

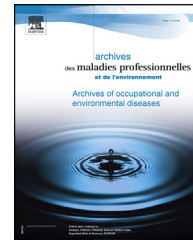


Disponible en ligne sur

ScienceDirect
www.sciencedirect.com

Elsevier Masson France

EM|consulte
www.em-consulte.com



ARTICLE ORIGINAL

Analyse exploratoire des mesures de particules ultrafines en temps réel dans des enceintes ferroviaires souterraines de transport public



Exploratory analysis of real-time ultrafine particles measurements in a public transport underground railway

T. Ben Rayana^{a,b}, M. Hemmendinger^a, C. Crézé^a,
P. Wild^{a,c}, J.-J. Sauvain^a, G. Suarez^a, S. Besançon^d,
N. Méthy^b, K. Sakthithasan^b, G. Carillo^b,
A. Debatisse^b, V. Jouannique^b, B.C. Guinhoya^e,
I. Guseva Canu^{a,*}

^a Département santé, travail et environnement, centre universitaire de médecine générale et santé publique (Unisanté), université de Lausanne, Lausanne, Suisse

^b Service santé-travail, Régie autonome des transports parisiens (RATP), Paris, France

^c Institut national de recherche et de sécurité (INRS), Vandœuvre-lès-Nancy, France

^d Laboratoire essais mesures, Régie autonome des transports parisiens (RATP), Paris, France

^e University Lille, ULR 2694–METRICS: Évaluation des Technologies de santé et des Pratiques médicales, 59000 Lille, France

Received 5 November 2021; accepted 14 January 2022

MOTS CLÉS

Exposition professionnelle;
Pollution intérieure;
Transport ferroviaire;
Souterrain;
Aérosol

Résumé

Contexte. – Parmi les composants particulaires constituant l'air des enceintes ferroviaires souterraines (EFS), les particules ultrafines (PUF, diamètre < 100 nm) restent à ce jour les plus faiblement documentées. L'objectif était d'examiner l'exposition aux PUF pour les trois principaux métiers présents dans les EFS (agents de station, conducteurs, agents de sécurité) et d'explorer les déterminants de sa variabilité.

* Auteur correspondant. Département santé, travail, environnement, Unisanté, 2, route de la Corniche, 1066 Epalinges-Lausanne, Suisse.
E-mail address: Irina.guseva-canu@unisanté.ch (I. Guseva Canu).

Méthodologie. — Trois agents de station, trois conducteurs de métro et trois agents de sécurité ont été suivis au quotidien pendant deux semaines consécutives. Les concentrations en nombre des PUF dans leur zone respiratoire ont été mesurées au moyen d'appareils DiSCmini. Les environnements occupés et les événements survenus au cours de leur activité professionnelle ont été notifiés dans un journal d'activité. L'effet de ces déterminants sur l'exposition aux PUF a été analysé pour chaque métier à l'aide d'analyses graphiques ainsi que par un modèle de régression mixte.

Résultats. — Pour les trois métiers, la concentration moyenne en nombre des PUF apparaît significativement associée à l'environnement occupé lors des activités professionnelles : $3,4 (\pm 0,6) \times 10^3$ particules/cm³ dans les vestiaires des agents de sécurité ; $9,5 (\pm 1,7) \times 10^3$ particules/cm³ dans les locaux de pause de la station ; $15,9 (\pm 2,4) \times 10^3$ particules/cm³ dans les couloirs souterrains de la station ; $17,3 (\pm 4,4) \times 10^3$ particules/cm³ sur le quai du métro ; et $23,5 (\pm 6,2) \times 10^3$ particules/cm³ au niveau des voies ferrées. À l'inverse, il n'y a pas eu d'association significative entre cette concentration et les événements occurrents (ex : passage d'une rame de métro, ouverture de la porte du guichet de l'agent de station mobile).

Conclusion. — Le niveau d'exposition des agents aux PUF dépend de l'environnement professionnel occupé. L'analyse approfondie de séries temporelles permet d'affiner et de confirmer ces résultats.

KEYWORDS

Occupational exposure;
Indoor air pollution;
Railway transport;
Underground;
Aerosol

Summary

Context. — Among the many airborne pollutants in an underground railway environment, ultra-fine particles (UFPs, diameter < 100 nm) are the least documented. The objective was to study the exposure to UFPs for jobs occurring in an underground railway and to explore the determinants of its variability.

Methods. — Three station agents, three locomotive operators and three security guards were followed-up in their daily activities over two consecutive weeks. UFPs number concentrations were measured in their personal breathing zone (PBZ) using DiSCmini. Occupied environments and events occurring during agents' occupational activity were reported in an activity logbook. The effect of these determinants on UFPs exposure was analyzed for each job using graphical analyses and a mixed regression model.

Results. — UFPs number concentration means registered for each job appear significantly associated with the environment that agents were occupying during their work shifts: $3.4 (\pm 0.6) \times 10^3$ particles/cm³ in the security guards changing room; $9.5 (\pm 1.7) \times 10^3$ particles/cm³ in the station break rooms; $15.9 (\pm 2.4) \times 10^3$ particles/cm³ in the station underground corridors; $17.3 (\pm 4.4) \times 10^3$ particles/cm³ on the subway platform; and $23.5 (\pm 6.2) \times 10^3$ particles/cm³ on the railways. However, no association was found between these concentration levels and the occurrence of events (e.g. subway passage, information office door opening).

Conclusion. — Agents' UFPs exposure levels are associated with the occupational environment they work. Time-series analysis confirms these results and allows a further understanding of exposure and its determinants.

Introduction

Les particules fines (PF, de diamètre < 2,5 µm) et particules ultrafines (PUF, de diamètre < 0,1 µm ou 100 nm) ont des effets délétères sur la santé du fait de l'inflammation biologique qu'elles engendrent [1,2]. En effet, des associations ont été rapportées entre l'exposition à ces polluants et le développement d'un certain nombre de pathologies inflammatoires de type respiratoire telles que la bronchopneumopathie chronique obstructive (BPCO) [3–5], cardio-vasculaire [6–10], ou encore métabolique tel que le diabète [10–12]. Bien que le mécanisme d'action à l'origine de l'inflammation causée par ces polluants demeure encore incertain, l'hypothèse la plus plausible à

ce jour établit un lien avec le stress oxydant induit par ces particules [1,13].

Au sein des enceintes ferroviaires souterraines (EFS), les PF font l'objet d'une large documentation. En comparaison aux PF présentes en environnement extérieur, les PF des EFS possèdent des propriétés chimiques très différentes du fait notamment de leurs compositions plus riches en métaux [12,14–18], et peuvent atteindre des niveaux de concentration massiques bien plus importants. Ces tendances ont été constatées au sein des métros de Rome [17], de Londres [19,20], de Milan [21], de Lisbonne [22], de Shanghai [23], de Séoul [24], ou encore au sein du métro parisien [25].

Selon des études en toxicologie, les effets délétères des PUF sur la santé seraient supérieurs à ceux des PF

[14]. Ceci s'expliquerait d'une part en raison d'une plus grande surface (à volume égal) en contact avec les alvéoles pulmonaires [7,26] engendrant une production plus accrue d'espèces réactives de l'oxygène (ERO) [5,16]. Par ailleurs, du fait de leur taille, les PUF sont en capacité d'interagir au niveau cellulaire, et de rejoindre la circulation systémique [7,16,27,28] affectant ainsi différents organes tels que le cœur, le système nerveux central [7], ou encore le foie [29].

Malgré ces connaissances, à la différence des particules inhalables (diamètre < 100 µm) et alvéolaires (diamètre < 4 µm) dont les niveaux sont réglementés en milieu professionnel en France (article R. 4222-10 du Code du Travail), les PUF ne sont, à ce jour, soumises à aucune valeur limite d'exposition professionnelle (VLEP). Cette absence de valeurs limites fait qu'en milieu professionnel, leur surveillance est bien moindre que celle accordée aux particules inhalables et alvéolaires. Ce manque de surveillance des PUF ne peut cependant être pallié par l'extrapolation de leurs niveaux à partir de ceux des PF, étant donné les modes d'émission différents de ces deux types de particules. En effet, les PF sont générées à la suite de phénomènes d'abrasion tandis que les PUF sont générées par des phénomènes de friction à haute température suivie de vaporisation [14,30,31] ou par des arcs situés sur le système d'alimentation électrique [14,30]. De plus, les PUF ne contribuant que de manière négligeable à la masse des PF, la mesure physique de leur concentration porte sur leur nombre par unité de volume d'air (#/m³).

Dans le milieu du transport ferroviaire, les PUF n'ont fait l'objet de mesures qu'au cours de rares études [19,22,32–35]. Les connaissances établies à ce jour sur les déterminants de l'exposition professionnelle des PUF en EFS sont donc très lacunaires [36]. Ainsi, l'objectif de la présente étude était, dans le cadre d'une étude exploratoire, d'examiner l'exposition aux PUF des différents corps de métiers exerçant dans les EFS de ce réseau au cours de leurs activités professionnelles.

Matériel et méthodes

Design de l'étude

Il s'agit d'une étude longitudinale d'exposition avec un suivi individuel des participants durant deux semaines de travail [37].

Population d'étude

Nous avons inclus trois agents de station, trois conducteurs de métro ainsi que trois agents de sécurité. Ces trois corps de métiers représentent près des deux tiers des postes du transport ferroviaire francilien souterrain.

Au sein de chaque métier suivi, nous avons retenu les trois premiers volontaires de même sexe exerçant sur des plages horaires similaires.

Parmi les agents de station, il y a eu deux agents de station fixes, dont le poste de travail est le guichet d'information et de vente de titres de transport, et un agent de station mobile. Ce dernier était chargé de superviser l'achat des titres de transports et de renseigner les clients depuis le guichet qu'il occupait sur une ligne de métro

souterraine (ligne 7, station Corentin Cariou, et exceptionnellement Crimée au cours de la première journée), d'intervenir sur les appareils de vente situés à proximité de son guichet et, de manière ponctuelle, d'effectuer des interventions au niveau de la station.

Les conducteurs de métro assuraient plusieurs trajets entre les terminus de la même ligne souterraine (ligne 7). Les agents de sécurité ont pour mission de veiller au maintien de l'ordre au niveau des différentes stations indiquées dans leur rapport d'activité du jour, ainsi qu'à bord des lignes de métro, de RER, de bus et de tramways qu'ils empruntent pour se déplacer sur le réseau.

Mesure de l'exposition

Suivi des volontaires

Le suivi des volontaires a été assuré en continu par des techniciens, mobilisés sur la base d'une alternance inter-journalière, durant six semaines consécutives (du 7 octobre 2019 au 15 novembre 2019). Durant cette période, le suivi a été réparti entre les métiers à raison de deux semaines par métier. Le suivi quotidien s'est effectué selon des créneaux horaires différents pour chaque métier (de 11 h 30 à 18 h 30 pour les agents de station ; de 6 h 30 à 11 h 30 pour les conducteurs de métro ; de 12 h à 19 h pour les agents de sécurité).

Les conducteurs et les agents de sécurité ont été suivis sur neuf jours (10 jours pour les agents de station) en raison d'un jour férié situé sur la période de suivi de ces deux métiers. Un roulement relatif au suivi des conducteurs a été mis en place (un conducteur suivi tous les trois jours). Ce roulement avait pour but de couvrir de manière exhaustive les différences individuelles relatives aux habitudes de conduite de chaque agent.

Le suivi du groupe d'agents de sécurité prenait effet au niveau de leur local de préparation situé au sous-sol de l'unité opérationnelle de commandement de la sûreté ferroviaire (avec une sortie possible directement dans la station Gare de Lyon) pour se poursuivre au sein de leur périmètre de maraude couvrant différentes lignes de métro et de RER (souterraines ou non).

Mesure de la concentration en nombre des particules ultrafines

La mesure des PUF est basée sur la détermination de la mobilité des particules après avoir été chargées électriquement. Elle a été effectuée à l'aide de l'appareil DiSCmini (Testo, Mönchaltorf, Suisse), relevant à intervalle de temps fixe (ΔT) de 10 secondes le nombre de particules dont le diamètre est compris entre 10 et 300 nm par unité de volume (en particules/cm³).

La mise en marche et en arrêt de l'appareil DiSCmini prenait effet à chaque début et fin de service des agents. Une extraction des données quotidienne sur ordinateur était assurée par le personnel chargé du suivi de l'étude (MH).

Journal d'activité

Les changements relatifs au cadre du travail ont été relevés par les techniciens dans un journal d'activité, notamment la variable environnement professionnel occupé et la variable

événement occurrent. Ces deux variables ainsi que leur timing précis de début et de fin étaient documentés à chaque changement. Les modalités de ces variables ont été identifiées en amont de l'étude, sur la base d'une connaissance précise des tâches des agents, en vue de constituer un journal d'activité propre à chaque type de métier.

Traitement des données collectées

Les données des deux agents de station fixes ont été exclus de l'étude du fait de leur manque de pertinence, puisque les changements d'environnements professionnels sur ce poste de travail sont quasi-inexistants. Les données relatives à quatre journées de suivi de l'étude (deux concernant l'agent de station mobile, une les conducteurs et une autre les agents de sécurité) n'ont pu être traitées. Cela fait suite à l'interruption des mesures de PUF au cours d'une journée de suivi de chacun des métiers, et à un défaut de remplissage du journal d'activité au cours d'une autre journée pour l'agent de station mobile.

Les événements occurrents correspondant dans la majorité des cas à des changements ponctuels d'une durée de 1 ou 2 minutes, une durée de 1 minute 30 leur a été attribuée ($9 \Delta T$). Les environnements occupés d'une durée inférieure à 10 minutes ($60 \Delta T$) au cours de la période de suivi, de manière combinée ou non à un événement occurrent, ont été supprimés des données à analyser du fait de leur manque de représentativité au regard des activités professionnelles. Il est à noter que pour les conducteurs, l'intégralité des événements occurrents se sont produits au cours de l'occupation des environnements occultés précédemment cités ce qui a entraîné la suppression de l'intégralité des événements s'étant produits au cours de leur période de suivi.

Toutes les valeurs de concentrations des PUF enregistrées ont été normalisées par une transformation logarithmique, puis appariées à l'environnement que l'agent occupait lors de leurs mesures et également aux événements occurrents lors du suivi.

Analyses statistiques

Les variations temporelles des concentrations de PUF enregistrées lors du suivi des agents ont d'abord été explorées au moyen d'une approche graphique. Ces variations ont été explorées, pour chaque métier et chaque jour de suivi, en fonction des environnements occupés et des événements occurrents au cours des activités professionnelles par le biais d'une déclinaison de couleur de l'aire sous la courbe des concentrations au cours du temps.

Ensuite, une analyse statistique de régression linéaire par modèles mixtes, utilisant le test de Wald- χ^2 , a été réalisée pour chaque corps de métier séparément. Le but était d'étudier l'effet des environnements occupés et des événements occurrents (variables fixes) et du jour de suivi (variable aléatoire) sur les moyennes des concentrations logarithmiques en nombre des PUF sur l'intégralité de la période de suivi. La variation des concentrations de PUF pour ces variables a été estimée (par rapport à une catégorie de référence) sur la base des coefficients de régression et rapportée en pourcentage.

Les moyennes des concentrations en nombre des PUF au sein des différents environnements occupés ont été ensuite prédites sur la base du même modèle de régression, exprimée en moyennes géométrique et des écart-types géométriques.

L'ensemble des graphiques et des analyses statistiques ont été effectués en utilisant le logiciel STATA (version 16). Le seuil de significativité a été fixé à 5 %.

Approbation éthique et consentement des participants

Le protocole de l'étude a été approuvé par le comité français de protection des personnes Sud-Est II (N°2019-A01652 55). Un consentement écrit de participation a été obtenu pour tous les participants.

Résultats

Les concentrations de PUF, illustrées dans les Figs. 1–3, montrent des fluctuations lors des différents changements d'environnement opérés au cours de l'activité professionnelle des trois différents corps de métier suivis. Cette analyse qualitative nous permet d'émettre l'hypothèse qu'il existerait des différences significatives quant aux concentrations de PUF enregistrées dans les différents environnements occupés au cours de l'activité professionnelle des trois métiers suivis.

Aucune hypothèse n'a par ailleurs pu être émise à partir de cette analyse qualitative quant à l'effet des événements occurrents au cours de l'activité professionnelle sur les concentrations de PUF.

Exposition de l'agent de station mobile

Les concentrations moyennes en nombre des PUF enregistrées au cours du suivi de l'agent de station mobile sont de $18,0 (\pm 1,3) \times 10^3$ particules/cm³ dans la rame de métro, de $22,2 (\pm 0,9) \times 10^3$ particules/cm³ dans le guichet d'information, et de $25,1 (\pm 2,1) \times 10^3$ particules/cm³ dans les couloirs de la station (Tableau 1).

L'environnement occupé a un effet significatif sur les concentrations logarithmiques en nombre des PUF ($p < 0,01$). En revanche, la variable événement occurrent (comme, par exemple, l'ouverture de la porte du guichet d'information) n'a pas eu d'effet significatif sur les moyennes des concentrations en nombre des PUF ($p = 0,60$) (Tableau 2).

Exposition des conducteurs de métro

Les concentrations moyennes en nombre des PUF enregistrées au cours du suivi des conducteurs de métro se déclinent (de manière croissante) de $15,5 (\pm 3,9) \times 10^3$ particules/cm³ au niveau des couloirs de la station et des locaux du personnel à $23,5 (\pm 6,2) \times 10^3$ particules/cm³ en tunnel sur les voies ferrées du métro (Tableau 1). L'environnement occupé a un effet significatif sur les concentrations des PUF ($p < 0,01$) (Tableau 2).

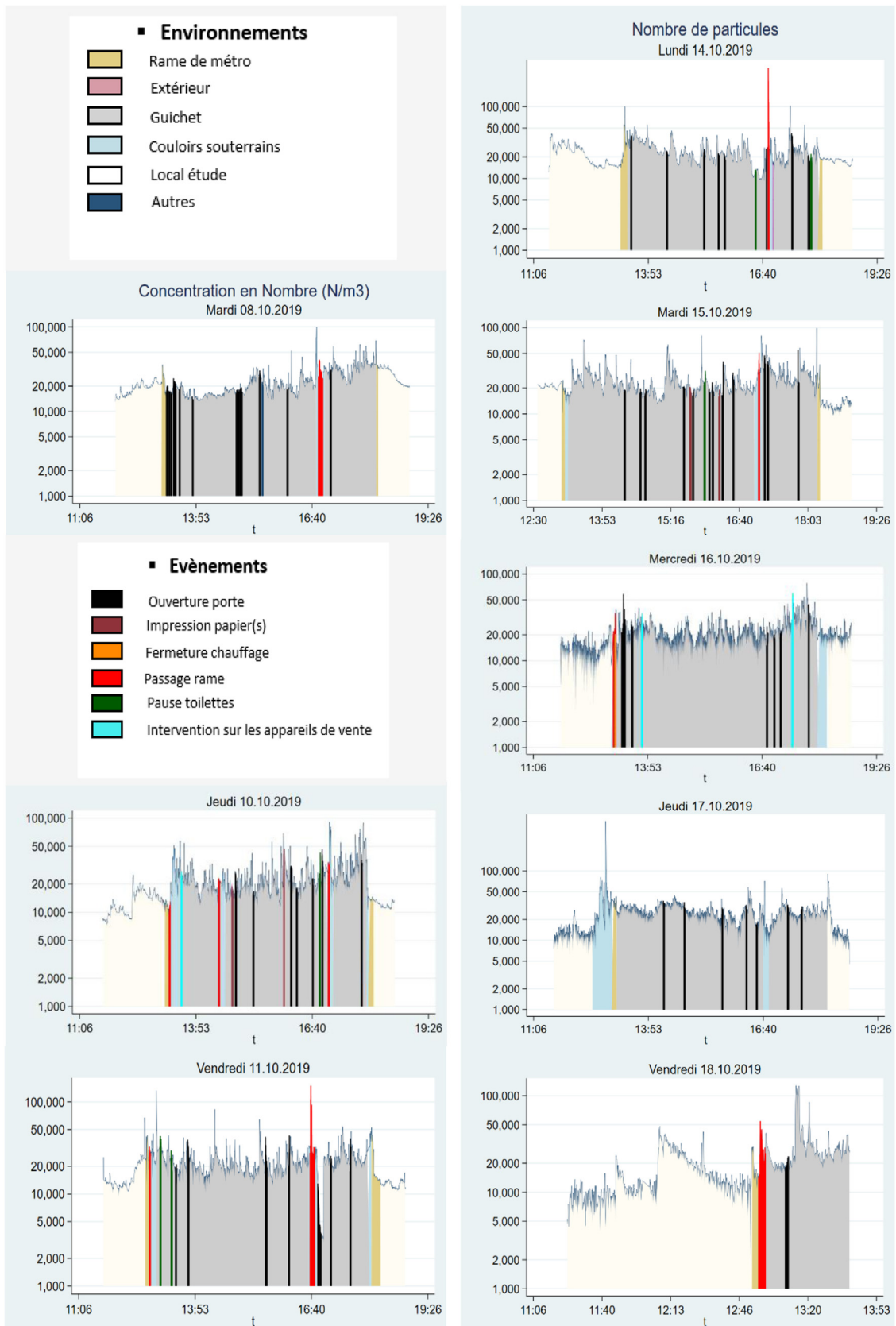


Figure 1. Concentrations des PUF mesurées au cours du suivi de l'agent de station mobile.

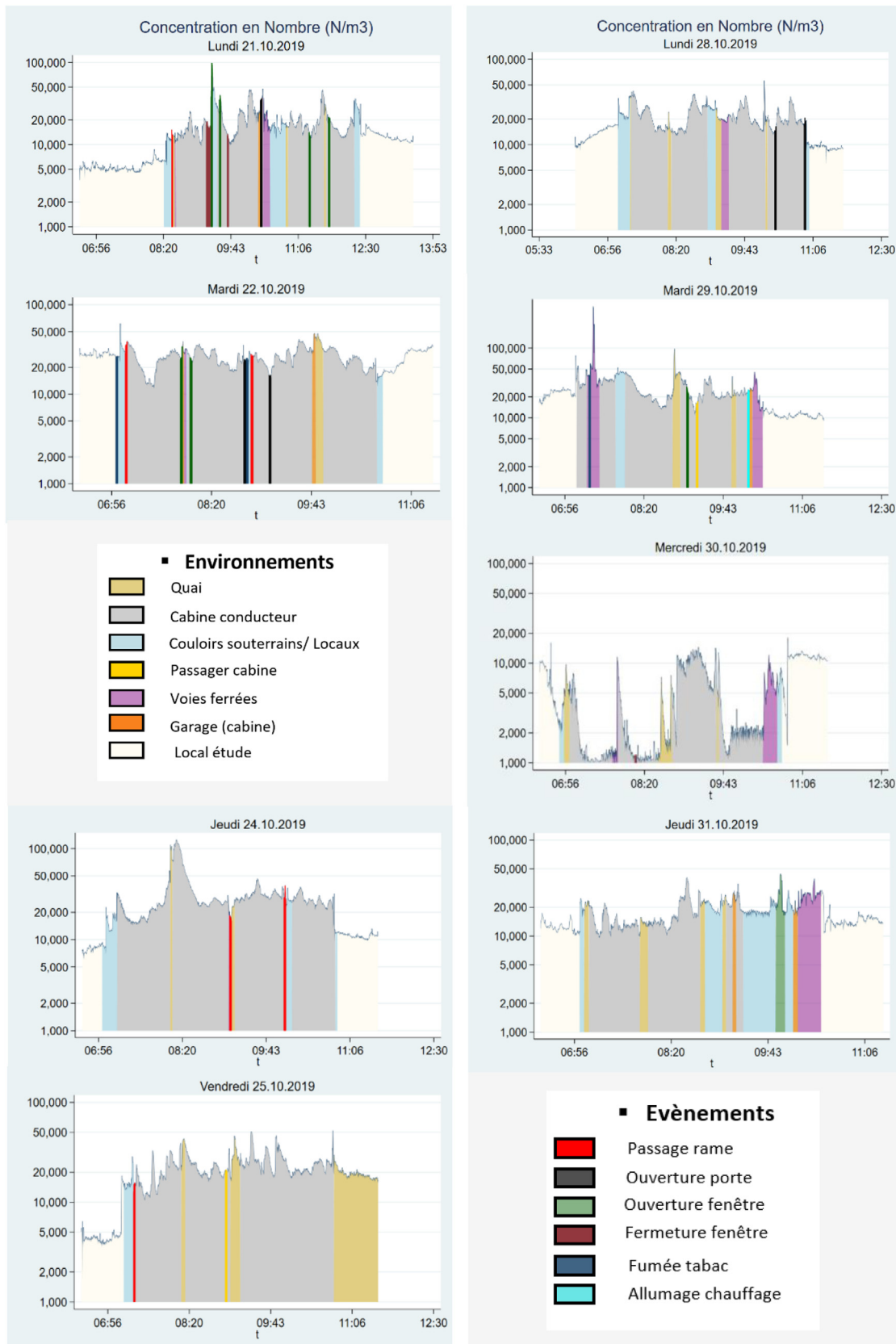


Figure 2. Concentrations des PUF mesurées au cours du suivi des conducteurs.

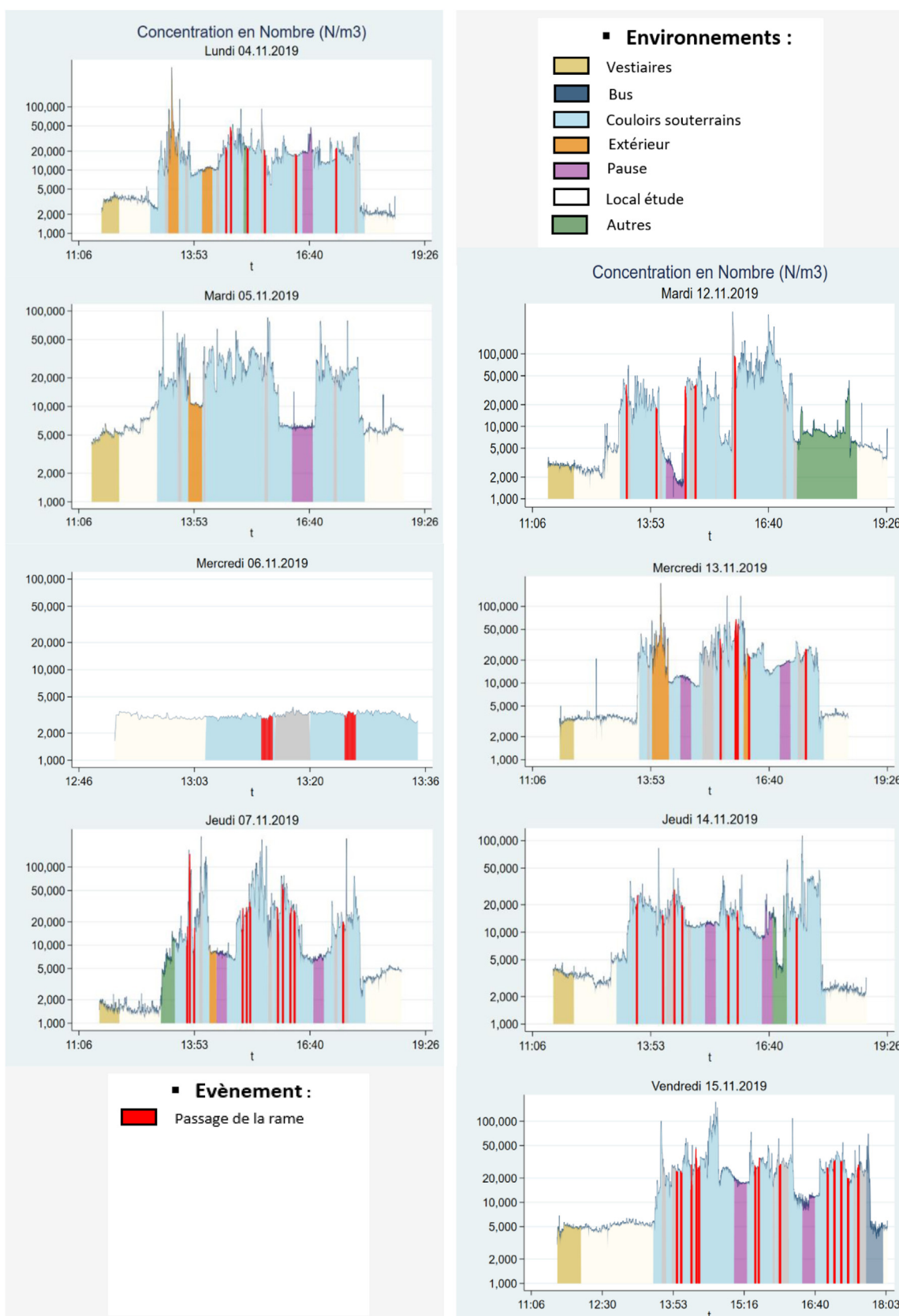


Figure 3. Concentrations des PUF mesurées au cours du suivi des agents de sécurité.

Tableau 1 Concentrations moyennes^a des particules ultrafines des trois corps de métiers.

Métier	Environnements occupés ^b			Évènements occurrents ^b		
	Environnements occupés ^b	Concentrations moyennes prédites (#/cm ³)	Écart-type	Évènements occurrents	Concentrations moyennes prédites (#/cm ³)	Écart-type
Agent de station	Rame de métro	$18,0 \times 10^3$	$1,3 \times 10^3$	Ouverture porte	$21,2 \times 10^3$	$0,9 \times 10^3$
	Couloirs de station	$25,1 \times 10^3$	$2,1 \times 10^3$			
Agents de sécurité	Guichet d'information	$22,2 \times 10^3$	$0,9 \times 10^3$	Aucun évènement	$22,1 \times 10^3$	$1,2 \times 10^3$
	Rame de métro	$22,5 \times 10^3$	$4,0 \times 10^3$			
	Couloirs de station	$15,9 \times 10^3$	$2,4 \times 10^3$	Passage de rame	$17,0 \times 10^3$	$5,0 \times 10^3$
	Locaux pause	$9,5 \times 10^3$	$1,7 \times 10^3$			
	Autres ^b	$7,7 \times 10^3$	$2,1 \times 10^3$			
	Vestiaires	$3,4 \times 10^3$	$0,6 \times 10^3$			
	Extérieur ^c	$18,1 \times 10^3$	$4,9 \times 10^3$	Aucun évènement	$12,7 \times 10^3$	$1,1 \times 10^3$
Conducteurs de métro	Bus ^c	$7,5 \times 10^3$	$3,5 \times 10^3$			/
	Voies ferrées (tunnel)	$23,5 \times 10^3$	$6,2 \times 10^3$			
	Quai du métro	$17,3 \times 10^3$	$4,4 \times 10^3$			
	Cabine de métro	$16,3 \times 10^3$	$4,1 \times 10^3$			
	Couloirs de station/Locaux	$15,5 \times 10^3$	$3,9 \times 10^3$			

^aLes concentrations ont été prédites par le modèle à effet mixtes (variables à effet fixe : environnements occupés/évènements occurrents ; variables à effet aléatoire : jour de suivi).
^b Ordonnés (pour chaque métier) selon une distance croissante les séparant aux voies ferrées de haut en bas.
^c Environnement hors enceintes ferroviaires souterraines.

Exposition des agents de sécurité

Les concentrations moyennes des PUF enregistrées au cours du suivi des agents de sécurité se déclinent (de manière croissante) de $3,4 (\pm 0,6) \times 10^3$ particules/cm³ au niveau les vestiaires (situés dans un bâtiment annexe de la station de métro) à $22,5 (\pm 4,0) \times 10^3$ particules/cm³ à bord de la rame de métro (Tableau 1). L'environnement occupé a un effet significatif sur les moyennes des concentrations en nombre des PUF ($p < 0,01$) (Tableau 2). En revanche, l'évènement occurrent (représenté par le passage d'une rame de métro, en présence des agents sur le quai) n'a pas d'effet significatif sur les moyennes des concentrations logarithmiques en nombre des PUF ($p = 0,35$) (Tableau 2).

Discussion

Cette étude a eu pour but de décrire les concentrations en nombre des PUF au sein des EFS du métro parisien, et d'explorer l'influence de l'environnement et des évènements occurrents dans le cadre de l'activité professionnelle

sur ces niveaux en suivant des volontaires de trois corps de métiers différents (agents de station, conducteurs, agents de sécurité) au cours de leurs journées de travail. Il est à noter que le guichet d'information de l'agent de station mobile se situe à proximité de la trémie (à quelques mètres de l'entrée de la station de métro) et que la ventilation est assurée depuis la trémie vers les quais.

Au terme de cette étude, il apparaît que les concentrations de PUF sont corrélées aux environnements occupés lors des activités professionnelles. On note également que ces concentrations tendent à diminuer à mesure que l'environnement s'éloigne de la voie ferrée.

Le trafic automobile est souvent considéré comme la principale source de production des PUF [38]. Parmi les rares études ayant comparé les concentrations de PUF au sein des EFS au regard de ceux mesurés en milieu extérieur, certaines ont mis en évidence des concentrations de PUF au sein des EFS relativement similaires à ceux retrouvées en milieu extérieur [20,32]. D'autres études ont également montré des concentrations de PUF au sein des EFS similaires à celles retrouvées dans les enceintes ferroviaires situés en surface [20,33]. Par ailleurs, à la différence de ces conclusions,

Tableau 2 Effets des environnements occupés et des événements occurrents sur les concentrations des particules ultrafines.

Métier	Environnements occupés ^a			Évènements occurrents		
	Catégorie	Coefficients (écart-type)	Variation (%)	Catégorie	Coefficients (écart-type)	Variation (%)
Agent de station	$p < 0,01$ Rame de métro	-0,09 (0,04)	-9%	$p = 0,60$ Ouverture porte	-0,02 (0,03)	-2 %
	Couloirs de station Guichet d'information	0,05 (0,04) Référence	6 % -	Aucun évènement	Référence	-
Agents de sécurité	$p < 0,01$ Rame de métro	0,48 (0,21)	61 %	$p = 0,35$ Passage de rame	0,13 (0,14)	14 %
	Couloirs de station	0,33 (0,21)	39 %			
	Locaux pause Autres	0,11 (0,21) 0,01 (0,23)	11 % 1 %			
	Vestiaires	-0,35 (0,21)	-29 %	Aucun évènement	Référence	-
Conducteurs de métro	Extérieur ^b Bus ^b	0,38 (0,23) Référence	47 % -			
	$p < 0,01$ Voies ferrées (tunnel)	0,18 (0,05)	20 %			
	Quai du métro	0,05 (0,05)	5 %	/		
	Cabine de métro	0,02 (0,04)	2 %			
	Couloirs de station/Locaux	Référence	-			

^a Ordonnés (pour chaque métier) selon une distance croissante les séparant aux voies ferrées de haut en bas.

^b Environnement hors enceintes ferroviaires souterraines.

d'autres études ont affiché des concentrations de PUF significativement plus élevées en milieu extérieur [19,39], ou à bord de tramway et de bus [22,35,39], qu'au sein des EFS. Certaines de ces études ont conclu à l'existence d'un lien entre les concentrations de PUF enregistrées au sein des EFS et ceux des PUF présentes en milieu extérieur [19,35,40]. Dans notre étude, les seules mesures réalisées au cours du suivi des agents en extérieur correspondent uniquement aux trajets accomplis par les agents de sécurité (Tableau 1). Ces mesures, réalisées dans des conditions de trafic automobile dense, couvrent moins de 3 % du temps de suivi des agents de sécurité et ne peuvent donc pas servir de comparaison à celles réalisées au sein des EFS.

On note également que les concentrations de PUF n'ont présenté aucune variation significative lors de passages de rames de métro, ou lors de l'ouverture de la porte du guichet de l'agent de station mobile. Aucune étude n'a encore porté sur les variations des concentrations de PUF enregistrées lors du freinage de la rame de métro. En revanche, une étude menée sur le métro à Rome [41] avait montré que les concentrations de PUF ne variaient pas en fonction de la fréquence des rames de métro. Ceci pourrait soutenir l'idée d'une absence d'augmentation significative des concentrations de PUF observée dans notre étude, lors de l'arrêt de la rame de métro.

Il est à noter que notre étude présente la particularité d'avoir été menée selon un protocole original de suivi de l'exposition professionnelle [42]. En effet, aucune étude menée sur la variabilité des concentrations de PUF en EFS n'avait impliqué, à ce jour, un suivi en continu des sujets au cours de leurs activités professionnelles. Outre ce suivi en continu, cette étude a également la particularité d'avoir impliqué plusieurs corps de métiers (agents de sécurité, agents de station, conducteurs de métro) sur une durée relativement longue de 2 semaines.

Concernant les principales limites que présente l'étude, il est important de noter dans un premier temps que celle-ci ne permet pas de hiérarchiser les niveaux auxquels sont exposés les différents corps de métiers. En effet, les agents de station et les conducteurs n'évoluent pas sur la même ligne de métro que les agents de sécurité, il est donc impossible d'établir une comparaison fiable entre leurs niveaux d'exposition respectifs. Notons également que la comparaison des concentrations de PUF auxquels s'exposent les agents de station et les conducteurs ne peut, là encore, être établie du fait que le suivi des conducteurs se soit déroulé sur les deux semaines des vacances scolaires de la Toussaint (diminution de la fréquence des rames de métro de près de 25 %), et suivant des plages horaires différentes pour ces deux corps de métiers (de 11 h 30 à 18 h 30 pour les agents

de stations, et de 6 h 30 à 11 h 30 pour les conducteurs). Par ailleurs, à l'exception d'une étude, réalisée au sein des EFS, montrant des concentrations de PUF stables tout au long de la journée [36], aucune autre étude n'a porté sur l'exploration de la variabilité temporelle des concentrations de PUF. De plus, les concentrations de PUF relevées dans notre étude ne nous autorisent pas à extrapoler, à l'échelle du réseau, les niveaux auxquels est exposé l'ensemble du personnel appartenant à un même corps de métier. En effet, les lignes de métro du réseau RATP se distinguent selon de nombreux paramètres pouvant potentiellement influencer les concentrations de PUF [43] parmi lesquels principalement le matériel roulant ferroviaire [37], le système de freinage [44–46], la topographie [20,21,47] ou encore la qualité de ventilation [34,47–49] de la station. Notons par ailleurs que la ligne au sein de laquelle ont été conduites les mesures des PUF dans le cadre du suivi de l'agent de station mobile et des conducteurs (ligne 7) représente l'une des lignes les plus profondes du réseau ferroviaire, et se caractérise par un matériel ancien roulant sur Fer (type : MF 77) à la différence d'autres lignes composées majoritairement de rames pneumatiques. Cette étude correspond donc au pire cas en ce qui concerne l'exposition.

Enfin, une autre limite de cette étude se situe autour du manque de données accompagnant nos mesures, ce qui ne permet pas d'étayer les caractéristiques des PUF. En effet, l'appareil de mesure utilisé n'a pas permis de caractériser les différentes gammes du diamètre aérodynamique des particules mesurées et leur composition chimique. L'absence de ces données ainsi que celle relative à la forme de ces particules mesurées ne permet pas de mieux cerner les origines et mécanismes de formation des PUF.

Il a été démontré que les particules en forme d'écaillés étaient produites lors des phénomènes d'abrasion ainsi que lors des processus thermiques dus à l'échauffement créé par le freinage mécanique. Les particules en forme sphérique et semi-sphérique étaient, quant à elles, produites par le contact roue-rail [37,50]. Notons par ailleurs, qu'aucune analyse complémentaire n'a porté sur la composition métallique des PUF (Fer, et autres), dont les liens avec le stress oxydant sont avérés [12,51]. Une étude menée sur le métro de Barcelone avait par ailleurs démontré que les particules inhalables (diamètre < 10 µm) mesurées sur les quais de métro étaient majoritairement constituées de particules très riches en Fer et de taille nanométrique [50]. Cette exploration des caractéristiques chimiques des PUF dans le cadre de notre étude aurait pu servir, le cas échéant, à mieux documenter la toxicité potentielle de l'exposition aux PUF, en perspective de futures études épidémiologiques.

Il convient de noter que les rares études ayant mesuré les concentrations de PUF en EFS utilisaient des protocoles d'étude et des appareils de mesure différents. Par conséquent, la comparaison des concentrations des PUF rapportées dans notre étude avec ceux retrouvés dans la bibliographie [52] serait peu pertinente.

Une analyse approfondie de séries temporelles utilisant une approche Bayésienne a été conduite en parallèle sur les mêmes données [53]. Les résultats de cette analyse confirment certains de nos résultats, mais surtout constituent un complément méthodologique intéressant sur ce sujet de recherche.

Enfin, cette étude démontre la faisabilité du suivi de travailleurs en EFS dans le but de quantifier en continu les niveaux de PUF en fonction de leur poste de travail et des tâches réalisées. Réalisée sur deux semaines de suivi individuel de chaque métier, cette étude est la première à caractériser les variations des concentrations des PUF selon les trois principaux métiers dans les EFS.

En dépit des limites évoquées, cette étude permet de formuler quelques recommandations pratiques. Une première recommandation serait de mieux examiner les sources d'émission des PUF, afin de réduire ces émissions, notamment au niveau des freins. Il existe des procédés techniques d'aspiration et de filtration des PUF émis lors du freinage qui pourront être mis en œuvre. En ce qui concerne les stations et les milieux les plus pollués en PUF, l'amélioration de leur ventilation pour réduire le temps de séjour des PUF dans ces milieux peut également être préconisée. Puisque les plateformes ont été identifiées avec des hauts niveaux de PUF, leur séparation des rails grâce à de murs vitrés avec des portes pour entrer dans les voitures, comme sur les lignes de métro automatique (1 et 14), permettant de réduire l'exposition aux PUF. Enfin, la participation de la RATP dans les groupes de travail sur la thématique de la qualité de l'air intérieur et les activités de recherche sur cette thématique doivent être encouragées et soutenues.

Conclusion

Le niveau d'exposition des agents des EFS aux PUF varie selon l'environnement professionnel occupé pour les trois métiers suivis (agents de station, conducteurs de métro, agents de sécurité) avec des concentrations de PUF décroissant à mesure que l'environnement s'éloigne de la voie ferrée. Ces résultats suggèrent l'hypothèse selon laquelle les PUF constituant l'air des EFS proviendraient des sources internes à EFS, qui restent à élucider. L'analyse de séries temporelles des mesures en temps réel des concentrations de PUF, des données contextuelles et de composition des PUF devraient permettre une modélisation plus fine et une meilleure compréhension des déterminants de cette exposition.

Financement

Cette étude est financée par le Fonds national suisse de la recherche (FNS) (Subvention N° IZCOZ0.177067) et l'Agence Nationale de la Recherche et de la Technologie (ANRT), via les Conventions Industrielles de Formation par la Recherche (CIFRE) (Subvention N° 2018/1900).

Déclaration de liens d'intérêts

Les auteurs déclarent ne pas avoir de liens d'intérêts.

References

- [1] Strak M, et al. Respiratory health effects of airborne particulate matter: the role of particle size, composition, and

- oxidative potential—the RAPTES project. *Environ Health Perspect* 2012;120(8):1183–9.
- [2] Wu W, Jin Y, Carlsten C. Inflammatory health effects of indoor and outdoor particulate matter. *J Allergy Clin Immunol* 2018;141(3):833–44.
- [3] Ibaldo-Mulli A, et al. Epidemiological evidence on health effects of ultrafine particles. *J Aerosol Med* 2002;15(2):189–201.
- [4] Kurt OK, Zhang J, Pinkerton KE. Pulmonary health effects of air pollution. *Curr Opin Pulm Med* 2016;22(2):138–43.
- [5] Leikauf GD, Kim SH, Jang AS. Mechanisms of ultrafine particle-induced respiratory health effects. *Exp Mol Med* 2020;52(3):329–37.
- [6] Pope CA, 3rd, et al. Cardiovascular mortality and long-term exposure to particulate air pollution: epidemiological evidence of general pathophysiological pathways of disease. *Circulation* 2004;109(1):71–7.
- [7] Schmid O, et al. Dosimetry and toxicology of inhaled ultrafine particles. *Biomarkers* 2009;14(Suppl 1):67–73.
- [8] Wolf K, et al. Long-term exposure to particulate matter constituents and the incidence of coronary events in 11 European cohorts. *Epidemiology (Cambridge Mass.)* 2015;26(4):565–74.
- [9] Du Y, et al. Air particulate matter and cardiovascular disease: the epidemiological, biomedical and clinical evidence. *J Thorac Dis* 2016;8(1):8–19.
- [10] Bai L, et al. Exposure to ambient ultrafine particles and nitrogen dioxide and incident hypertension and diabetes. *Epidemiology* 2018;29(3):323–32.
- [11] Pearson JF, et al. Association between fine particulate matter and diabetes prevalence in the U.S. *Diabetes care* 2010;33(10):2196–201.
- [12] Loxham M, Nieuwenhuijsen MJ. Health effects of particulate matter air pollution in underground railway systems - a critical review of the evidence. *Part Fibre Toxicol* 2019;16(1):12.
- [13] Crobeddu B, et al. Oxidative potential of particulate matter 2,5 as predictive indicator of cellular stress. *Environ Pollut* 2017;230:125–33.
- [14] Loxham M, et al. Physicochemical characterization of airborne particulate matter at a mainline underground railway station. *Environment Sci Tech* 2013;47(8):3614–22.
- [15] Bao LM, et al. Study on transition metals in airborne particulate matter in Shanghai city's subway. *Huan Jing Ke Xue* 2014;35(6):2052–9.
- [16] Loxham M, et al. The effects on bronchial epithelial mucociliary cultures of coarse, fine, and ultrafine particulate matter from an underground railway station. *Toxicol Sci* 2015;145(1):98–107.
- [17] Perrino C, et al. Particulate matter concentration and chemical composition in the metro system of Rome, Italy. *Environ Sci Pollut Res Int* 2015;22(12):9204–14.
- [18] Martins V, et al. Factors controlling air quality in different European subway systems. *Environ Res* 2016;146:35–46.
- [19] Seaton A, et al. The London Underground: dust and hazards to health. *Occup Environ Med* 2005;62(6):355–62.
- [20] Smith JD, et al. PM_{2.5} on the London Underground. *Environment International* 2020;134:105188.
- [21] Colombi C, et al. Particulate matter concentrations, physical characteristics and elemental composition in the Milan underground transport system. *Atmospheric Environment* 2013;70:166–78.
- [22] Correia C, et al. Particle exposure and inhaled dose while commuting in Lisbon. *Environ Pollut* 2020;257:113547.
- [23] Mao P, et al. Characterization of urban subway microenvironment exposure- a case of Nanjing in China. *Int J Environ Res Public Health* 2019;16(4).
- [24] Kim KY, et al. Spatial distribution of particulate matter (PM₁₀ and PM_{2.5}) in Seoul Metropolitan Subway stations. *J Hazard Mater* 2008;154(1–3):440–3.
- [25] Raut JC, Chazette P, Fortain A. Link between aerosol optical, microphysical and chemical measurements in an underground railway station in Paris. *Atmos Environ* 2009;43(4):860–8.
- [26] Oberdörster G. Pulmonary effects of inhaled ultrafine particles. *Int Arch Occup Environ Health* 2000;74(1):1–8.
- [27] Kreyling WG, et al. Air-blood barrier translocation of tracheally instilled gold nanoparticles inversely depends on particle size. *ACS Nano* 2014;8(1):222–33.
- [28] Miller MR, et al. Inhaled nanoparticles accumulate at sites of vascular disease. *ACS Nano* 2017;11(5):4542–52.
- [29] Oberdörster G, et al. Extrapulmonary translocation of ultrafine carbon particles following whole-body inhalation exposure of rats. *J Toxicol Environ Health A* 2002;65(20):1531–43.
- [30] Sundh J, et al. Wear rate testing in relation to airborne particles generated in a wheel–rail contact. *Lubrication Science* 2009;21:135–50.
- [31] Namgung H-G, et al. Generation of Nanoparticles from Friction between Railway Brake Disks and Pads. *Environ Sci Technol* 2016;50(7):3453–61.
- [32] Grana M, et al. Exposure to ultrafine particles in different transport modes in the city of Rome. *Environ Pollut* 2017;228:201–10.
- [33] Posselt K-P, Neuberger M, Köhler D. Fine and ultrafine particle exposure during commuting by subway in Vienna. *Wiener klinische Wochenschrift* 2019;131(15–16):374–80.
- [34] Moreno T, et al. The effect of ventilation protocols on airborne particulate matter in subway systems. *Sci Total Environ* 2017;584(585):1317–23.
- [35] Strasser G, Hiebaum S, Neuberger M. Commuter exposure to fine and ultrafine particulate matter in Vienna. *Wiener klinische Wochenschrift* 2018;130(1–2):62–9.
- [36] Midander K, et al. Characterisation of nano- and micron-sized airborne and collected subway particles, a multi-analytical approach. *Sci Total Environ* 2012;428:390–400.
- [37] Abbasi S, et al. Particle emissions from rail traffic: a literature review. *Crit Rev Environ Sci Technol* 2013;43(23):2511–44.
- [38] Brines M, et al. Traffic and nucleation events as main sources of ultrafine particles in high-insolation developed world cities. *Atmospheric Chem Phys* 2015;15:5929–45.
- [39] Moreno T, et al. Urban air quality comparison for bus, tram, subway and pedestrian commutes in Barcelona. *Environ Res* 2015;142:495–510.
- [40] Reche C, et al. Factors controlling particle number concentration and size at metro stations. *Atmos Environ* 2017;156:169–81.
- [41] Mendes L, et al. Airborne ultrafine particles in a naturally ventilated metro station: dominant sources and mixing state determined by particle size distribution and volatility measurements. *Environ Pollut* 2018;239:82–94.
- [42] Guseva Canu I, et al. Respiratory Disease occupational biomonitoring collaborative project (ROBoCoP): a longitudinal pilot study and implementation research in the Parisian transport company. *J Occup Med Toxicol* 2021;16(1):22.
- [43] Knibbs LD, Cole-Hunter T, Morawska L. A review of commuter exposure to ultrafine particles and its health effects. *Atmos Environ* 2011;45(16):2611–22.
- [44] Sitzmann B, et al. Characterisation of airborne particles in London by computer-controlled scanning electron microscopy. *Sci Total Environ* 1999;241(1):63–73.
- [45] Querol X, et al. Variability of levels and composition of PM₁₀ and PM_{2.5} in the Barcelona metro system. *Atmos Chem Phys* 2012;12(11):5055–76.
- [46] Mingullón MC, et al. Aerosol sources in subway environments. *Environ Res* 2018;167:314–28.
- [47] Martins V, et al. Factors controlling air quality in different European subway systems. *Environ Res* 2016;146:35–46.

- [48] Cha Y, et al. Factors affecting the exposure of passengers, service staff and train drivers inside trains to airborne particles. *Environ Res* 2018;166:16–24.
- [49] Wen Y, et al. Environmental and Health Effects of Ventilation in Subway Stations: A Literature Review. *Int J Environ Res Public Health* 2020;17(3):1084.
- [50] Martins V, et al. Exposure to airborne particulate matter in the subway system. *Sci Total Environ* 2015;511:711–22.
- [51] van Klaveren RJ, Nemery B. Role of reactive oxygen species in occupational and environmental obstructive pulmonary diseases. *Curr Opin Pulm Med* 1999;5(2):118–23.
- [52] Viitanen AK, et al. Workplace measurements of ultrafine particles-a literature review. *Ann Work Expo Health* 2017;61(7):749–58.
- [53] Pétremand R, et al. Application of the Bayesian spline method to analyze real-time measurements of ultrafine particle concentration in the Parisian subway. *Environ Int* 2021;156:106773.