



HAL
open science

Une analyse des variations spatio-temporelles de l'exposition individuelle à la pollution de l'air en Île-de-France à partir de micro-capteurs

Nabil Touili, Katia Radja, Patrick Schembri, Ahmad Ktaish, Karine Zeitouni, Basile Chaix, Isabella Annesi-Maesano, Boris Dessimond, Jean-Marc Naude, Salim Srairi, et al.

► To cite this version:

Nabil Touili, Katia Radja, Patrick Schembri, Ahmad Ktaish, Karine Zeitouni, et al.. Une analyse des variations spatio-temporelles de l'exposition individuelle à la pollution de l'air en Île-de-France à partir de micro-capteurs. *Cybergeo : Revue européenne de géographie / European journal of geography*, 2022, pp.1-36. 10.4000/cybergeo.39074 . hal-03708067

HAL Id: hal-03708067

<https://hal.inrae.fr/hal-03708067v1>

Submitted on 9 Mar 2023

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



Une analyse des variations spatio-temporelles de l'exposition individuelle à la pollution de l'air en Île-de-France à partir de micro-capteurs

Analysis of spatio-temporal variations in individual exposure to air pollution in the Paris region using micro-sensors

Análisis de las variaciones espacio-temporales de la exposición individual a contaminantes del aire en Île-de-France a partir del uso de micro captores

Nabil Touili, Katia Radja, Patrick Schembri, Ahmad Ktaish, Karine Zeitouni, Basile Chaix, Isabella Annesi-Maesano, Boris Dessimond, Jean-Marc Naude, Salim Srairi et Hafsa El-hafyani



Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/cybergeog/39074>

DOI : [10.4000/cybergeog.39074](https://doi.org/10.4000/cybergeog.39074)

ISSN : 1278-3366

Éditeur

UMR 8504 Géographie-cités

Ce document vous est offert par Sorbonne Université



Référence électronique

Nabil Touili, Katia Radja, Patrick Schembri, Ahmad Ktaish, Karine Zeitouni, Basile Chaix, Isabella Annesi-Maesano, Boris Dessimond, Jean-Marc Naude, Salim Srairi et Hafsa El-hafyani, « Une analyse des variations spatio-temporelles de l'exposition individuelle à la pollution de l'air en Île-de-France à partir de micro-capteurs », *Cybergeog: European Journal of Geography* [En ligne], Aménagement, Urbanisme, document 1019, mis en ligne le 24 juin 2022, consulté le 06 mars 2023. URL : <http://journals.openedition.org/cybergeog/39074> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/cybergeog.39074>

Ce document a été généré automatiquement le 16 février 2023.



Creative Commons - Attribution 4.0 International - CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Une analyse des variations spatio-temporelles de l'exposition individuelle à la pollution de l'air en Île-de-France à partir de micro-capteurs

Analysis of spatio-temporal variations in individual exposure to air pollution in the Paris region using micro-sensors

Análisis de las variaciones espacio-temporales de la exposición individual a contaminantes del aire en Île-de-France a partir del uso de micro captors

Nabil Touili, Katia Radja, Patrick Schembri, Ahmad Ktaish, Karine Zeitouni, Basile Chaix, Isabella Annesi-Maesano, Boris Dessimond, Jean-Marc Naude, Salim Srairi et Hafsa El-hafyani

Ce travail a été réalisé dans le cadre de l'Initiative de Recherche Stratégique (IRS) ACE-ICSEN financée par l'Université Paris-Saclay. Outre les co-auteurs impliqués dans Polluscope, nous tenons à remercier les membres du projet, notamment les équipes d'Airparif et du LSCE. Les auteurs tiennent à remercier les participants volontaires aux cohortes et les personnes interrogées au niveau de la mairie de Paris et des établissements de l'ORS, SPSE, ADEME, DGEC, APPA, APUR et CERIA-ENPC.

Introduction

- 1 La surveillance et la mesure de la qualité de l'air constituent un enjeu actuel majeur pour les politiques urbaines visant à lutter contre les pollutions atmosphériques et à mettre en œuvre des actions d'adaptation. En effet, la pollution de l'air est considérée comme le principal risque environnemental affectant la santé humaine (Landrigan *et al.*, 2019). En 2016, une étude sur la pollution de l'air réalisée par Santé Publique France

a conduit à la considérer comme la troisième cause de mortalité en France¹. Ce constat est d'autant plus marqué au niveau des grandes métropoles. À l'échelle de la région Île-de-France, qui concentre 19 % de la population française sur 2,2 % du territoire métropolitain (INSEE², 2017), on estime que la pollution atmosphérique a été responsable de plus de 5 000 morts prématurées en 2015 (DRIEE, 2018).

- 2 Les effets sanitaires de la pollution atmosphérique urbaine sont bien admis (Gibelin, 2019). Néanmoins, la pollution de l'air reste un phénomène complexe à appréhender. La pollution de l'air est un concept "umbrella" sous lequel se combinent pollutions intérieure et extérieure (Dias, Tchepel, 2018). Issue d'un mélange complexe d'éléments³ en constante évolution (Geny *et al.*, 2019), la qualité de l'air concerne une multitude de secteurs, notamment les transports, l'énergie, la gestion des déchets, l'agriculture, le logement et l'industrie. Ainsi, la surveillance de la qualité de l'air constitue-t-elle un outil fondamental de vigilance et d'orientation des actions et des politiques en zones urbaines.
- 3 La surveillance de la pollution de l'air ambiant repose traditionnellement sur le déploiement de systèmes de modélisation et de capteurs fixes dans les villes. Bien qu'il faille noter des avancées en la matière, certaines données disponibles résultent toutefois d'une surveillance généralement à faible résolution (Motlagh *et al.*, 2020). Par ailleurs, la qualité de l'air se révèle variable selon les contextes spatio-temporels et sur des échelles intra-urbaines particulièrement fines (Vardoulakis *et al.*, 2005 ; Quénoel *et al.*, 2006 ; Maignant, 2007). Les mesures disponibles ne couvrent pas totalement l'ensemble des lieux et des activités pouvant contribuer à enrichir les données sur l'exposition individuelle (Van Roosbroeck *et al.*, 2008). Plusieurs études démontrent que l'exposition individuelle, notamment à des polluants à forte variabilité spatio-temporelle tels que les particules fines, est souvent mal caractérisée voire sous-estimée (Grange, Host, 2012 ; Ryan *et al.*, 2015 ; Pant *et al.*, 2017 ; Valari *et al.*, 2017 ; Apparicio *et al.*, 2019 ; Tran *et al.*, 2021). Certains paramètres associés aux lieux entrent en jeu quant à l'analyse des expositions individuelles. Il s'agit notamment des sources polluantes, de la nature des activités qui sont menées tout au long de la journée (Ryan *et al.*, 2015). Ce constat paraît d'autant plus significatif dans les grandes villes où l'exposition individuelle varie avec la multiplicité des sources polluantes et la diversité des facteurs de dispersion des polluants (Moltchanov *et al.*, 2015). La contribution relative de chaque source de pollution peut alors varier dans l'espace, dans le temps et suivant des facteurs météorologiques tels que l'humidité, la température ou la vitesse des vents (Bulot *et al.*, 2019). Même si la combinaison entre les données de surveillance fixe et de modèles spatiaux constitue une avancée pour mieux estimer les expositions en temps réel, certaines expositions ponctuelles et brèves, caractérisées par de forts pics de concentration, peuvent passer inaperçues.
- 4 La présente recherche aborde les questions de l'exposition à la pollution de l'air en zones urbaines compte-tenu des lieux fréquentés et des comportements individuels. Ce travail repose sur les travaux menés dans le projet ANR Polluscope⁴, dont l'objectif est d'estimer et d'analyser l'exposition à la pollution de l'air ainsi que ses effets sanitaires, à l'aide de micro-capteurs individuels mesurant les concentrations de plusieurs polluants atmosphériques (Languille *et al.*, 2020). Plusieurs études ont abordé spécifiquement la question de l'exposition individuelle à la pollution de l'air intérieur (Curto *et al.*, 2018) et extérieur (Chen *et al.*, 2016 ; Apparicio *et al.*, 2019), à l'aide de la technologie émergente des micro-capteurs. De même, un nombre croissant de projets

en lien avec les problématiques environnementales et la qualité de l'air ont vu le jour en France et en Europe ces dernières années (Mobicit'Air, CitizenSense, Luftdaten, Ambassad'air, AirCasting), dans le cadre d'approches participatives visant le partage et la production de connaissances par les citoyens (Saïdi *et al.*, 2017). À ce titre, l'avancée technologique est un moyen d'initier une forme de veille ou de surveillance de la qualité de l'air par le citoyen, à l'image du "*citizen-based monitoring*" dans le cadre des approches dites "*Do-It-Yourself*" (Pritchard *et al.*, 2018). Ces approches sollicitent des participants volontaires aux projets, qui réalisent des mesures par eux-mêmes en suivant un protocole bien défini (LCSQA, 2019).

- 5 L'objectif de cet article est d'affiner les connaissances actuelles autour de l'exposition à ces polluants, en identifiant qui est exposé à quoi ? Quand ? Où ? En faisant quoi ? Pendant combien de temps ? Les données quantitatives utilisées sont issues de deux campagnes menées dans Polluscope, auprès de deux cohortes distinctes d'individus ayant porté les micro-capteurs en Île-de-France. Les données des micro-capteurs permettent d'estimer la concentration en polluants réglementaires $PM_{2.5}$, NO_2 et Black Carbon (BC) dans divers lieux appelés microenvironnements. Les $PM_{2.5}$ et les NO_2 sont des polluants majeurs qui font l'objet d'une surveillance au regard des objectifs de qualité de l'air. À l'échelle de la région Île-de-France, les particules fines et les NO_2 , majoritairement émis par le trafic routier, sont concernés par des dépassements des valeurs réglementaires contraignantes (Joly *et al.*, 2015). Depuis 2015, le BC fait désormais l'objet d'un suivi par Airparif (association agréée de surveillance de la qualité de l'air en Île-de-France) comme traceur, afin d'améliorer la connaissance sur la composition chimique des particules ainsi que la part locale des particules attribuée au trafic routier (Airparif, 2020).
- 6 En s'appuyant sur les données issues des micro-capteurs, les variations spatio-temporelles de l'exposition individuelle sont analysées en fonction de plusieurs microenvironnements⁵, d'activités et d'événements divers, en tenant compte de la durée d'exposition individuelle à chacun des polluants atmosphériques mesurés. De surcroît, des enquêtes qualitatives via des entretiens ont été réalisées ; d'une part, auprès de participants volontaires issus des cohortes et, d'autre part, auprès d'acteurs institutionnels impliqués dans la gestion de la qualité de l'air. En France, la question de la qualité de l'air est intégrée dans les plans urbains d'aménagement et de transport (Roussel, 2014). Avec la dispersion des lieux d'habitat et d'autres zones d'activités, les déplacements quotidiens génèrent une part importante de la pollution de l'air (Kaufmann, 2008 ; Glandus, Beltrando, 2013).
- 7 Dans un premier temps, les modalités de collecte des données quantitatives sont présentées, lesquelles reposent sur les caractéristiques de l'équipement "micro-capteur" déployé. Pour le recueil de données qualitatives, le profil des acteurs institutionnels interrogés est précisé. Le second temps de l'article est consacré à l'analyse des données collectées, mettant l'accent sur la disparité des situations en matière de concentration au regard des microenvironnements fréquentés et des polluants considérés. Enfin, une synthèse de l'ensemble des résultats, pour les deux cohortes et selon la nature des polluants, met en évidence l'importance de certains microenvironnements.

Matériel et méthode

- 8 La collecte de données individualisées et géolocalisées est réalisée par des micro-capteurs portatifs. Elle a été enrichie par la prise en compte du contexte des mesures, (appelé ici microenvironnement). Ces données quantitatives ont été complétées par des entretiens auprès de participants aux deux enquêtes et auprès des acteurs institutionnels impliqués dans la gestion de la pollution de l'air en Île-de-France.

Des micro-capteurs individuels

- 9 Les micro-capteurs utilisés pour la collecte des données quantitatives sont identiques, géo-localisés et embarqués par un total de 88 participants. Ces participants volontaires sont issus de la cohorte RECORD (Residential Environment and CORonary heart Disease) et de la cohorte VGP (Versailles Grand Parc). Les données relèvent de deux périodes distinctes (tableau 1). Plus précisément, 25 participants de la cohorte RECORD et 63 participants de la cohorte VGP ont porté des micro-capteurs identiques en continu durant 7 jours sur deux saisons différentes de l'année 2019. Il s'agit de la saison d'été (juin-septembre) pour la cohorte RECORD et de la saison automne-hiver (octobre-décembre) pour celle de VGP. En plus de cette dimension temporelle, la répartition spatiale, notamment au regard du lieu de domicile, distingue les deux cohortes. La cohorte RECORD est principalement concentrée sur Paris et sa petite couronne tandis que la cohorte VGP s'étale sur la Communauté d'agglomération de Versailles Grand Parc⁶, en grande banlieue avec une partie importante localisée à Versailles (figure 1). Les données quantitatives issues des deux cohortes sont présentées séparément dans la suite de l'article en raison de ces deux distinctions susceptibles d'impacter le phénomène de pollution et nos résultats d'analyse concernant l'exposition aux polluants étudiés.

Tableau 1 : Caractéristiques générales des deux cohortes VGP et RECORD étudiées

	Nombre de participants	Campagnes de mesure	Durée effective du port des micro-capteurs	Marque et références de l'équipement utilisé	Polluants mesurés
Cohorte VGP	15	Octobre 2019	7 jours	Canarin pour les PM, Cairsens pour le NO2 et AE51 pour le BC	PM1, PM2.5, PM10, NO2, BC
	12	Du 30 octobre au 8 novembre 2019			
	09	Du 13 au 23 novembre 2019			
	15	Du 28 novembre au 10 décembre 2019			

	12	Du 10 au 18 décembre 2019		
Cohorte RECORD	25	Juin-Septembre 2019	7 jours	

Touili, 2021

Figure 1 : Aperçu de la répartition spatiale en Île-de-France des participants aux deux cohortes



El-hafyani, Touili, 2021

- 10 Pour la collecte de données, un kit composé de micro-capteurs (figure 2) et d'une tablette a été embarqué dans un sac à dos porté⁷ par les participants aux cohortes. Les micro-capteurs déployés fonctionnent avec un pas de temps d'une minute. Quinze kits ont été préparés pour un déploiement par rotation en plusieurs vagues d'une semaine chacune, séparées d'une semaine de vérification et de remise en état par l'équipe en charge des campagnes Polluscope. Ainsi, la collecte s'est-elle étalée sur dix à douze semaines pour chacune des cohortes.
- 11 Les micro-capteurs ont permis d'estimer en temps réel les expositions aux polluants NO_2 , $\text{PM}_{2.5}$ et Black Carbon (BC). La tablette dotée d'un GPS permet aux participants de noter sur une application mobile les microenvironnements fréquentés, les modes de déplacement, les activités réalisées et d'autres événements divers. Les relevés des mesures obtenus donnent lieu à des cartographies spatio-temporelles de l'exposition individuelle aux polluants concernés. Le protocole comportait la collecte du budget espace-temps⁸ via l'application mobile. Plus précisément, le participant indique tout changement de microenvironnement en sélectionnant le nouveau parmi plusieurs catégories de lieux fréquentés, (domicile, travail, transport, autres), de moyens de déplacement (voiture, métro, train, tramway, bus, moto, vélo, marche à pied), mais aussi entre diverses activités réalisées (sport, repos, balade, promenade de chien, restauration, cinéma, faire les magasins, etc.). De surcroît, cette application mobile

permet aux porteurs de micro-capteurs de sélectionner certains événements ou activités pouvant impacter les concentrations (cuisiner, ouvrir ou fermer une fenêtre, allumer la cheminée, fumer, se balader, etc.).

Figure 2 : Dispositif des micro-capteurs déployés pour le recueil de données dans les cohortes VGP et RECORD (Polluscope)



Zeitouni, Touili, 2021

- 12 L'usage et le déploiement des micro-capteurs ont fait l'objet de plusieurs études concernant diverses problématiques : l'exposition individuelle à plusieurs polluants dans le cadre des déplacements urbains (Park, 2020), l'exposition des enfants aux particules fines et au NO₂ durant le trajet école-maison (Gilliland *et al.*, 2019 ; Van Roosbroeck *et al.*, 2008), la mesure de la pollution intérieure et extérieure au Black Carbon, ainsi que celle relative à l'exposition aux PM_{2,5} et au CO en intérieur (Motlagh *et al.*, 2020 ; Chen *et al.*, 2016). De surcroît, l'usage et le déploiement des micro-capteurs ont donné lieu à plusieurs projets de recueil collaboratif de données ou "crowd sensing" (Schneider *et al.*, 2016), dans le but de développer la sensibilisation des acteurs aux problématiques environnementales et d'impulser des actions en matière de politiques publiques (Saïdi *et al.*, 2017).
- 13 Il convient de signaler que les mesures enregistrées par les micro-capteurs ont essentiellement une vocation indicative et une fiabilité relative eu égard aux mesures provenant des stations fixes de référence. Toutefois, ces équipements mobiles et géolocalisés sont un atout permettant de mieux caractériser l'exposition des citoyens aux polluants urbains réglementés sur des espaces très localisés et à un instant donné. L'analyse de la performance des micro-capteurs a fait l'objet de plusieurs travaux (Bulot *et al.*, 2019 ; Gabrys, 2019), qui ont été fort utiles quant au choix des micro-capteurs dans Polluscope⁹ (Languille *et al.*, 2020). Ces évaluations minutieuses reposent notamment sur la comparaison entre les mesures issues des stations de référence et celles des micro-capteurs pour refléter la reproductibilité, en tenant compte de la diversité des conditions météorologiques et de mobilité. Une fois les micro-capteurs qualifiés, les tests de requalification sont réalisés avant chaque campagne en suivant le même protocole.

Mesures quantitatives et entretiens qualitatifs

- 14 Dans ce travail, les données directement recueillies par les micro-capteurs ont subi un pré-traitement. Ces premières données, brutes, peuvent contenir certaines valeurs manquantes et/ou parfois des données aberrantes. Les données analysées dans ce travail sont celles issues d'une phase de prétraitement et d'imputation de valeurs

manquantes grâce à des algorithmes spécifiques fondés sur l'intelligence artificielle (El Hafyani *et al.*, 2020 ; Abboud *et al.*, 2021). Les valeurs manquantes représentent 10 % des données collectées pour les deux cohortes. Ces valeurs manquantes sont dues à un épuisement de la batterie, une perte de signalisation GPS ou un défaut de transmission des données des mesures des micro-capteurs. Au-delà d'un certain seuil (10mn dans notre cas), l'estimation s'avère peu fiable et donc les données en questions n'ont pas été considérées. Pour l'imputation des segments courts de valeurs manquantes, une solution hybride a été développée, combinant l'interpolation linéaire pour des données manquantes sporadiques et la prédiction par le modèle ARIMA (*autoregressive integrated moving average*). Quant aux données aberrantes, leur nombre fut négligeable dans ce travail. Les données relatives aux annotations des microenvironnements par les participants ont, elles aussi, été revisitées en cas d'incohérences ou d'absence de données.

- 15 Par ailleurs, des données qualitatives viennent compléter les principales données issues des micro-capteurs. Une séquence d'entretiens semi directifs a été réalisée auprès de huit participants aux cohortes et de dix acteurs institutionnels (représentant différentes échelles, que ce soit celle de l'État, de la région Île-de-France et de la ville de Paris), impliqués dans la gestion de la pollution urbaine (tableau 2). Ces entretiens ont permis la collecte des données autour de la perception individuelle vis-à-vis des causes et des enjeux de la pollution de l'air, des déplacements quotidiens, de l'information sur la qualité de l'air et des pratiques actuelles/envisagées face à la pollution de l'air. Le corpus de données constitué par ces entretiens a permis d'atteindre un double objectif. Le premier consiste à obtenir des retours d'expérience des participants aux cohortes sur leurs propres données d'exposition, ainsi que sur les options envisagées quant aux changements de comportement. Le second objectif vise à identifier les outils mis en place dans le cadre des politiques urbaines de lutte contre la pollution de l'air. Tous nos entretiens ont été enregistrés, avec l'accord des personnes interrogées, puis transcrits verbatim, anonymement, avant d'être analysés par codage thématique. Les discours de ces personnes ont été isolés suivant nos axes thématiques susmentionnés. Des extraits significatifs de ces discours figurent dans cet article pour illustrer les données quantitatives.

Tableau 2 : Profil des personnes interrogées

	Organismes régionaux de gestion	Structures non gouvernementales	Chercheurs Scientifiques /	Participants volontaires
Profils des personnes interrogées	Mairie de la ville de Paris	APPA (Association pour la Prévention de la Pollution Atmosphérique)	APUR (Atelier Parisien d'Urbanisme)	Participants volontaires aux cohortes RECORD et VGP
	ORS (Observatoire Régional de Santé)			
	SPSE (Service Parisien de Santé Environnementale)			
	Airparif			

Métropole du Grand Paris	
ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie)	CEREA (Centre d'Enseignement et de Recherche en Environnement Atmosphérique)
DGEC (Direction générale de l'énergie et du climat du Ministère de la transition écologique et solidaire)	

Touili, 2021

- 16 Dans ce qui suit, les données quantitatives ou les relevés des micro-capteurs font référence aux données prétraitées et alignées avec le budget espace-temps. Les données qualitatives sont issues des entretiens semi-directifs avec les participants aux cohortes et les acteurs institutionnels.

Résultats

- 17 À partir des données quantitatives issues des relevés des micro-capteurs, il a été possible d'estimer, pour chaque cohorte, l'exposition des participants à la pollution selon les différents microenvironnements fréquentés. Plus précisément, nous avons pu mesurer quotidiennement les niveaux de concentration des polluants atmosphériques auxquels chaque participant a été soumis au domicile, au travail, dans les transports ou dans d'autres lieux. La durée d'exposition à chaque polluant, la distance des trajets, les modes de transport/locomotion (véhicule individuel, bus, train, vélo, etc.), ainsi que les événements associés à certaines activités effectuées sont également spécifiés.
- 18 L'analyse des résultats obtenus permet d'éclairer un certain nombre de questions : l'exposition par microenvironnements, les déplacements quotidiens, le domicile et les événements, l'exposition durant les jours de la semaine versus le week-end. Des extraits des discours des personnes interrogées sont associés à certains de nos résultats issus des données des micro-capteurs.

Exposition et microenvironnements

Budget espace-temps selon les microenvironnements

- 19 Tout au long d'une journée, les individus fréquentent des microenvironnements différents et peuvent ainsi être exposés à des concentrations variables de polluants. Pour une meilleure analyse de l'exposition, il est nécessaire d'identifier et de caractériser avec précision les espaces quotidiens fréquentés par les individus. Il s'agit notamment du domicile (zone d'habitat), du lieu de travail (zone de travail), mais également des transports par référence aux moyens de déplacement, et d'autres lieux.

- 20 Pour un participant donné, le budget espace-temps renvoie à la manière dont le temps est réparti entre les différents microenvironnements. Défini à l'échelle de chaque cohorte, ce dernier est calculé d'après la moyenne des pourcentages de temps passé par chaque participant de la cohorte dans chacun des lieux recensés. Le tableau 3 présente un résumé statistique relatif au budget espace-temps par microenvironnement pour chacune des cohortes.

Tableau 3 : Résumé statistique pour les budgets espace-temps par microenvironnements pour chacune des deux cohortes

VGP	Min	Max	Moyenne	Médiane	Ecart-type	Coefficient de variation
Domicile	39,30 %	84,20 %	68,70 %	69,00 %	8,90 %	12,95 %
Transport	0,60 %	9,90 %	4,10 %	4,00 %	2,40 %	58,54 %
Travail	7,90 %	45,20 %	22,30 %	22,20 %	6,30 %	28,25 %
Autres	0,10 %	18,10 %	5,20 %	3,70 %	4,40 %	84,62 %

RECORD	Min	Max	Moyenne	Médiane	Ecart-type	Coefficient de variation
Domicile	0,0 %	85,8 %	56,4 %	58,2 %	18,7 %	33,16 %
Transport	1,6 %	27,9 %	7,5 %	5,2 %	6,4 %	85,33 %
Travail	2,2 %	39,0 %	22,7 %	22,8 %	10,7 %	47,14 %
Autres	1,3 %	84,5 %	16,1 %	7,7 %	20,6 %	127,95 %

Note : le coefficient de variation, issu du rapport de l'écart-type à la moyenne, est exprimé en pourcentage.

El-hafyani, Ktaish, Zeitouni, Schembri, 2022

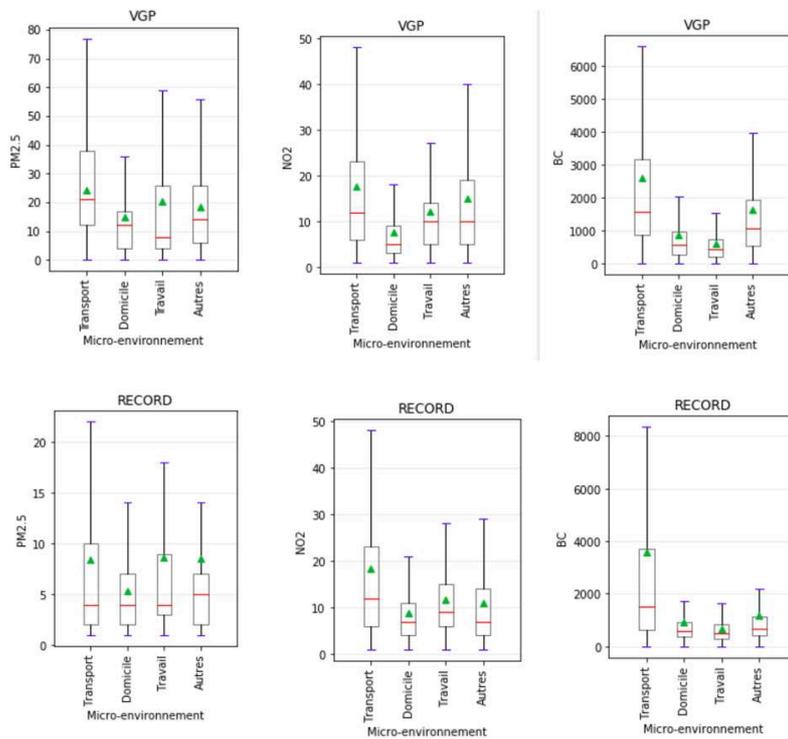
- 21 Le tableau 3 indique des différences entre les deux cohortes pour les valeurs extrêmes. Lorsque l'ensemble des valeurs est pris en considération, le calcul des valeurs moyennes et médianes montre que les ordres de grandeur entre les deux cohortes demeurent relativement proches pour le domicile et le travail. En revanche, pour le transport et les autres lieux, ces valeurs sont plus élevées pour la cohorte RECORD. En termes de dispersion des valeurs autour de la moyenne, des écart-types plus élevés pour la cohorte RECORD traduisent une plus forte hétérogénéité que pour la cohorte VGP. Le calcul des coefficients de variation pour chaque cohorte permet d'affiner la mesure de la dispersion relative et de procéder à des comparaisons entre microenvironnements et entre cohortes. À cet égard, pour chacune des cohortes, les coefficients de variation les plus élevés concernent les microenvironnements "transport" et "autres", avec des valeurs particulièrement élevées pour la cohorte RECORD. Cela témoigne d'une dispersion plus grande entre les participants quant au temps moyen passé dans ces lieux. De surcroît, concernant le microenvironnement "autres", la médiane demeure bien inférieure à la moyenne pour chacune des deux cohortes, (elle est inférieure de près de 50 % dans RECORD et de 30 % dans VGP). On

observe pareille situation pour le microenvironnement "transport" dans la seule cohorte VGP, (où la médiane est 30 % plus faible). Ces observations indiquent une dissymétrie plus ou moins marquée de la distribution des budget-temps par participant. Elles incitent donc à la prudence quant à l'interprétation des valeurs moyennes pour ces microenvironnements.

Les concentrations peuvent varier sensiblement selon les microenvironnements

- 22 La figure 3 représente des diagrammes en boîte regroupant les concentrations en PM_{2,5}, NO₂ et BC par microenvironnement, à partir des relevés de mesure des micro-capteurs portés par les participants issus respectivement des cohortes VGP et RECORD. Il est alors possible d'interpréter la tendance centrale, la dispersion et l'asymétrie des données obtenues.

Figure 3 : Concentrations des polluants en fonction des microenvironnements



Ktaish, Zeitouni, 2021

- 23 Pour un polluant donné, les valeurs moyennes des concentrations diffèrent selon les microenvironnements fréquentés (transport ; domicile ; travail ; autres). Les données des micro-capteurs issues de la cohorte VGP montrent, pour le PM_{2,5}, des valeurs moyennes différentes selon les microenvironnements : 24,1 µg/m³ dans les transports, 15,1 µg/m³ au domicile, 20,5 µg/m³ et 18,4 µg/m³ respectivement au travail et dans d'autres lieux. Concernant la cohorte RECORD, le polluant PM_{2,5} enregistre des valeurs moyennes de concentration relativement plus faibles que celles de VGP (5,3 µg/m³ au domicile et 8,4 µg/m³ dans les transports). Pour le NO₂, nous pouvons constater des valeurs moyennes de concentration assez proches dans les deux cohortes. Pour la cohorte VGP, les moyennes se situent entre 12 et 17 µg/m³ au travail, dans les autres

lieux et dans les transports ; dans la cohorte RECORD, elles se situent dans le même ordre de grandeur, entre 11 et 18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En revanche, elles diminuent significativement au domicile pour VGP avec 7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, et 8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ au sein de RECORD. Par ailleurs, pour les deux cohortes, nous observons que la concentration moyenne en NO_2 est relativement plus élevée dans le microenvironnement "transport" comparativement aux autres microenvironnements. Pour le BC, les différences en termes de concentrations moyennes selon les microenvironnements sont plus significatives que pour les $\text{PM}_{2,5}$. Ainsi, pour la cohorte RECORD, les concentrations moyennes s'élèvent-elles à hauteur 684 p/m^3 au travail et 913 p/m^3 au domicile, tandis qu'elles atteignent 3 603 p/m^3 dans les transports. Ce même constat est valable pour la cohorte VGP, (584 p/m^3 au travail, 883 p/m^3 au domicile contre 2 589 p/m^3 dans les transports). Désormais, les intervalles interquartiles sont plus grands dans le microenvironnement "transport" peu importe la cohorte et le polluant considérés.

- 24 L'analyse de l'exposition en matière de concentration moyenne par microenvironnement montre une diversité des situations selon la nature du polluant. Pour les polluants $\text{PM}_{2,5}$ et NO_2 , les mesures de concentration les plus faibles sont observées dans le microenvironnement "domicile". Pour le NO_2 et le BC, le microenvironnement "transport" révèle des mesures de concentration plus élevées comparativement aux autres microenvironnements recensés.

Une dispersion relative des concentrations à l'intérieur de chaque microenvironnement

- 25 La figure 3 montre également que les concentrations paraissent plus homogènes au domicile et au travail, (à l'exception des mesures relatives au $\text{PM}_{2,5}$). Ceci est indiqué par le (dé)centrage de la valeur médiane, qui est plus prononcé dans les transports et autres lieux que dans le domicile et le travail. Par ailleurs, tous microenvironnements confondus, on note des distributions plus allongées vers les grandes valeurs et des concentrations médianes inférieures aux moyennes. Les valeurs moyennes des concentrations sont sensiblement différentes des valeurs médianes. Ces distributions asymétriques indiquent que les participants ont été exposés à des valeurs assez variables à l'intérieur de chaque microenvironnement et entre les microenvironnements (figure 3 et tableau 3).
- 26 Les plus fortes disparités entre les deux cohortes sont enregistrées au niveau des transports. Les valeurs de concentration en $\text{PM}_{2,5}$ varient de 0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à près de 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour une médiane de 21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ au sein de la cohorte VGP, et de 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à 23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour une médiane de 4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ au sein de RECORD. Pour le BC, les concentrations enregistrées varient de 0 à 8 200 p/m^3 et de 0 à 6 800 p/m^3 respectivement dans VGP et RECORD, et ce pour une médiane proche de 1500 p/m^3 . En revanche, les valeurs moyennes de concentration en NO_2 sont assez proches dans les deux cohortes, tout en variant de 1 à 48 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ selon la cohorte, pour une valeur médiane identique à hauteur de 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Ces constats sont confortés par le tableau 4 ci-dessous.
- 27 Les deux échantillons étant différents, le tableau 4 présente les mesures des écarts-types pour chacune des cohortes, ainsi que les coefficients de variation¹⁰ (exprimés en pourcentage) afin de rendre compte de la dispersion relative des deux échantillons. Cet indicateur révèle une utilité certaine lorsqu'il s'agit de comparer la dispersion des valeurs pour des variables quantitatives associées à des échantillons distincts.

Tableau 4 : Mesures des écarts-types de concentration (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) et des coefficients de variation (%) selon les polluants étudiés, les microenvironnements et les cohortes

Cohorte	PM _{2,5}		NO ₂		BC	
	Record	VGP	Record	VGP	Record	VGP
Transport	12,0	17,3	20,4	18,4	8 461,4	3 450,8
	150 %	70 %	90 %	100 %	230 %	130 %
Domicile	7,1	18,1	8,3	9,8	3 546,9	4 070,0
	133 %	362 %	90 %	120 %	380 %	460 %
Travail	14,9	26,7	8,8	12,2	3 535,4	1 270,1
	180 %	130 %	73 %	100 %	580 %	210 %
Autres	16,3	15,2	12,8	15,8	5 896,7	4 337,3
	200 %	80 %	120 %	100 %	580 %	220 %

El-hafyani, Ktaish, Zeitouni, Schembri, 2022

- 28 En s'appuyant sur les coefficients de variation, tous microenvironnements confondus, la dispersion des mesures de concentration est plus prononcée pour le BC, les PM_{2,5}, relativement au NO₂ à l'échelle de l'ensemble des participants aux deux cohortes. Une lecture comparative entre les deux cohortes montre que les individus de la cohorte RECORD, comparativement à ceux de la cohorte VGP, ont été exposés à une variabilité plus élevée des valeurs en termes de concentration en PM_{2,5} et en BC sur leur lieu de travail, lors de leurs déplacements quotidiens et dans d'autres lieux. Cette forte dispersion relative peut s'expliquer par la diversité spatiale des lieux de travail fréquentés par les participants à RECORD, en petite couronne et dans Paris intra-muros, mais aussi en grande couronne. En revanche, à l'échelle de VGP, la dispersion des concentrations pour les trois polluants est plus importante pour le domicile, comparativement à la cohorte RECORD. Cette variabilité plus élevée pour la cohorte VGP peut être due à l'hétérogénéité des caractéristiques des logements dans la Communauté de Versailles Grand Parc (maison avec cheminée, appartement en milieu très urbain, etc.).

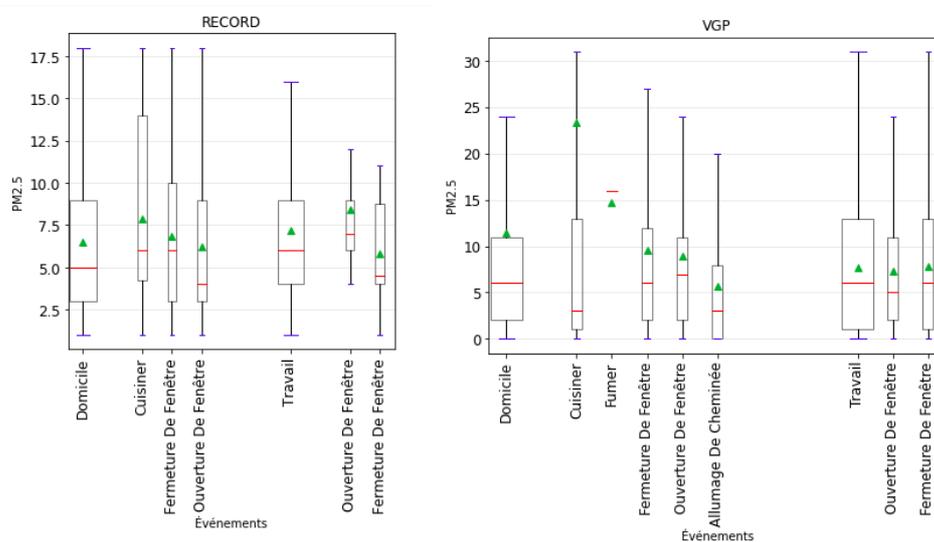
Domicile et autres lieux

- 29 Plusieurs activités d'intérieur, se déroulant dans le cadre de microenvironnements tels que le domicile et le travail, sont associées à des "événements" qui sont autant de sources de pollution générant des particules fines. Selon les données de l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur (OQAI)¹¹, les logements en France présentent des concentrations médianes d'environ 19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM_{2,5}. Au domicile, où les événements sont plus divers, les niveaux de concentration les plus élevés en PM_{2,5} sont relevés lors d'activités spécifiques telles que la cuisine d'aliments, le nettoyage

intérieur, la ventilation et le chauffage domestiques (HCSP¹² ; Pant *et al.*, 2017). D'autres événements, comme le tabagisme, augmentent l'exposition de sorte que les niveaux moyens en PM_{2,5} doublent en présence d'un fumeur (Ramalho, 2012). La figure 4 montre les concentrations en PM_{2,5} au domicile, accompagnées des événements annotés en temps réel par les participants. Les événements recensés font référence aux actes de cuisiner, fumer, allumer la cheminée, ouvrir/fermer des fenêtres. Dans le cadre de cette étude, nous précisons que sur l'ensemble des deux cohortes, 31 participants ont cuisiné, 12 ont fumé (ces individus appartiennent à VGP), 5 ont allumé une cheminée (ces individus appartiennent à VGP), 34 ont ouvert et fermé une fenêtre.

- 30 Ainsi, le graphique relatif au domicile (figure 4 ci-dessous) renvoie-t-il aux valeurs calculées des émissions sur la seule base des événements notifiés pour ce lieu.

Figure 4 : Niveaux de concentration des polluants PM_{2,5} au domicile en termes d'événements



Ktaish, 2021

- 31 La figure 4 montre d'abord l'effet de la saison automnale chez VGP par l'allumage de cheminées, entraînant des expositions à des concentrations en PM_{2,5} atteignant les 20 µg/m³. L'autre effet saisonnier serait l'influence de la ventilation et l'ouverture fréquente des fenêtres en été, ce qui augmente la corrélation entre les concentrations intérieures et extérieures en période estivale (OQAI, 2006). De surcroît, cette même figure montre que, pour les deux cohortes, les plus fortes concentrations aux PM_{2,5} sont liées aux événements initiés par le participant lui-même, lorsqu'il cuisine ou fume. Cette situation révèle un caractère "dual" entre les statuts de victime et de pollueur, même si la pollution émise peut dépendre également de la base matérielle et de l'énergie utilisées pour cuisiner. Ce dualisme peut s'observer dans le cadre des déplacements. Durant un trajet en voiture, l'individu porteur du capteur devient un pollueur pour les autres alors même qu'il est victime en s'exposant à un air ambiant chargé en particules via le système de ventilation de son véhicule. Cela serait également le cas dans le cadre de déplacements en transport collectif.
- 32 On note que l'ouverture et la fermeture des fenêtres (respectivement à l'heure de cuisiner et en périodes de pics de pollution de l'air) expriment une stratégie individuelle d'évitement pour réduire sa propre exposition. Le choix d'un lieu de

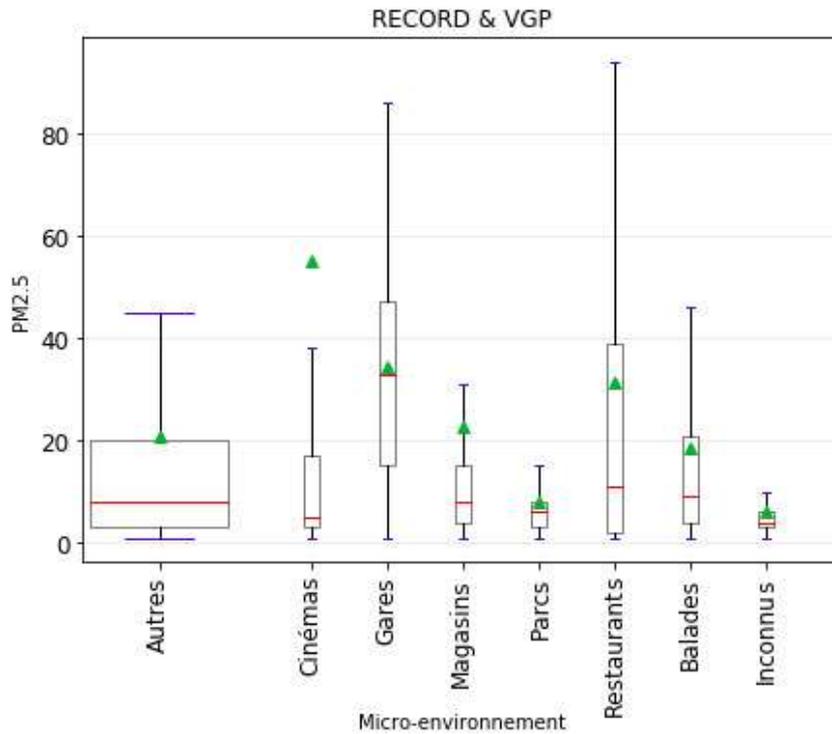
domicile situé à distance des axes routiers traduit aussi cette volonté. Toutefois, nous relevons des avis contrastés parmi les personnes interrogées. Alors que le télétravail et la proximité des lieux domicile-travail sont mis en avant par certains participants, d'autres envisagent la possibilité de déménager vers des lieux moins denses, situés dans le périurbain ou hors de l'Île-de-France, afin d'échapper à l'exposition à la pollution au domicile. Certains arbitrages individuels méritent d'être analysés au regard des politiques urbaines de mobilités.

Une concentration additionnelle en $PM_{2,5}$ associée aux "autres lieux" et aux déplacements vers ces "autres lieux"

- 33 Concernant les autres lieux, des études récentes montrent que les personnes fréquentent divers endroits en dehors des navettes traditionnelles associées aux trajets école-domicile (Ryan *et al.*, 2015) et domicile-travail (Chardonnel *et al.*, 2017). Selon Tran *et al.* (2021), des niveaux élevés de $PM_{2,5}$ et de BC sont observés dans les microenvironnements "domicile" et "transport", mais aussi dans d'autres lieux, tels que ceux dédiés aux loisirs. Avec des niveaux moyens supérieurs à $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en $PM_{2,5}$, des aires de restauration fréquentées aux heures creuses présentent des niveaux en particules ultrafines supérieurs à $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne, bien plus élevés que ceux observés aux lieux du domicile et du travail (Tran *et al.*, 2021). À l'échelle de l'Île-de-France, l'Institut d'Aménagement et d'Urbanisme (IAU) souligne également une hausse, dans l'agenda des Franciliens, du temps alloué aux loisirs et aux déplacements hors navettes domicile-travail (Bertrand, Prédali, 2019)¹³. Ces espaces dédiés au temps-libre sont regroupés dans la catégorie "autres lieux". Le terme "autres lieux" est utilisé ici pour désigner des microenvironnements sociaux dédiés aux loisirs, aux activités récréatives, socio-culturelles, associatives ou sportives, au sein de divers espaces (intérieurs et extérieurs) qui ne sont ni le domicile, ni le lieu de travail.
- 34 Dans notre analyse fondée sur les mesures d'exposition et des enquêtes qualitatives auprès des participants aux deux cohortes, le microenvironnement associé à la modalité "Autres" fait donc référence à la catégorie des autres lieux, lesquels regroupent divers lieux intérieurs et extérieurs (restaurants, cinémas, magasins, gares, parcs, promenades et balades dans la rue) (figure 5). Ces derniers viennent s'ajouter aux microenvironnements habituels tels que le domicile, le travail et les transports. À l'échelle des participants, les entretiens montrent que la catégorie des "autres lieux" est associée à des activités récréatives et de loisirs/achats multi-motifs qui se réalisent dans des endroits fort différents : *"Je n'ai pas de loisirs particulièrement concentrés, donc je suis capable de marcher dans mon Val d'Oise puisqu'on a plein de nature. Pour le cinéma, je vais à Pontoise ou à Saint-Ouen-L'Aumône, etc."* (participant 14). Les relevés des micro-capteurs individuels ont permis de mettre l'accent sur la concentration en polluants dans ces autres lieux (figure 5). Il convient de souligner que les expositions s'avèrent particulièrement notables pour les $PM_{2,5}$. La figure 5 montre que les participants, dans leur ensemble, ont été exposés à des concentrations importantes dans des endroits tels que les cinémas ($52 \mu\text{g}/\text{m}^3$), les restaurants ($34 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ou encore les gares ($37 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Bien qu'il s'agisse d'expositions de courtes durées, les niveaux de concentration de polluants demeurent toutefois élevés. De surcroît, les informations fournies par le tableau 3 mettent en lisibilité les déplacements multi-motifs vers ces autres lieux. Par conséquent, leur fréquentation génère des expositions additionnelles significatives liées aux déplacements vers et à partir de ces derniers : *"Moi j'habite dans le nord de*

l'Essonne, je viens en transports, en RER à Paris. Après pour mes loisirs, c'est parfois à pied, mais surtout en voiture" (participant 3).

Figure 5 : Lieux regroupés sous la catégorie "autres lieux" et concentrations globales en PM_{2,5}

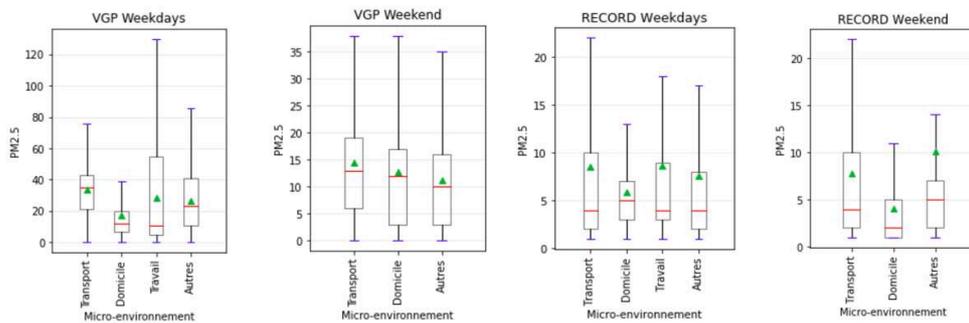


Ktaish et Touili, 2021

Concentrations durant les jours de la semaine et le week-end

- 35 Cette sous-partie vise à caractériser les concentrations selon qu'il s'agit des jours de la semaine ou des week-ends.

Figure 6 : Concentration aux PM_{2,5} pendant les jours de la semaine et le week-end



Ktaish, 2021

- 36 Les relevés issus des micro-capteurs, pour les deux cohortes, sont présentés dans la figure 6. Les résultats pour le PM_{2,5}, pour les deux cohortes, montrent qu'en semaine, les valeurs moyennes des concentrations sont plus élevées, par ordre décroissant, pour

le transport, le travail et les autres lieux. En termes de niveau atteint, les différences observées entre les deux cohortes peuvent s'expliquer par le temps passé en extérieur en semaine, en particulier, dans les transports (domicile-travail) pour la cohorte VGP. Cette observation confirme les résultats issus de la figure 3. En semaine, pour les deux cohortes, cela se traduit par une concentration plus faible dans le microenvironnement "domicile" comparativement aux autres microenvironnements. Durant le week-end, en l'absence de fréquentation du lieu de travail, nous notons des différences entre les deux cohortes. Premièrement, pour la cohorte VGP, la valeur moyenne la plus élevée concerne le transport tandis que pour la cohorte RECORD, la concentration la plus élevée concerne les autres lieux. Deuxièmement, nous constatons pour RECORD un niveau moyen de concentration dans le transport proche de celui atteint en semaine, alors que pour VGP, la concentration moyenne pour le transport demeure plus faible que le niveau moyen observé en semaine. Comparé au domicile, la fréquentation des autres lieux est plus importante pour RECORD que pour VGP durant le week-end. Ainsi les participants de RECORD ont-ils concentré leurs déplacements vers les autres lieux lors du week-end. Ces résultats soulignent l'importance des autres lieux, aussi bien durant les jours de la semaine que durant le week-end. Les différences constatées peuvent témoigner d'un changement, le week-end, quant aux endroits fréquentés et aux événements associés aux autres lieux. Cela peut également exprimer un changement quant à l'environnement même de ces lieux et des activités pratiquées, qui serait moins chargé en polluants dans l'air durant le week-end pour la cohorte VGP, alors que les participants de RECORD seraient plus exposés le week-end qu'en semaine au $PM_{2,5}$ dans les autres lieux.

Des spécificités associées au microenvironnement "Transport"

Des écarts importants en matière de concentration

- 37 Les données collectées révèlent des écarts importants quant aux concentrations dans le microenvironnement "transport", par référence notamment à la diversité des modes de déplacement empruntés par les participants (voir figure 7 ci-dessous). Durant leurs déplacements, la moitié des participants de la cohorte VGP a été exposée à des niveaux de concentration de $PM_{2,5}$ inférieurs à $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$, alors que l'autre moitié a été exposée à des niveaux plus élevés, pouvant aller jusqu'à $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ce qui demeure bien supérieur à la norme nationale de qualité¹⁴ (fixée à $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne annuelle), conformément aux recommandations de l'Organisation Mondiale de la Santé (Airparif, 2020). Par ailleurs, près d'un quart des participants a été exposé à des valeurs situées entre 38 et $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Sachant que la valeur limite annuelle¹⁵ est de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et que la valeur cible¹⁶ en moyenne annuelle est de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les $PM_{2,5}$ (Airparif, 2017), près de 50 % des participants auraient alors été exposés à des concentrations supérieures à ces deux seuils. Le même raisonnement, appliqué au NO_2 et au BC, nous conduit à supposer des expositions individuelles très variables. Là également, pareille variabilité peut résulter de la diversité des modes de déplacement dans le microenvironnement "Transport". Ainsi pouvons-nous observer des dépassements de seuil pour plusieurs individus durant leurs déplacements (figure 7). En plus des concentrations en polluants, la durée consacrée aux déplacements est également déterminante dans le transport. En effet, les Franciliens consacrent en moyenne 92 minutes par jour aux

déplacements, avec le travail comme principal motif mais aussi les activités privées, de plus en plus croissantes, notamment celles liées aux loisirs (IAU, 2017)¹⁷.

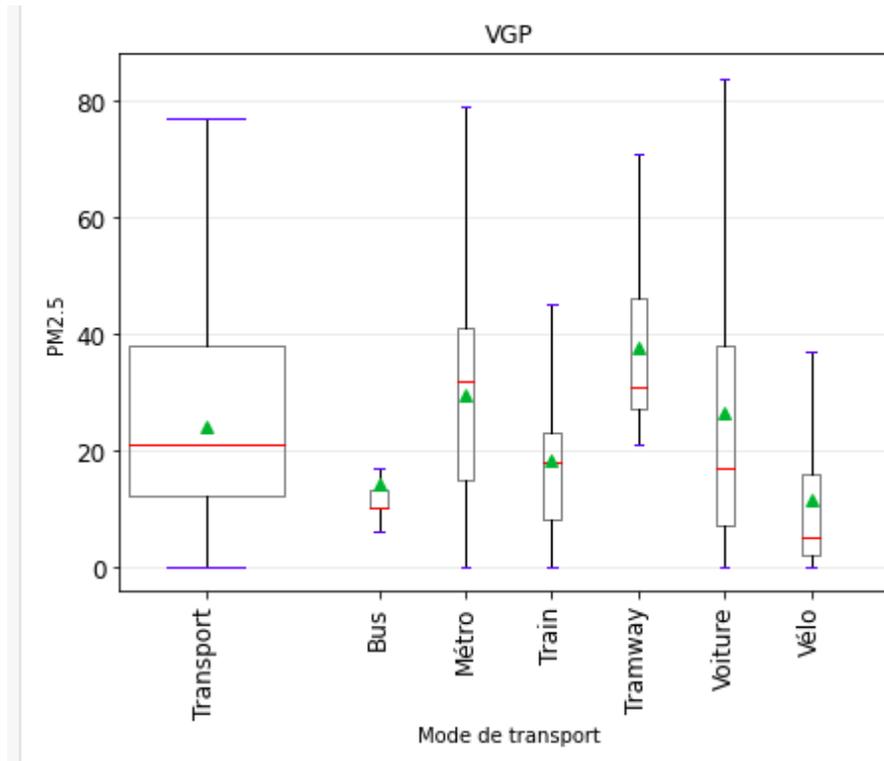
- 38 Les résultats issus des données quantitatives et des entretiens indiquent que la pollution de l'air est sensiblement liée à la mobilité urbaine et aux flux de déplacements quotidiens. Selon Airparif (2020), un habitant sur deux dans ces zones urbaines a été exposé à des concentrations dépassant la norme de qualité exprimée ici en moyenne annuelle ($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$) pour les $\text{PM}_{2,5}$. Pour les deux cohortes, le calcul du coefficient de corrélation linéaire (r) montre que la hausse des niveaux en $\text{PM}_{2,5}$ a été accompagnée d'une hausse de la concentration en NO_2 pour les déplacements en "voiture" ($r = 0,75$). Cette corrélation est également importante et positive entre les niveaux de concentration associés aux $\text{PM}_{2,5}$ et au NO_2 pour les déplacements en "train" ($r = 0,64$) mais relativement faible en "tramways" ($r = 0,33$). Sur l'ensemble des participants, 48 se sont déplacés en voiture, 21 en métro, 25 en train, 19 en bus, 3 en tramway (dont aucun dans la cohorte RECORD), 2 en moto (dont aucun dans VGP) et 15 en vélo (dont 13 dans VGP).

L'exposition aux polluants $\text{PM}_{2,5}$ lors des déplacements

- 39 Dans ce qui suit, une attention est portée sur les expositions aux polluants $\text{PM}_{2,5}$ pendant les déplacements des participants de la cohorte VGP, en fonction des modes de déplacement. À ce titre, l'un des participants de VGP nous précise qu'"aujourd'hui, on a construit des autoroutes, des transports en commun rapides donc qui permettent d'habiter à 50 km de Paris et travailler à Paris. Ce n'est pas bien. La chose c'est d'arriver à localiser les activités" (participant 9). La figure 7 ci-dessous indique les niveaux de concentration en $\text{PM}_{2,5}$ selon les modes de transport pour la cohorte VGP. En fonction des modes de déplacement, nous voyons que pour le vélo et le bus, les concentrations moyennes en $\text{PM}_{2,5}$ demeurent inférieures à $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, valeur cible fixée par Airparif. La concentration moyenne la plus faible est enregistrée pour le vélo ($13,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Pour la catégorie "trains", regroupant majoritairement des trains de banlieue à banlieue, dont les lignes sont essentiellement aériennes, le niveau demeure élevé (proche de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$) sans toutefois dépasser la valeur cible. En revanche, les niveaux de concentration supérieurs à la valeur cible ont été observés lors des déplacements en métro, voiture et tramway. Les niveaux moyens les plus élevés en $\text{PM}_{2,5}$ (près de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ont été observés lors des déplacements en tramway. En termes de médiane d'exposition, notre résultat d'environ $38 \mu\text{g}/\text{m}^3$ reste proche des $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en $\text{PM}_{2,5}$, niveau médian d'exposition relevé par Delaunay *et al.* (2012) dans le tramway parisien. Quant aux usagers du métro et de la voiture, ces derniers sont exposés à des concentrations moyennes proches de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Les fortes concentrations relevées par les micro-capteurs lors de déplacements en métro rejoignent d'autres études menées sur les expositions aux particules fines dans les enceintes souterraines (Grange, Host, 2012). Sur certaines lignes, principalement souterraines, du métro parisien et du RER, les niveaux d'exposition médians aux $\text{PM}_{2,5}$ sont élevés, compris entre 119 et $155 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Delaunay *et al.*, 2012 ; Grange, Host, 2012). En région parisienne, les concentrations de $\text{PM}_{2,5}$ dans les tunnels des rames de métro sont particulièrement élevées, notamment pour les lignes équipées de véhicules ferroviaires à pneus (Valari *et al.*, 2020). Il ne convient pas ici de conclure des généralités sur le mode de transport à partir de

l'exposition individuelle. Néanmoins, certaines fortes valeurs de concentration relevées dans le "Tramway" et à "Vélo" méritent une attention particulière.

Figure 7 : Les niveaux de concentration en $PM_{2.5}$ selon les modes de transport pour la cohorte VGP

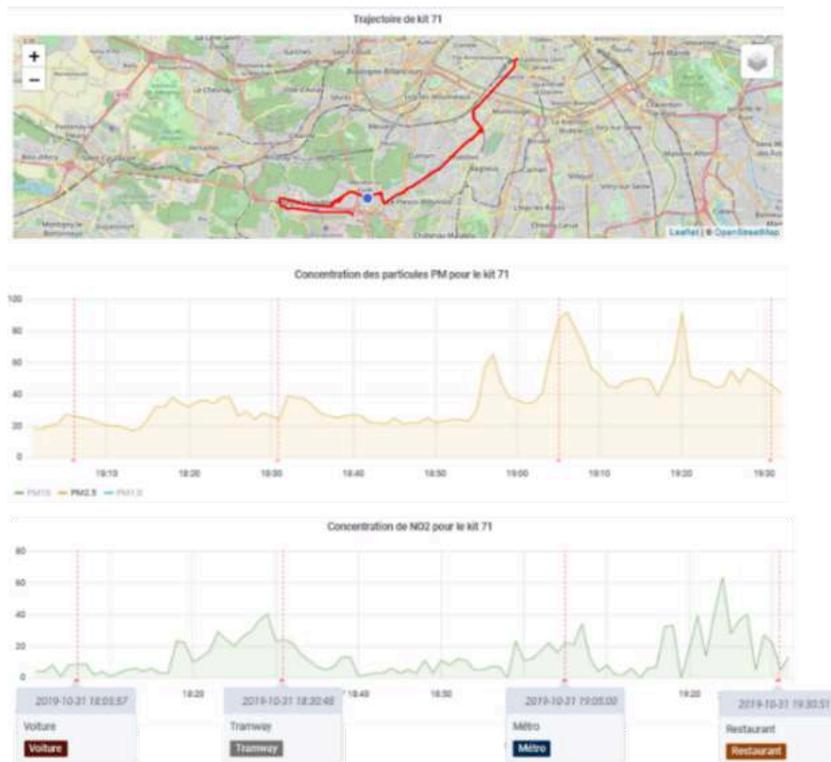


Ktaish, 2021

- 40 Plus précisément, pour le "Tramway", emprunté par trois des participants de VGP dans le cadre d'un déplacement intermodal, nous notons des pics de concentration brefs et ponctuels au cours de leur trajet. À titre d'illustration, le trajet en tramway d'un participant notifie (figure 8) deux pics de concentration aux $PM_{2.5}$: d'abord, entre les stations "Vélizy 2" et "Meudon la forêt", atteignant $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, puis lors de la zone de correspondance tramway-métro, atteignant $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Ces deux pics de concentration s'expliquent principalement par la pollution ambiante de l'environnement proche : le premier pic coïncide avec l'inter-croisement entre, d'une part, le tracé du tramway et la D57, et d'autre part, la N118 et l'avenue Morane-Saulnier, où de fortes concentrations de NO_2 sont également relevées. Le second pic coïncide avec le pôle d'échange tramway-métro, à l'entrée sud de Paris, où se croisent des réseaux ferrés, des axes routiers (RD 906 et D63), une station de bus entourée de plusieurs commerces, parkings et activités tertiaires. Il s'agit ici d'un déplacement intermodal (voiture, tramway, métro) entre le lieu de travail et d'autres lieux. Lors du trajet, ce participant aurait été exposé à des concentrations croissantes de $PM_{2.5}$ et NO_2 à mesure qu'il se rapprochait des zones denses et/ou des axes routiers. Les concentrations de $PM_{2.5}$ relevées étaient supérieures au seuil de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Les micro-capteurs individuels ne permettent pas d'analyser en profondeur les sources de pollution affectant l'exposition dans le "tramway" telles que les quartiers traversés, l'ancienneté du tramway et la température ambiante associée aux systèmes de ventilation (Papp *et al.*, 2020). Toutefois, les niveaux élevés et ponctuels observés peuvent résulter de la pollution des

environnements proches qui affectent l'exposition des voyageurs au vu des hautes fréquences de l'ouverture des portes et du freinage entre les stations.

Figure 8 : Exemple de l'exposition d'un participant lors d'un déplacement intermodal



Touili, 2021

- 41 Quant aux déplacements à "vélo", treize participants de la cohorte VGP ont utilisé ce mode de "mobilité active", aussi bien durant la semaine que le week-end. Les données montrent que les usagers du "vélo" sont moins exposés (figure 7) aux polluants étudiés que ceux utilisant les autres modes de déplacement. Par ailleurs, un quart des usagers du "vélo" ont été exposés à des niveaux de concentration élevés dépassant les $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en $\text{PM}_{2,5}$. La figure 9 ci-dessous, schéma illustratif pour deux participants, montre que l'exposition varie sensiblement en fonction de l'aménagement cyclable.

Figure 9 : Schéma illustratif de l'exposition aux $\text{PM}_{2,5}$ pendant le déplacement en "Vélo" de deux participants



Touili, 2021

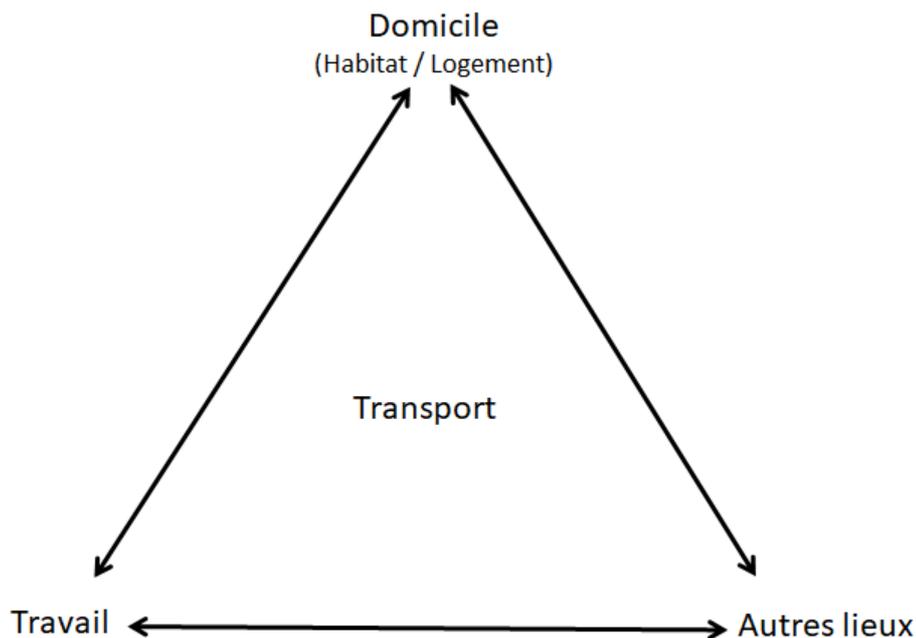
- 42 Le schéma montre que des concentrations élevées ont été relevées sur les bandes cyclables situées à proximité des voies de circulation d'autres véhicules motorisés (figure 9, graphe de gauche) et au niveau des carrefours de circulation/giratoires, où des pics brefs de concentrations ont été observés (figure 9, graphe de droite). Les concentrations les moins fortes ont été relevées sur des aménagements cyclables du type "voies vertes" et sur des chemins non aménagés en forêts et espaces naturels¹⁸. Ce résultat est cohérent avec d'autres études montrant que l'exposition des cyclistes varie considérablement sur un même trajet, avec des valeurs élevées (supérieures à 150 µg/m³ en NO₂) aux abords des axes routiers (Apparicio *et al.*, 2019).
- 43 Toutefois, l'outil micro-capteur portable ne permet pas d'estimer avec précision les taux de diminution des polluants émis au niveau des voies routières. La dispersion des concentrations des polluants est un phénomène complexe influencé par plusieurs facteurs, tels que la nature et les concentrations des polluants à la source, la distance d'impact (distance à l'axe routier), les conditions de circulations routières (congestions), les facteurs météorologiques tels que la vitesse et la direction des vents, la température ou encore les conditions topographiques et d'urbanisation (Maignant, 2017 ; Rouil *et al.*, 2015 ; Host, 2013 ; Loubet *et al.*, 2011). Une campagne dédiée à ce phénomène peut réunir des connaissances précises sur l'ensemble de ces facteurs en s'appuyant sur des micro-capteurs portatifs à la fois pour des piétons, des cyclistes et des automobilistes. Certes, nos résultats ne permettent pas de statuer sur la baisse, rapide ou lente, des polluants émis par les axes routiers. Néanmoins, les études d'impacts en cours dans le cadre de la mise en œuvre des ZFE (Zones à Faibles Émissions) mobilité (ZFE-m) métropolitaines¹⁹ pourront affiner, dans l'avenir, les connaissances autour de ce phénomène encore mal connu.
- 44 Le tramway est considéré comme l'un des modes de locomotion les moins exposés à la pollution atmosphérique (Delaunay *et al.*, 2012). En parallèle, l'accroissement de la pratique du vélo s'est accompagné d'une augmentation des aménagements cyclables, atteignant en 2019 un total de linéaires de 5 835 km selon l'institut Paris Région²⁰. D'après nos entretiens, ces deux modes de déplacement ont récemment bénéficié d'importants investissements en Île-de-France, dans le cadre de la promotion des mobilités durables. Du point de vue de la qualité de l'air, deux points communs existent à l'interface de ces modes de déplacement. Le premier réside dans les fluctuations constatées indiquant que l'exposition individuelle des usagers est fortement influencée par la pollution environnante, tout en demeurant tributaire des aménagements du tissu urbain que traversent les tracés du "tramway" et/ou les voies cyclables. Le deuxième point commun réside dans l'interférence potentielle entre, d'une part, le développement des projets de "tramway", répondant à des exigences de mobilité et de densification et, d'autre part, la préservation des espaces verts existants : "*Il ne faut pas non plus ultra densifier, il faut aussi maîtriser l'urbanisation et ménager les espaces verts*" (participant 13). Ces derniers risquent ainsi d'être affectés par la densification alors qu'ils constituent des lieux privilégiés de promenade et des itinéraires à faible exposition pour les cyclistes.
- 45 En complément aux données quantitatives, les entretiens qualitatifs auprès des participants interrogés préconisent également l'usage des transports en commun et du vélo, le rapprochement entre les lieux de travail et le domicile, le télétravail ou encore le covoiturage comme pratiques responsables à l'échelle individuelle. Dans cette perspective, les acteurs institutionnels interrogés mentionnent la mise en œuvre de

ZFE mobilités, de péages urbains et de PDU (Plans de Déplacements Urbains) au titre de mesures prises à l'échelle de la collectivité : "L'étalement urbain, on sait que c'est une catastrophe" (participant 7). Alors que le trafic routier est unanimement désigné comme "responsable" de la dégradation de la qualité de l'air par les personnes interrogées, à quel degré peut-on (et devrait-on) concentrer les lieux de travail, le domicile et les autres lieux ? En effet, selon nos résultats, l'exposition individuelle à la pollution de l'air demeure fortement influencée par la pollution environnante, laquelle va dépendre d'un report modal collectif dans les mobilités urbaines.

Les déplacements vers d'autres lieux et le triangle des mobilités

- 46 En dehors des navettes domicile-travail, nos résultats montrent une troisième composante "autres lieux" multi-motifs (achats, loisirs, restauration, parcs, etc.) dans le cadre des déplacements quotidiens. Un tel résultat souligne une exposition additionnelle au sein et pendant les déplacements vers ces "autres lieux". Ce résultat est d'autant plus considérable que les mesures d'intensité des expositions au sein des microenvironnements "transport" et "autres lieux" sont significatifs (voir tableaux 5 et 6 dans la synthèse). L'usage des micro-capteurs met alors en évidence l'importance du caractère triangulaire des mobilités (figure 10). Ce résultat relativise l'analyse traditionnelle accordée aux mobilités pendulaires et alimente le débat actuel sur les politiques de mobilités centrées sur la densification urbaine (Charmes 2010 ; Haaland, Van Den Bosch, 2015).

Figure 10 : Triangle des motifs de déplacement, lieux d'exposition et des leviers d'action des politiques de mobilité



Touili, 2021

- 47 Les déplacements quotidiens (domicile, travail, autres lieux) génèrent une part importante de la pollution atmosphérique. Selon les acteurs institutionnels interrogés, les politiques urbaines prônent actuellement le choix de la "ville compacte" et de la

densification. Il s'agit de créer une mixité fonctionnelle au niveau des espaces urbanisés existants (Charmes, 2010 ; Coll, Elessa Etuman, 2019), réduisant ainsi la distance des trajets effectués et les consommations d'énergie (Schindler, Caruso, 2014). Du strict point de vue de la qualité de l'air, ce choix peut être éclairé par certains de nos résultats.

- 48 D'un côté, le déplacement vers les autres lieux illustre le phénomène de "chaînage de déplacements" (Kaufmann, 2008), désignant l'enchaînement d'activités de loisirs dans le temps et sans repasser par le domicile (figure 11). Dorénavant, il s'agit de concentrer des lieux d'habitat, d'emploi mais aussi de loisirs/services sur des espaces fonctionnels réduits (des triangles à taille réduite mais en plus grand nombre). Selon nos résultats (figure 3), les valeurs les plus élevées de concentration des $PM_{2.5}$ et du BC ont été recensées dans les microenvironnements "transport" et "autres lieux" chez la cohorte VGP, qui reflète une configuration d'étalement urbain. En termes de variabilité des expositions pour ces deux polluants, nos résultats (tableau 4) indiquent cependant une plus forte variabilité des expositions chez RECORD, principalement localisée dans Paris et sa petite couronne. En outre, les fortes proximités physiques entre les réseaux routiers, les transports en commun, les aménagements cyclables et les aires piétonnes sont susceptibles d'accroître les expositions. L'analyse de l'exposition durant les déplacements quotidiens (figures 6 et 7) chez RECORD montre qu'une forte densité entraîne des pics élevés d'exposition pour les usagers des modes de transport alternatifs (tramway et vélo). En l'absence de recherches complémentaires sur la diminution des polluants, une amélioration de la qualité de l'air au sein des lieux (domicile, travail et autres lieux) fréquentés reste fortement conditionnée par un report modal collectif. Sachant que près de 70 % à 84 % des $PM_{2.5}$ mesurées à l'intérieur proviendraient de l'extérieur (Host, 2013), une forte proximité aux réseaux de transport risque par ailleurs d'accroître les niveaux de concentration en polluants au "domicile" (voir tableaux 5 et 6 dans la synthèse) et dans d'autres espaces intérieurs. Dans certains espaces intérieurs (crèches, écoles, hôpitaux, structures d'hébergement de personnes âgées) et extérieurs (stades et terrains de sport en plein-air), on constate des situations de dépassement des normes de qualité de l'air en NO_2 et en particules fines aux abords des axes routiers situés dans Paris et sa petite couronne (Airparif, 2012 ; Joly, 2014).

Figure 11 : Exemple d'un déplacement quotidien par les transports en commun chez VGP



Touili, 2021

- 49 D'un autre côté, l'amélioration de la qualité est à l'interface de stratégies individuelle et collective. Les comportements individuels combinent à la fois des stratégies d'abattement, par la réduction de ses propres émissions dans le microenvironnement "transport", mais aussi des stratégies d'évitement, par la réduction de sa propre exposition dans les microenvironnements "transport" et "domicile". L'agent émetteur prenant conscience de son impact, il cherche à effacer certaines de ses consommations à l'origine de la pollution : *"moi je préfère prendre ma voiture, forcément. Après on sait maintenant qu'on est moins exposés dans le métro sur certains plans que dans sa voiture"* (participant 3). L'agent exposé, prenant conscience de sa vulnérabilité, cherche à éviter la pollution lorsqu'il en a la possibilité : *"J'habite dans le 78 et je travaille à Paris tous les jours, et je prends le train. C'est aussi des choix qu'on fait de s'éloigner de Paris. C'est clair que le fait de travailler à Paris ça augmente mon exposition"* (participant 16). Pour les plans de mobilités, deux exemples illustrent des conflits éventuels entre stratégies individuelle et collective. Le premier exemple est celui des déménagements vers le péri-urbain qui rallongent les déplacements. Cette stratégie d'évitement témoigne d'une forme de rationalité individuelle. Souhaitant "échapper" à la pollution de l'air dans son ancien "domicile" (ou à des nuisances sonores et autre stress), l'individu décide de prendre de la distance vis-à-vis des centres urbains, préférant loger en périphérie. Toutefois, pour couvrir cette nouvelle distance afin d'accéder à son lieu de travail ou à d'autres lieux de fréquentation quotidienne, ce dernier pourrait dégrader la qualité de l'air. Le second exemple est celui du développement des réseaux de transports en commun, (tramway et réseaux routiers), accompagnant les politiques de densification. Cette stratégie d'abattement, qui témoignerait d'une forme de rationalité collective pour réduire la pollution en proposant une alternative à l'automobile, se fait souvent au détriment des espaces verts existants. Une forte densification risque-t-elle paradoxalement d'inciter les individus à l'usage de l'automobile pour fréquenter des espaces verts (autres lieux) hors des centres urbanisés et densifiés ?
- 50 A priori, la réduction de la dispersion des lieux (domicile, travail, autres lieux) aurait pour effet de réduire à la fois l'usage de l'automobile (principale source d'émissions polluantes) et le temps consacré aux déplacements quotidiens (correspondant à la durée d'exposition des usagers lors des transports). Sachant que "du temps libre, c'est de la consommation d'espaces" (Raibaud, 2012), n'est-il pas envisageable que la réduction des distances entre ces lieux inciterait (par effet rebond) les individus à multiplier leurs activités quotidiennes de loisirs voire à intensifier le chainage de déplacements (avec ou sans retour au domicile) ? À quel point ces tendances risquent-elles d'impacter les expositions dans les microenvironnements "transport" et "autres lieux" ?

Synthèse

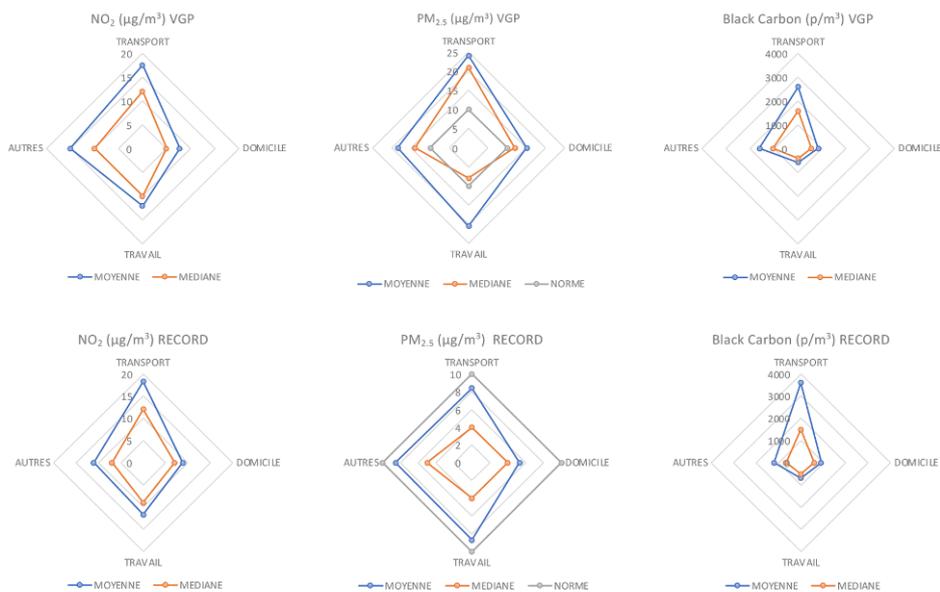
Un comparatif des mesures de concentration

- 51 Nous proposons une analyse synthétique des résultats selon la nature des polluants, laquelle contribue à souligner l'importance de certains microenvironnements et événements qui ont été quelque peu négligés dans la littérature sur la pollution de l'air. De surcroît, elle contribue à rappeler la prudence dont on doit faire preuve quant à l'usage des valeurs moyennes dans l'exercice de mesure de la pollution. Cette dernière

doit être à présent pondérée par des mesures de seuil en lien notamment avec les valeurs médianes et des mesures d'intensité présentées ci-dessous (figure 12), qui éclairent d'une manière différente le phénomène étudié. Dans les modèles graphiques suivants (figure 13), nous isolons certaines des valeurs relatives aux émissions polluantes mesurées (PM_{2.5}, NO₂, BC) dans les microenvironnements recensés. Il s'agit notamment des valeurs moyenne et médiane.

52 Si l'on considère la cohorte VGP, nous constatons des disparités plus ou moins importantes selon les polluants entre les valeurs moyenne et médiane ; les médianes sont toutes inférieures aux moyennes. Concernant les particules fines de type PM_{2.5}, les écarts entre ces valeurs révèlent des coefficients multiplicateurs allant de 1,15 à 2 selon les microenvironnements. Ils sont de l'ordre de 1,2 à 1,5 pour le NO₂ et de 1,4 à 1,6 pour le BC. Par conséquent, les valeurs moyennes doivent être interprétées avec prudence car la diversité des situations individuelles en matière d'exposition demeure importante (Duché, 2013). Ces valeurs dissimuleraient des profils et des trajectoires individuels fortement surexposés ou sous-exposés. Puisque la moyenne demeure supérieure à la médiane, on peut en déduire que plus de la moitié des participants seraient exposés à des valeurs inférieures à la valeur moyenne, alors que moins de la moitié le seraient davantage. Cela résulte du fait qu'une petite partie des participants serait fortement exposée à la pollution, tirant ainsi la valeur moyenne vers le haut. De surcroît, ces mesures soulignent des différences entre les polluants et les microenvironnements. Tout d'abord, les valeurs de la concentration en PM_{2.5} révèlent une hétérogénéité plus importante à l'échelle de la cohorte. L'écart est significatif concernant le microenvironnement "travail". Une telle diversité devrait conduire à privilégier le raisonnement en matière de seuil par référence à la médiane.

Figure 12 : Comparatif des mesures de concentration relevées par polluant et par microenvironnement



Schembri, 2021

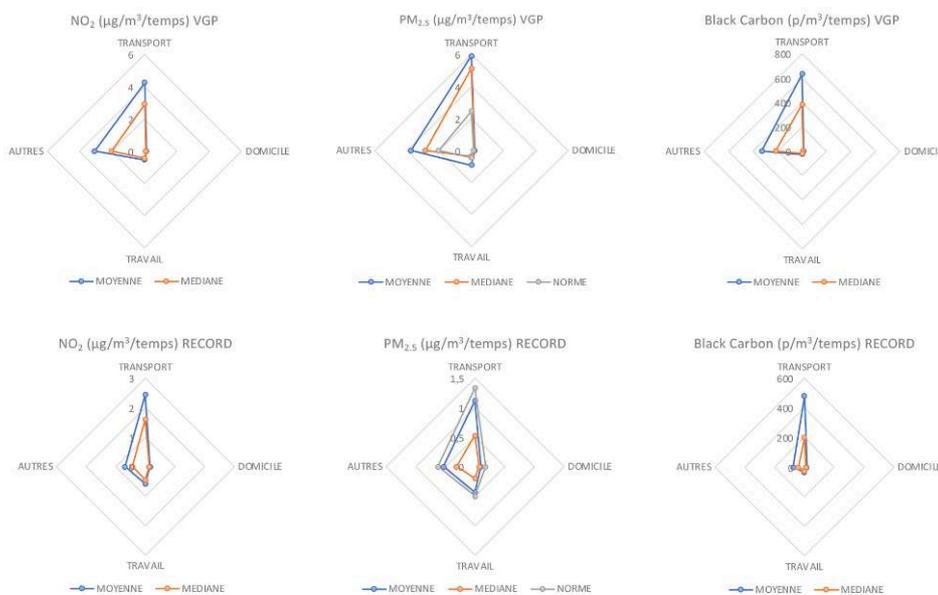
53 Comparant désormais les différentes valeurs moyennes et médianes pour chacun des microenvironnements et la norme française de qualité de l'air exprimée en moyenne

annuelle pour les $PM_{2.5}$ (Airparif, 2020), les résultats révèlent des situations contrastées. Pour la cohorte VGP, les valeurs moyennes demeurent supérieures à la norme de qualité tandis que les valeurs médianes sont proches de la norme de qualité au sein des microenvironnements "domicile" et "autres lieux". La médiane est inférieure à cette dernière pour le microenvironnement "travail"; en revanche, elle est deux fois supérieure à ladite norme dans celui ayant trait au "transport".

Une analyse par les mesures d'intensité

54 Nous proposons désormais de croiser les informations relatives aux microenvironnements et au temps moyen passé dans ces derniers. Pour ce faire, nous rapportons la mesure d'exposition à la pollution au temps moyen passé dans le microenvironnement pour chacun des trois polluants traités. Nous construisons ainsi une mesure d'intensité de la concentration par unité de temps passé dans les différents endroits. Ces mesures d'intensité sont calculées d'après les budgets-temps moyens établis à l'échelle de la cohorte, considérant ici le cumul du temps passé par l'ensemble des participants dans chacun des microenvironnements. Les résultats sont présentés dans les graphiques ci-dessous (figure 13).

Figure 13 : Mesures de concentration par unité de temps passée dans chaque microenvironnement et par polluant



Schembri, 2021

55 Pour l'ensemble des polluants, les résultats montrent l'importance des autres lieux et du transport, notamment pour la cohorte VGP, au sein de laquelle le domicile demeure bien moins pertinent tout comme le lieu de travail. Si l'on considère la mesure de concentration en $PM_{2.5}$, les microenvironnements "autres lieux" et "transport" révèlent des mesures d'intensité de concentration par unité de temps de l'ordre de 2 et 4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En revanche, les microenvironnements "travail" et "domicile" révèlent une importance bien moindre, avec des intensités à hauteur de 1,29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et de 0,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

56 La lecture en termes d'intensité confirme l'importance des autres lieux et du transport, ainsi que leur couplage, notamment durant le week-end (figure 6), au travers des déplacements pour accéder aux autres lieux. Elle contribue également à mettre en évidence l'hétérogénéité des valeurs de concentrations à l'échelle de la cohorte en fonction des polluants et des microenvironnements. À ce titre, le tableau 5 ci-dessous compare les mesures moyennes et d'intensité relatives en matière de concentration entre les microenvironnements, pour les différents polluants concernés à l'échelle de la cohorte VGP. Nous avons procédé à des mesures par couple de microenvironnements associés aux navettes traditionnelles "transport-domicile" et "transport-travail", afin de mettre en évidence l'importance des microenvironnements "transport" et "autres lieux".

Tableau 5 : Comparaison des mesures moyennes et d'intensité relatives entre les microenvironnements et par polluant (cohorte VGP)

	PM _{2,5}		NO ₂		Black Carbon	
	Moyenne	Intensité	Moyenne	Intensité	Moyenne	Intensité
Transport/domicile	1,93	26,82	2,27	38,04	3,11	52,03
Autres/domicile	1,52	17,09	1,96	27,44	1,94	27,17
Travail/domicile	1,65	4,19	1,57	4,83	0,70	2,16
Transport/travail	1,17	6,40	1,45	7,87	4,43	24,08
Autres/travail	0,92	4,08	1,25	5,68	2,76	12,57

Schembri, 2022

57 De manière générale, les quotients sont particulièrement élevés lorsqu'il s'agit des mesures d'intensité ; ils sont bien supérieurs aux rapports des mesures moyennes. Lorsque l'on prend pour numéraires les valeurs collectées au sein du microenvironnement "domicile", ils s'élèvent à hauteur de 26,82 pour le "transport" et de 17,09 pour les "autres lieux". Quand on compare les mesures de concentration de PM_{2,5} collectées dans le microenvironnement "transport" à celles relevées au "travail", le rapport est supérieur à 6 pour ce qui est de l'intensité, alors qu'il n'est que de 1,17 lorsqu'il s'agit des mesures moyennes. Si l'on considère désormais le microenvironnement "autres lieux", l'intensité mesurée représente 4 fois celle relevée au sein du microenvironnement "travail", alors que la concentration moyenne y demeure inférieure de près de 8 %. Lorsque l'on prend pour numéraires les valeurs relatives au microenvironnement "domicile", les quotients obtenus en matière d'intensité sont particulièrement élevés. Ils sont supérieurs à 25 pour le microenvironnement "transport" et à 17 pour le microenvironnement "autres lieux", lesquels excèdent grandement ceux calculés pour les concentrations moyennes. Nous observons des valeurs encore plus élevées lorsqu'il s'agit des mesures d'intensité associées aux autres polluants étudiés. Le tableau 5 permet donc de confirmer

l'importance des microenvironnements "transport" et "autres lieux" en termes d'intensité pour la cohorte VGP.

Tableau 6 : Comparaison des mesures moyennes et d'intensité relatives entre les microenvironnements et par polluant, (cohorte RECORD)

	PM _{2,5}		NO ₂		Black Carbon	
	Moyenne	Intensité	Moyenne	Intensité	Moyenne	Intensité
Transport/domicile	1,57	11,85	2,06	15,54	3,94	29,67
Autres/domicile	1,60	5,63	1,25	4,37	1,31	4,59
Travail/domicile	1,63	4,57	1,32	3,70	0,75	2,10
Transport/travail	0,97	2,59	1,57	4,20	5,27	14,12
Autres/travail	0,99	1,23	0,95	1,18	1,75	2,18

Schembri, 2022

- 58 On retrouve certains des résultats précédents, dans des proportions moindres, pour la cohorte RECORD (voir tableau 6 ci-dessus). Rapportés aux mesures concernant le microenvironnement "domicile", les quotients en matière d'intensité sont respectivement de 11,85 et de 5,63 pour les microenvironnements "transport" et "autres lieux" ; ils sont de l'ordre de 2,59 et de 1,23 lorsque l'on prend pour numéraires les valeurs collectées au sein du microenvironnement "travail". Les concentrations moyennes révèlent un surcroît de près de 60 % par rapport à la mesure collectée au "domicile", (1,57 pour le "transport" et 1,60 pour les "autres lieux"), ce qui demeure bien faible au regard des constats précédents. Elles sont légèrement inférieures à l'unité, (0,97 pour le "transport" et 0,99 pour les "autres lieux"), ce qui témoigne de niveaux moyens très proches entre les microenvironnements concernés, si le numéraire est constitué des moyennes relevées au sein du microenvironnement "travail". Concernant les autres polluants, les quotients ayant trait aux mesures d'intensité sont plus élevés. Toutefois, les niveaux sont inférieurs à ceux relevés pour la cohorte VGP. Cela concerne notamment le microenvironnement "autres lieux", dont l'importance relative demeure moins significative.
- 59 Ces comparaisons montrent l'intérêt des mesures d'intensité pour apprécier l'importance relative de certains microenvironnements, parmi lesquels le "transport" et les "autres lieux", dans l'exercice d'appréhension des problèmes de qualité de l'air. À ce titre, elles contribuent à souligner l'importance des arbitrages réalisés par les agents en matière d'allocation de temps entre les différents microenvironnements et les événements/activités qui leur sont associés. Ces arbitrages peuvent avoir des conséquences sur l'exposition aux émissions polluantes.
- 60 Au bilan, on constate une grande variabilité des mesures de concentration au regard des valeurs les plus élevées dans les "autres lieux" et le "transport", lesquels renvoient aussi à une grande diversité des lieux et des modes de transport. La lecture par l'intensité renforce ce constat. Pareille diversité nécessite une lecture plus fine de ces

mesures de concentration, tenant compte à la fois des événements et des périodes qui caractérisent les microenvironnements. Dans cet ordre d'idées, nous devons porter une attention particulière à la pollution de l'air par les $PM_{2,5}$ qui révèle des disparités particulièrement significatives aux plans des situations individuelles et des microenvironnements.

Conclusion

- 61 Ce travail a porté sur l'analyse de l'exposition à la pollution urbaine à partir de deux cohortes d'individus résidant en Île-de-France. Les données recueillies permettent des analyses individualisées et spécifiques à des contextes spatio-temporels précis. Ce travail révèle que l'exposition d'un individu est un phénomène complexe fortement influencé par l'emplacement géographique des microenvironnements et le temps passé dans ces derniers. L'exposition dépend également de l'horaire, du mode de transport et de la nature des activités/événements réalisés par l'individu ou se déroulant dans son environnement proche. À cet égard, les résultats proposés devraient être complétés par une analyse des caractéristiques individuelles (âge, sexe, éducation, activité professionnelle, etc.) des participants aux deux cohortes ainsi que des éléments de contextualisation associés aux divers microenvironnements. Il serait également intéressant, pour les journées mentionnées, d'établir des comparaisons avec les valeurs enregistrées par les stations fixes Airparif localisées à proximité.
- 62 En tant qu'outil complémentaire de surveillance de la qualité de l'air, les micro-capteurs apportent une estimation des expositions individuelles en quantifiant les concentrations des polluants à un instant donné. Cependant, leur usage à une échelle locale réduite ne contribue pas à dresser des conclusions généralisables. Nos résultats suggèrent que chaque individu a un profil d'exposition unique qui provient de facteurs propres (issus de ses activités au sein des espaces fréquentés) et de facteurs externes attribués aux pollutions émises dans son environnement proche. Les micro-capteurs ne permettent pas d'identifier de manière précise les sources polluantes en cas de déplacements par "Tramway" ou "Vélo" et encore moins de prévoir l'évolution future de la qualité de l'air. Il n'en demeure pas moins que cette technologie a donné lieu à un échange participants-scientifiques favorable à la sensibilisation des citoyens sur leur propre exposition et à l'enrichissement des connaissances scientifiques. L'association des entretiens qualitatifs à l'analyse empirique des mesures de concentration révèle un caractère essentiel, contribuant à la compréhension des relevés des micro-capteurs au regard notamment de la localisation géographique, des activités réalisées et du mode de transport emprunté. Un déploiement à grande échelle de cette technologie permettrait de formuler des recommandations plus précises quant à la qualité de l'air et aux mesures de gestion de la pollution sur un territoire donné. À ce titre, il convient de souligner que ces recommandations doivent avoir trait à l'accès et au partage des données produites par ces instruments proposant une mesure individualisée et contextualisée de la pollution. Il s'agit d'un enjeu important qui renvoie à la manière dont on peut solliciter les deux leviers que sont, d'une part, l'intelligence portée par la technologie et, d'autre part, celle dite citoyenne qui transparait du comportement des usagers, dans l'exercice de mise en œuvre des politiques de lutte contre la pollution de l'air.

- 63 Dans cet article, la complexité du phénomène de la pollution de l'air s'est exprimée au travers de l'hétérogénéité des mesures de concentration au sein des cohortes et des microenvironnements. Cette complexité transparait aussi dans la difficulté de concilier des stratégies individuelles avec l'action collective, ainsi que des enjeux aussi considérables que les enjeux climatiques, environnementaux et sanitaires dans les politiques urbaines. Les débats actuels demeurent centrés sur la "densité" alors que la dynamique de métropolisation nécessite d'intégrer d'autres dimensions telles que la taille désirable d'une ville (par référence à la population totale) ou le "clustering" (en lien avec la proximité physique entre des zones denses), notamment dans le cadre du Grand Paris.

BIBLIOGRAPHIE

- Abboud M., El Hafyani H., Zuo J.N., Zeitouni K., Taher Y., 2021, *Micro-environment recognition in the context of environmental crowdsensing*, EDBT/ICDT-WS.
- Airparif, 2012, *Caractérisation de la qualité de l'air à proximité des voies à grande circulation - 3e volet, modélisation de la pollution atmosphérique à proximité des axes routiers les plus importants d'Île-de-France*, 72 p., [en ligne]. URL : http://www.airparif.asso.fr/_pdf/publications/prox-vgcrapport_121205.pdf
- Airparif, 2017, *Bilan de la qualité de l'air. Année 2017*, Rapport Airparif, 110 p.
- Airparif, 2020, *Bilan de la qualité de l'air en Île-de-France*, [en ligne]. URL : https://www.airparif.asso.fr/_pdf/publications/bilan-2019.pdf
- Apparicio P., Gelb J., Mathieu M.È., 2019, "Un atlas-web pour comparer l'exposition individuelle aux pollutions atmosphérique et sonore selon le mode de transport", *Cybergeog : European Journal of Geography*, document 903, [en ligne]. URL : <http://journals.openedition.org/cybergeog/32391>
- Bertrand J., Prédali F., 2019, *Améliorer la desserte des îles de loisirs*, IAU IDF.
- Bulot F.M., Johnston S.J., Basford P.J., et al., 2019, "Long-term field comparison of multiple low-cost particulate matter sensors in an outdoor urban environment", *Scientific reports*, vol. 9, No.1, 1-13.
- Chardonnel S., Talandier M., Tabaka K., André-Poyaud I., 2017, "Centralités des espaces périphériques et complémentarités territoriales : un enjeu de durabilité pour la Région Urbaine de Grenoble", *Environnement Urbain/Urban Environment*, vol. 2, 25 p., [en ligne]. URL : <http://journals.openedition.org/eue/2074>
- Charmes E., 2010, "La densification en débat", *Études foncières*, vol. 145, 20-23.
- Chen C., Zeger S., Breyse P., Katz J., Checkley W., Curriero F.C., Tielsch J.M., 2016, "Estimating indoor PM2.5 and CO concentrations in households in Southern Nepal: the Nepal cookstove intervention trials", *PLoS ONE*, vol. 11, No.7, 17 p., [en ligne]. URL : <https://ideas.repec.org/a/plo/pone00/0157984.html>

- Coll I., Elessa Etuman A., 2019, "Modélisation de l'exposition en zone urbaine : les limites d'une approche techniciste, un nécessaire couplage entre avancées technologiques et comportement des individus", *Pollution atmosphérique*, No.237-238, 6 p.
- Curto A., Donaire-Gonzalez D., Barrera-Gómez J., Marshall J.D., Nieuwenhuijsen M.J., Wellenius G.A., Tonne C., 2018, "Performance of low-cost monitors to assess household air pollution", *Environmental research*, vol. 163, 53-63.
- Delaunay C., Goupil G., Ravelomanantsoa H., Person A., Mazoue S., Morawski F., 2012, "Évaluation de l'exposition des citoyens aux polluants atmosphériques au cours de leurs déplacements dans l'agglomération parisienne", *Pollution atmosphérique*, vol. 215, 247-258.
- Dias D., Tchepel O., 2018, "Spatial and temporal dynamics in air pollution exposure assessment", *International journal of environmental research and public health*, vol. 15, No.3, 558 p., [en ligne]. URL : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5877103/>
- DRIEE (Direction Régionale et Interdépartementale de l'Environnement et de l'Énergie), 2018, Feuille de route pour la qualité de l'air – les pouvoirs publics franciliens s'engagent, 42 p., [en ligne]. URL : http://www.driee.ile-de-france.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/projet_feuille_de_route_v15.pdf.
- Duché S., 2013, *La pollution de l'air en région parisienne : exposition et perception sur sites touristiques*, Thèse de Doctorat en Géographie, Université Paris Diderot.
- El Hafyani H., Zeitouni K., Taher Y., 2020, *Leveraging Change Point Detection for Activity Transition Mining in the Context of Environmental Crowdsensing*, SIGKDD International Workshop on Urban Computing, UrbComp, vol. 1, 64 p.
- Gabrys J., 2019, "Sensors and sensing practices: Reworking experience across entities, environments, and technologies", *Science, Technology, & Human Values*, vol. 44, No.5, 723-736.
- Geny B., Charles A.L., Lejay A., Meyer A., 2019, "Pollution et stress oxydant", *Revue Française d'Allergologie*, vol. 59, No.3, 174-176.
- Gibelin P., 2019 "Pollution et maladies cardiovasculaires", *Bulletin de l'Académie Nationale de Médecine*, vol. 203, No.3-4, 201-208.
- Gilliland J., Maltby M., Xu X., Luginaah I., Loebach J., Shah T., 2019, "Is active travel a breath of fresh air? Examining children's exposure to air pollution during the school commute", *Spatial and spatio-temporal epidemiology*, vol. 29, 51-57.
- Glandu L.M., Beltrando G., 2013, "Les déplacements urbains et la pollution de l'air dans des villes intermédiaires : enjeux politiques et environnementaux", *Norois. Environnement, aménagement, société*, No.226, 25-40.
- Grange D., Host S., 2012, *Pollution de l'air dans les enceintes souterraines de transport ferroviaire et santé*, Observatoire régional de santé Île-de-France, Paris, France, Tech. Rep.
- Haaland C., Van Den Bosch C.K., 2015, "Challenges and strategies for urban green-space planning in cities undergoing densification: A review", *Urban forestry & urban greening*, vol. 14, No.4, 760-771, [en ligne]. URL : <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20163033716>
- HCSP (Haut Conseil de la Santé Publique), 2013, *Valeurs repères d'aide à la gestion dans l'air des espaces clos - les particules*, 70 p., [en ligne]. URL : https://www.hcsp.fr/Explore.cgi/Telecharger?NomFichier=hcsp20130614_valrepgestairespclosparticules.pdf
- Host S., 2013, "Exposition à la pollution atmosphérique liée au trafic routier et risques sanitaires" *VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement*, Hors-série No.15.

- Insee (Institut national de la statistique et des études économiques), état civil en géographie au 01/01/2020, [en ligne]. URL : <https://www.insee.fr/fr/statistiques/1405599?geo=FRANCE-1>
- Institut Paris Région, Île-de-France Mobilités, 2019, [en ligne]. URL : <https://www.institutparisregion.fr/mobilite-et-transport/modes-actifs/territoires-cyclables.html>
- Joly F., 2014, "« Qualité de l'air et établissements recevant des publics sensibles ». Territoires, incubateurs de santé ?", *Les Cahiers de l'IAU ÎdF*, No.170-171, [en ligne]. URL : <https://www.institutparisregion.fr/nos-travaux/publications/territoires-incubateurs-de-sante/>
- Joly F., Honoré C., Perrussel O., Pernot P., Dugay F., Mahé F., Kauffmann A., 2015, "Évolution de la qualité de l'air à Paris entre 2002 et 2012", *Pollution atmosphérique*, No.220, 15 p.
- Kaufmann V., 2008, *Les paradoxes de la mobilité : bouger, s'enraciner*, vol. 46, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 115 p.
- Landrigan P.J., Fuller R., Fisher S., Suk W.A., Sly P., Chiles T.C., Bose-O'Reilly S., 2019, "Pollution and children's health", *Science of the Total Environment*, vol. 650, 2389-2394.
- Languille B., Gros V., Bonnaire N., Pommier C., Honoré C., Debert C., Gauvin L., Srairi S., Annesi-Maesano I., Chaix B., Zeitouni K., 2020, "A methodology for the characterization of portable sensors for air quality measure with the goal of deployment in citizen science", *Science of the Total Environment*, vol. 708, 12 p.
- LCSQA, 2019, *Utilisation des données de micro-capteurs pour la modélisation et la cartographie de la qualité de l'air* (Novembre 2019 –Gressent A., Malherbe L., Bessagnet B., INERIS), [en ligne]. URL : https://www.lcsqa.org/system/files/documents/LCSQA2019_cartographie_capteurs.pdf
- Loubet B., Feiz, A. A., Durand B., et al., 2011, Pollutions de proximité, transport et agriculture (PPTA). In *Colloque de présentation des travaux : La qualité de l'air dans nos environnements de proximité*, Lyon, France, Primequal-Predit, 39-45.
- Maignant G., 2007, "Dispersion de polluants et morphologie urbaine", *L'espace géographique*, vol. 36, No.2, 141-154.
- Métropole du Grand Paris, 2021, *Mise en œuvre de la zone à faibles émissions mobilité métropolitaine étape 2 Dossier De Consultation*, [en ligne]. URL : https://www.saint-ouen.fr/fileadmin/user_upload/fichiers/SIP/Environnement_et_espaces_verts/ZFE/Dossier_consultation_etape2_ZFE.pdf
- Moltchanov S., Levy I., Etzion Y., Lerner U., Broday D.M., Fishbain B., 2015, "On the feasibility of measuring urban air pollution by wireless distributed sensor networks", *Science of The Total Environment*, vol. 502, 537-547.
- Motlagh N.H., Lagerspetz E., Nurmi P., Li X., et al., 2020, "Toward massive scale air quality monitoring", *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, No.2, 54-59.
- Kirchner S., Arenes J.F., Cochet C., Derbez M., Duboudin C., Elias P., Gregoire A., Jedor B., Lucas J.P., Pasquier N., Pigneret M., Ramalho O., 2007, *Campagne nationale logements : État de la qualité de l'air dans les logements français*, Observatoire de la qualité de l'air intérieur, Rapport final, DDD/SB-2006-57, 183 p.
- Pant P., Habib G., Marshall J.D., Peltier R.E., 2017, "PM2.5 exposure in highly polluted cities: A case study from New Delhi, India", *Environmental research*, vol. 156, 167-174. [en ligne]. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28349881/>
- Papp E., Nagy D., Szoboszlai Z., et al., 2020, "Investigation of aerosol pollution inside trams in Debrecen, Hungary", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions*

with *Materials and Atoms*, vol. 477, 138-143. [en ligne]. URL : <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020NIMPB.477..138P/abstract>

Park Y.M., 2020, "Assessing personal exposure to traffic-related air pollution using individual travel-activity diary data and an on-road source air dispersion model", *Health & Place*, vol. 63, 10 p., [en ligne]. URL: <https://europepmc.org/article/med/32543437>

Pritchard H., Gabrys J., Houston L., 2018, "Re-calibrating DIY: Testing digital participation across dust sensors, fry pans and environmental pollution", *new media & society*, vol. 20, No.12, 4533-4552.

Quénol H., Bridier S., Frangi J.P., Beltrando G., De Rosny G., 2006, "Space-time variability factors from air pollution inside Paris by CO measurement", *Erdkunde*, vol. 60, No.1, 40-50.

Raibaud Y., 2012, "Genre et espaces du temps libre", *L'information géographique*, vol. 76, No.2, 40-56.

Ramalho O., Lucas J.P., Mandin C., Derbez M., Kirchner S., 2012, "Niveaux de particules dans les environnements intérieurs en France", *Pollution Atmosphérique : climat, santé, société*, vol. spécial, 37-42.

Rouïl L., Bessagnet B., Favez O., Leoz-Garziandia E., Meleux F., 2015, Épisodes de pollution particulaire en France : quels enseignements tirer des récents épisodes ?, *Pollution atmosphérique*, N° spécial « Les épisodes de forte pollution des années 2013 et 2014 : un retour d'expérience », 101-114.

Roussel I., 2014, *La qualité de l'air et ses enjeux*.

Ryan P.H., Son S.Y., Wolfe C., Lockey J., Brokamp C., LeMasters G., 2015, "A field application of a personal sensor for ultrafine particle exposure in children", *Science of the Total Environment*, vol. 508, 366-373, [en ligne]. URL : <https://pubag.nal.usda.gov/catalog/5456726>

Sagot M., Louchart P., 2017, "Le quotidien des franciliens à travers leurs déplacements : une multitude d'agendas", Note rapide No.745, IAU IDF.

Saïdi N., Planchon M., Deloitte Développement Durable, Allard L., 2017, *Étude des liens entre données individuelles de la qualité de l'air, changements de comportement et mises en œuvre de pratiques favorables à l'air*, Rapport. ADEME, 102 p.

Schindler M., Caruso G., 2014, "Urban compactness and the trade-off between air pollution emission and exposure: Lessons from a spatially explicit theoretical model", *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 45, 13-23.

Schneider H., Frison K., Wagner J., Butz A., 2016, "CrowdUX: A Case for Using Widespread and Lightweight Tools in the Quest for UX", In *Proceedings of the 2016 ACM Conference on Designing Interactive Systems*, New York, NY, USA: ACM, 415-426, [en ligne]. URL: <https://epub.uni-muenchen.de/47293/>

Tran P.T., Adam M.G., Tham K.W., et al., 2021, "Assessment and mitigation of personal exposure to particulate air pollution in cities: An exploratory study", *Sustainable Cities and Society*, vol. 72, 13 p.

Valari M., Markakis K., Powaga E., Collignan B., Perrussel O., 2020, "EXPLUME v1.0: a model for personal exposure to ambient O₃ and PM_{2.5}", *Geosci. Model Dev.*, vol. 13, 1075-1094

Van Roosbroeck S., Li R., HoeSk G., Lebret E., Brunekreef B., Spiegelman D., 2008, "Traffic-related outdoor air pollution and respiratory symptoms in children: the impact of adjustment for exposure measurement error", *Epidemiology*, vol. 19, No.3, 409-416.

Vardoulakis S., Gonzalez-Flesca N., Fisher B.E., Pericleous K., 2005, "Spatial variability of air pollution in the vicinity of a permanent monitoring station in central Paris", *Atmospheric Environment*, vol. 39, No.15, 2725-2736

NOTES

1. [en ligne]. URL : <http://www.santepubliquefrance.fr/Accueil-Presse/Tous-les-communiques/Impacts-sanitaires-de-la-pollution-de-l-air-en-France-nouvelles-donnees-et-perspectives>
2. Institut national de la statistique et des études économiques
3. Il s'agit notamment de gaz, de liquides semi volatiles et de particules.
4. [en ligne]. URL : <http://polluscope.uvsq.fr>
5. Il s'agit ici des lieux de domicile et de travail, des parcs, des véhicules, des routes, des souterrains, etc.
6. VGP (Versailles Grand Parc) est une structure intercommunale regroupant 18 communes localisées dans les départements des Yvelines et de l'Essonne.
7. Porté en permanence ou posé à proximité (très proche) quand il s'agit du domicile.
8. Pour chaque participant, le budget espace-temps rend compte de la manière dont le temps est réparti entre les différents microenvironnements.
9. Dans le cadre du projet Polluscope, une campagne d'évaluation a été menée en 2017, afin de tester la fiabilité (en mode statique et en mobilité) de différents types de micro-capteurs en parallèle avec les données issues des stations réglementaires et des données de modélisation (Languille *et al.*, 2020). Cette campagne a conclu à la sélection des trois capteurs AE51, Cairclip et Canarin (figure 2) déployés ici pour la collecte de données.
10. Le coefficient de variation pour une variable quantitative est égal au quotient de l'écart-type par la moyenne. Il mesure pour chaque échantillon, "l'écart-type par une unité de moyenne".
11. Observatoire de la qualité de l'air intérieur (OQAI) Campagne nationale logements : état de la qualité de l'air dans les logements français, Rapport final 2006.
12. Haut Conseil de la Santé Publique (HCSP), 2013, *Valeurs repères d'aide à la gestion dans l'air des espaces clos - les particules*. Disponible en ligne : https://www.hcsp.fr/Explore.cgi/Telecharger?NomFichier=hcspr20130614_valrepgestairespclosparticules.pdf.
13. Bertrand J., Prédali F., 2019, *Améliorer la desserte des îles de loisirs*, IAU IDF.
14. L'objectif de qualité correspond au niveau de concentration de substances polluantes dans l'atmosphère qu'il s'agit d'atteindre dans une perspective de long terme, sauf lorsque cela n'est pas réalisable par des mesures proportionnées, afin d'assurer une protection efficace de la santé humaine et de l'environnement dans son ensemble.
15. Définies par les directives européennes, les valeurs limites correspondent à un niveau fixé dans le but d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs sur la santé humaine et/ou l'environnement dans son ensemble, à atteindre dans un délai donné et à ne pas dépasser une fois atteint.
16. Les valeurs cibles, définies par les directives européennes, correspondent à un niveau fixé dans le but d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs sur la santé humaine et l'environnement dans son ensemble, à atteindre dans la mesure du possible sur une période donnée.
17. Sagot M., Louchart P., 2017, "Le quotidien des franciliens à travers leurs déplacements : une multitude d'agendas", Note rapide No.745, IAU IDF.
18. Les types d'aménagements cyclables ont été affinés à l'aide des données sur la cyclabilité du territoire : https://cartoviz.institutparisregion.fr/?id_appli=voiescyclables&x=640256.6229988104&y=6857768.152971707&zoom=12

19. Métropole du Grand Paris, 2021, *Mise en œuvre de la zone à faibles émissions mobilité métropolitaine étape 2* Dossier De Consultation, [en ligne]. URL : https://www.saint-ouen.fr/fileadmin/user_upload/fichiers/SIP/Environnement_et_espaces_verts/ZFE/Dossier_consultation_etape2_ZFE.pdf
20. Institut Paris Région, Île-de-France Mobilités - Février 2019, [en ligne]. URL : <https://www.institutparisregion.fr/mobilite-et-transports/modes-actifs/territoires-cyclables.html>
-

RÉSUMÉS

La qualité de l'air est un sujet majeur des politiques urbaines, qui mettent en place des appareils de mesure réglementaires et des outils de modélisation à fine échelle pour assurer la surveillance de la pollution de l'air ambiant. L'usage récent d'équipements mobiles et connectés apporte un complément très précieux à ces dispositifs, permettant de démultiplier les observations et d'offrir des données indicatives en temps réel sur l'exposition individuelle dans tous les environnements. Cet article analyse l'exposition individuelle aux polluants NO_2 , $\text{PM}_{2.5}$ et Black Carbon (BC) en s'appuyant sur des relevés de micro-capteurs géolocalisés et embarqués par quatre-vingt-huit participants volontaires de deux cohortes en Île-de-France. Cette démarche est complétée par des entretiens avec huit des participants des cohortes et dix acteurs institutionnels. Nos résultats révèlent de fortes variations des expositions selon le polluant, en fonction des microenvironnements fréquentés (domicile, travail, transports, autres lieux), des modes de transport et de certaines activités quotidiennes. Outre les navettes domicile-travail, cet article souligne une exposition additionnelle, notamment aux $\text{PM}_{2.5}$ durant les week-end, au sein et lors de déplacements vers les microenvironnements "autres lieux" regroupant des espaces intérieurs et extérieurs dédiés au temps-libre. Des pics de concentration de polluants lors de déplacements d'individus par tramway et en vélo sont interprétés dans leurs contextes spécifiques. Une analyse synthétique de l'ensemble de nos résultats montre que les comportements de mobilités et l'intensité de l'exposition dans certains microenvironnements méritent une attention particulière du point de vue de la qualité de l'air.

Air quality is a major issue for urban policies, which implement regulatory monitoring devices and fine-scale modelling tools to monitor air pollution. Recently, mobile and connected devices have been used as a valuable tool in this regard, allowing more observations and real-time indicative data on individual exposure in all environments. In this article, individual exposure to the pollutants $\text{PM}_{2.5}$, NO_2 and Black Carbon (BC) is analysed based on geolocated and embedded micro-sensor observations from eighty-eight voluntary participants of two cohorts in Île-de-France. This data was complemented by interviews with eight of the cohorts' participants and ten institutional stakeholders. Our findings reveal wide variations in exposure depending on the pollutant, on the microenvironment ("home", "work", "transport", "other places"), on the transport modes and on particular daily activities. In addition to commuting, this paper highlights additional exposure, particularly to $\text{PM}_{2.5}$ during weekends, within and when travelling to the microenvironment "other places" that include indoor and outdoor leisure time spaces. Peaks of pollutant concentration during some individual travel by tram and bicycle are interpreted in their specific contexts. An analytical synthesis of all our results shows that mobility behavior and exposure intensity in some specific microenvironments require particular attention from an air quality perspective.

La calidad del aire es una temática fundamental en las políticas urbanas. Estas propician la instalación de aparatos para la medición según determinadas normas, permitiendo además una fina modelización para garantizar la vigilancia de la contaminación del aire. El uso reciente de equipos móviles y conectados, aporta de manera robusta a generar mayores observaciones y ofrecer datos indicativos en tiempo real sobre la exposición individual en el medioambiente en general. Este artículo analiza la exposición individual a los elementos contaminantes NO₂, PM_{2,5} y Black Carbon (BC) apoyándose de datos obtenidos por micro captadores geolocalizados e instalados por ochenta y ocho participantes voluntarios divididos en dos cohortes en Île-de-France. Este procedimiento es complementado con ocho y diez entrevistas a los participantes de las cohortes y actores institucionales respectivamente. Nuestros resultados revelan fuertes variaciones de las exposiciones según el contaminante, en función de los micro ambientes frecuentados (domicilio, trabajo, transportes, otros lugares), los modos de transporte y ciertas actividades cotidianas. Además de los desplazamientos por motivos de trabajo, destacan con una exposición adicional, principalmente de PM_{2,5} durante los fines de semana, dentro y durante los desplazamientos hacia micro ambientes llamados "otros lugares", que implican espacios interiores y exteriores dedicados al ocio. Sumando a lo anterior, se interpretan en sus contextos específicos las alzas de concentración de contaminantes durante los desplazamientos de individuos en tranvías y bicicleta. Un análisis sintético del conjunto de nuestros resultados, expresa que los comportamientos de movilidad e intensidad de la exposición en ciertos micro ambientes ameritan una atención particular desde el punto de vista de la calidad del aire.

INDEX

geographyun 908, 926, 250

Palabras claves : calidad del aire, contaminación atmosférica, exposición, análisis espacio-temporal, espacio-tiempo cotidiano, partículas finas, movimientos pendulares, comportamiento de movilidad, políticas urbanas

Mots-clés : qualité de l'air, pollution atmosphérique, exposition, analyse spatio-temporelle, espace-temps quotidien, particules fines, navette domicile-travail, comportement de mobilité, politiques urbaines

Keywords : air quality, atmospheric pollution, exposure, spatio-temporal analysis, everyday life space, particulate matter, commuting, mobility behavior, urban policies

AUTEURS

NABIL TOULI

UMR SAD-APT, AgroParisTech, INRAE, Université Paris-Saclay, France
nabil.touili@inrae.fr

KATIA RADJA

Laboratoire CEARC, UVSQ, Université Paris-Saclay, France
katia.radja@uvsq.fr

PATRICK SCHEMBRI

Laboratoire CEARC, UVSQ, Université Paris-Saclay, France
patrick.schembri@uvsq.fr

AHMAD KTAISH

Laboratoire DAVID, UVSQ, Université Paris-Saclay, France
ahmad.ktaish@uvsq.fr

KARINE ZEITOUNI

Laboratoire DAVID, UVSQ, Université Paris-Saclay, France
karine.zeitouni@uvsq.fr

BASILE CHAIX

INSERM (Institut national de la santé et de la recherche médicale), France
basile.chaix@iplesp.upmc.fr

ISABELLA ANNESI-MAESANO

INSERM (Institut national de la santé et de la recherche médicale), France
isabella.annesi-maesano@inserm.fr

BORIS DESSIMOND

INSERM (Institut national de la santé et de la recherche médicale), France
dessimondboris@gmail.com

JEAN-MARC NAUDE

CEREMA (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement), France
jean-marc.naude@cerema.fr

SALIM SRAIRI

CEREMA (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement), France
Salim.Srairi@cerema.fr

HAFSA EL-HAFYANI

Laboratoire DAVID, UVSQ, Université Paris-Saclay, France
hafsa.el-hafyani@uvsq.fr