustion engines: a review. *International journal of automotive technology*, 13, 1, pp. 9-22, 2012
- 13 Yoshida T., Matsunaga I., Tomioka K. et Kumagai S. Interior air pollution in automotive cabins by volatile organic compounds diffusing from interior materials: II. Influence of Manufacturer, Specifications and Usage Status on Air Pollution, and Estimation of Air Pollution Levels in Initial Phases of Delivery as a New Car. *Indoor Built Environ* 2006; 1 (5): 445-462
- 14 Brodzik K., Faber J., Tomankiewicz D. et Gołda-Kopek A. In-vehicle VOCs composition of unconditioned, newly produced cars. *J. Environ. Sci.* 26 (5) 1052-61, 2014
- 15 Kaur, S., Nieuwenhuijsen, M.J., et Colville, R.N. Fine particulate matter and carbon monoxide exposure concentrations in urban street transport microenvironments, *Atmospheric Environment*, 41 (23), pp. 4781-4810, 2007
- 16 Mehel A., Murzyn F., Joly F., Bruge B., Cuvelier Ph. et Patte-Rouland B., On-board measurements to assess in-cabin vehicle air quality in Paris, *Proceedings 22nd International Transport and Air Pollution Conference, Zürich, Switzerland*, 15-16 novembre 2017
- 17 Mehel A., Tanière A., Oesterlé B. et Fontaine J.R. On dispersion models for the prediction of micro- and nanoparticle deposition in wall-bounded turbulent flows, *Journal of Aerosol Science*, 41(8), pp. 729-744, 2010
- 18 Müller D., Klingelhöfer, D., Uibel, S. et Gronenberg D. A. Car indoor air pollution - analysis of potential sources. *J Occup Med Toxicol*, 6(33), 2011
- 19 Ahmed S. R., Ramm G. et Faitin G. (1984). Some salient features of the time-averaged ground vehicle wake (No. SAE-TP-840300). Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, PA
- 20 Mehel A. et Rolin E. Wind tunnel study of ultrafine particles infiltrating car cabin, *Proceedings 23rd International Transport and Air Pollution Conference, Salonique, Grèce*, 15-17 mai 2019
- 21 Fruin S., Westerdahl D., Sax T., Sioutas C. et Fin P.M. Measurements and predictors of on-road ultrafine particle concentrations and associated pollutants in Los Angeles, *Atmospheric Environment*, 42, pp.207-219, 2008
- 22 Kaminsky J.A., Gaskin E.A.L.M., Matsuda M. et Miguel A.H. In-Cabin Commuter Exposure to Ultrafine Particles on Commuter Roads in and around Hong Kong's Tseung Kwan O Tunnel, *Aerosol and Air Quality Research*, 9, pp. 353-357, 2009

Références complémentaires :

- Zhu Y., Eiguren-Fernandez A., Hinds W.C. et Miguel A.H. In-cabin commuter exposure to ultrafine particles on Los Angeles freeways. *Environmental Science & Technology* 41, 2138-2145, 2007
- Knibbs L.D., de Dear R.J. et Morawska L. Effect of cabin ventilation rate on ultrafine particle exposure inside automobiles. *Environmental Science & Technology*, 44, pp 3546-3551, 2010