

Exposition urbaine à la pollution de l'air: Une expérience à l'aide de micro-capteurs individuels en Île-de-France

Patrick Schembri, UVSQ/Univ. Paris Saclay, patrick.schembri@uvsq.fr

Nabil TOUILI, UMR SADAPT, INRAE, nabil.touili@inrae.fr

Plan de la présentation

- **Introduction contextuelle**
- **Démarche scientifique**
- **Principaux résultats**
- **Discussion générale**

Introduction contextuelle

↓
Qualité de l'air : Un enjeu majeur pour les politiques urbaines

- Santé, Environnement et Climat
- Mobicit'Air, CitizenSense, Luftdaten, Ambassad'air, AirCasting, etc.

↓
Projet Polluscope : Des campagnes de mesures

- Observatoire participatif pour la surveillance de l'exposition individuelle à la pollution de l'air
- Capteurs individuels

↓
Urbanisation : Ville et métropole du Grand Paris

- **IRS ACE-ICSEN** (Adaptation aux Changements Environnementaux de l'Institut des Changements Socio-Environnementaux)

Introduction contextuelle

Remerciements

- Katia RADJA, Ahmad Ktaich, Karine Zeitouni, Basile Chaix, Boris Dessimond, Isabella Annesi-Maesano, Jean-Marc Naude, Salim Srairi
- Sophie Godin-Beekmann

Objectif de l'expérience

Qui est exposé à quoi ? Quand ? Où ? En faisant quoi ? Pendant combien de temps ?

- Caractériser les expositions « individuelles » aux polluants réglementaires $PM_{2.5}$, NO_2 et **Black Carbon (BC)**

Échantillon d'individus



Objectif de l'expérience

Expositions individuelles (et leurs variabilités) selon:

- Les « microenvironnements »
- Les « modes de transport »
- Les « activités quotidiennes/événements »
- Horaires « jours de la semaine » / « week-end »

Pratiques individuelles, collectives et politiques publiques :

- Mobilité urbaine
- Changements de comportements
- Des actions/plans de gestion

Données mobilisées

Couplage données « quanti-quali »

- Des relevés de mesures quotidiens
 - Collecte et traitement quantitatifs et analyse
- Données qualitatives/entretiens semi structurés
 - Analyse thématique

Interdisciplinarité

- Sciences économiques
- Aménagement-Géographie
- Sciences de données spatiales et temporelles
- Santé-environnement

(Nouvel) Outil technologique : micro-capteurs portatifs et géo-localisés

- Expérience humaine
- Données **(relativement)** fiables (Vs stations de mesures réglementaires)

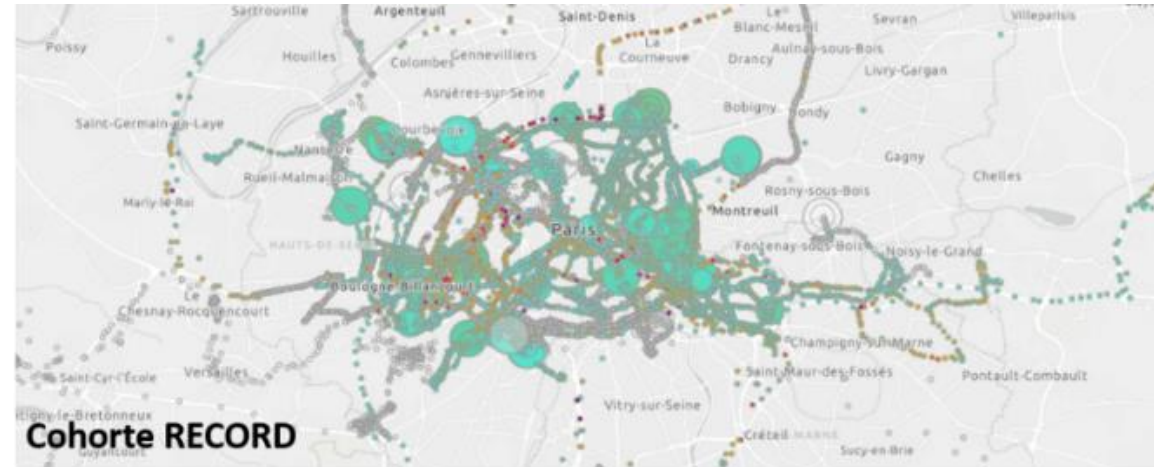
- Des équipes pluri-disciplinaires
 - Laboratoire DAVID
 - CEREMA
 - CEARC
 - INSERM
- Acteurs territoriaux/institutionnels
 - ORS
 - SPSE
 - Marie de la ville de Paris
 - ADEME
 - DGEC
 - ...etc.

Démarche suivie (1)

Deux cohortes
"citizen-based monitoring"

88 participants volontaires

- **Cohorte RECORD** (Residential Environment and CORonary heart Disease)
 - 25 participants
 - Juin-Septembre 2019
- **Cohorte VGP** (Versailles Grand Parc)
 - 63 participants
 - Octobre-décembre 2019



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

Démarche suivie (2)

Des micro-capteurs portatifs
Et géo-localisés

- Canarin (PM₁₀ / PM_{2,5} / PM₁, humidité et température)



- Cairsens (NO₂)



- AE51 (Carbone suie)



- + **Tablette** (GPS et activité)



L'équipement « micro-capteurs »

- Une vocation indicative et une **fiabilité relative**
- Équipements mobiles et géo localisés/ un instant donné
- Protocole d'évaluation/reproductibilité
 - Projet « POLLUSCOPE »
- Pas de temps = 1 mn

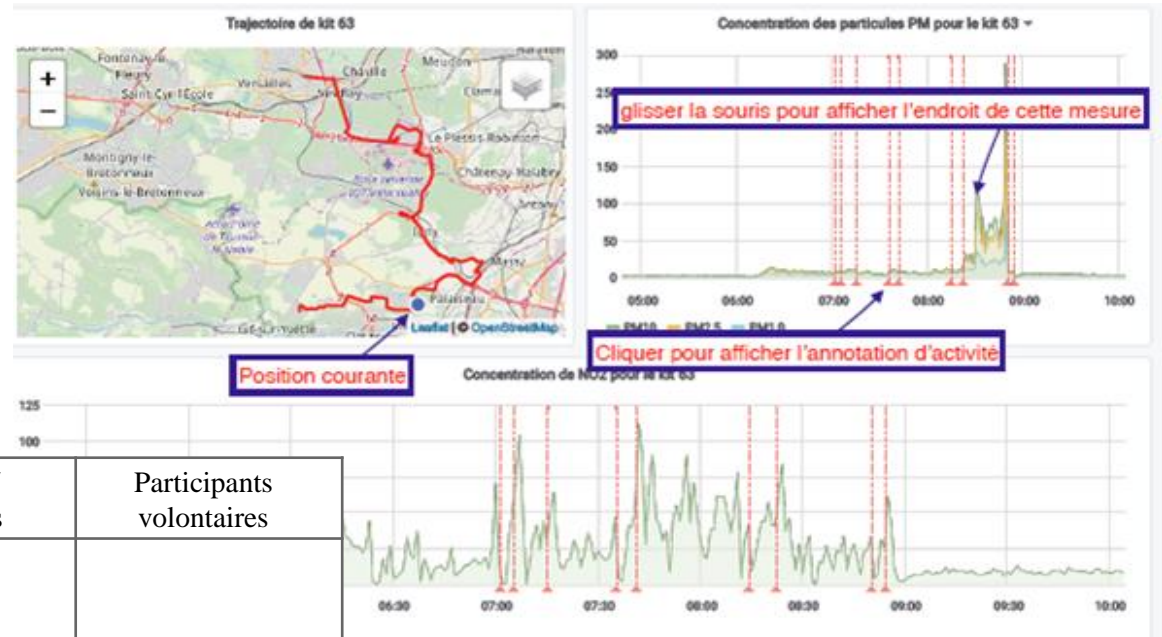
Lieux : Domicile, travail, transport, autres lieux

Moyens de déplacement (voiture, métro, train, tramway, bus, moto, vélo, marche à pied)

Activités réalisées (sport, balade/promenade de chien, restauration, cinéma, faire les magasins, etc.).

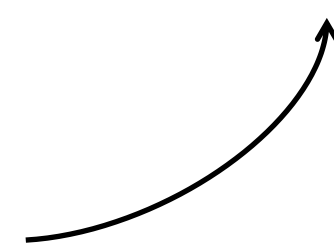
Démarche suivie (3)

COUPLAGE DE DONNÉES



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

cartographiques de l'exposition d'un individu à un instant



Résultats (1)

EXPOSITIONS PAR MICROENVIRONNEMENTS

Un (dé)centrage des valeurs « médianes », notamment dans les transports et autres lieux (Vs lieux du domicile et travail.

De fortes dispersions dans les microenvironnements "transport" et "autres", notamment pour la cohorte RECORD.

Le **budget espace-temps** : le temps dédié entre les différents microenvironnements fréquentés .

....**Prudence** quant à l'interprétation des valeurs moyennes pour l'analyse des expositions

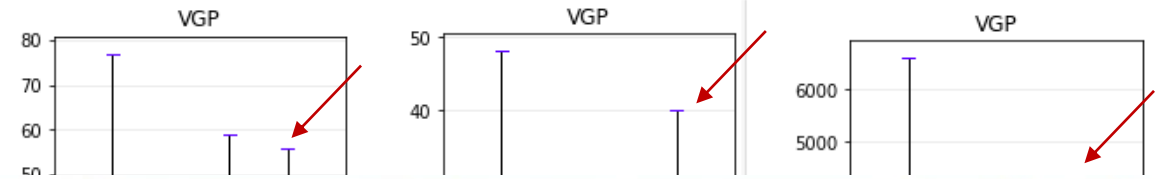
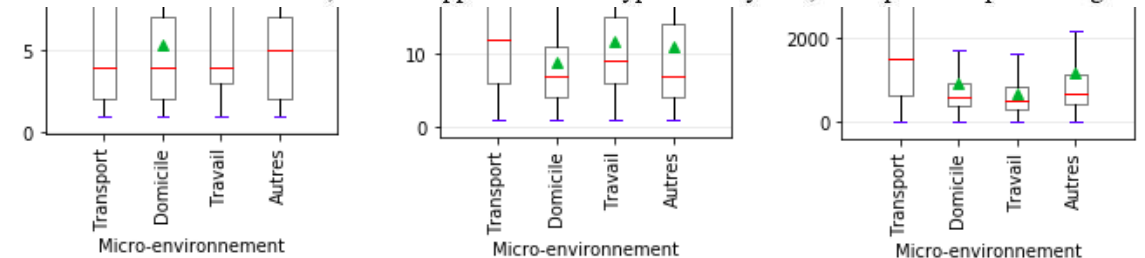


Tableau 3 : Résumé statistique pour les budgets espace-temps par microenvironnements pour chacune des deux cohortes

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.



Résultats (1')

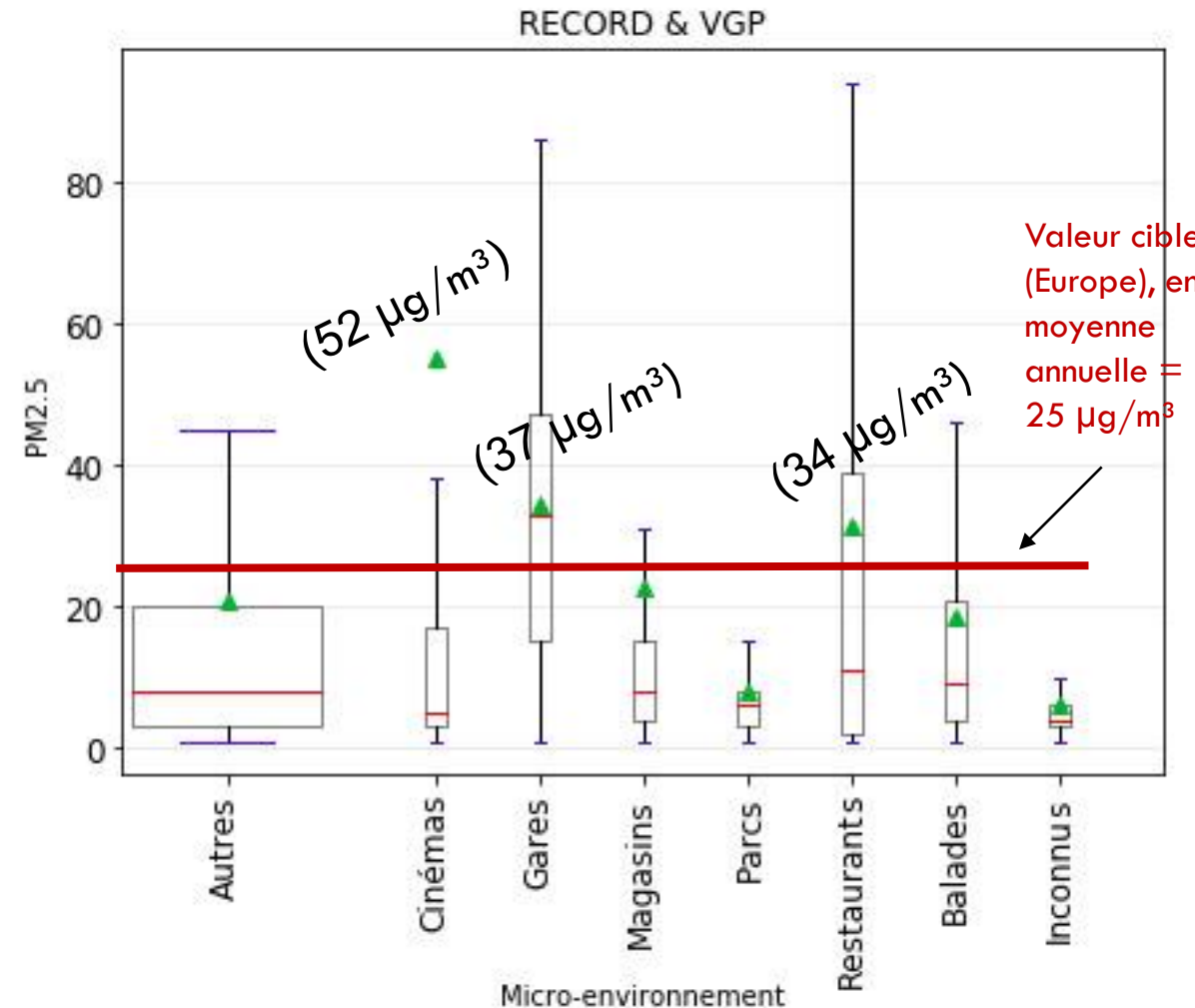
EXPOSITIONS DANS « AUTRES LIEUX »

Une exposition **additionnelle** en PM_{2.5} associée aux "autres lieux" et aux déplacements vers ces "autres lieux"

Des microenvironnements sociaux dédiés aux loisirs, aux activités récréatives, socio-culturelles, associatives ou sportives, au sein de divers espaces (intérieurs et extérieurs)

Une hausse du temps (quotidien) alloué aux loisirs

.....Des déplacements hors navettes domicile-travail ? **Oui**



Résultats (1")

Quelle(s) lecture(s) et dimension(s) d'analyse(s) des expositions ?

- **Une navette** domicile-travail
- Deux navettes **additionnelles**

Quel(s) motif(s) de déplacements quotidiens ?

- Multi-motifs (achats, loisirs, restauration, parcs, etc.) dans le cadre des déplacements quotidiens.
- Un chaînage de déplacements !
 - Avec passage par le domicile
 - Sans passage par le domicile

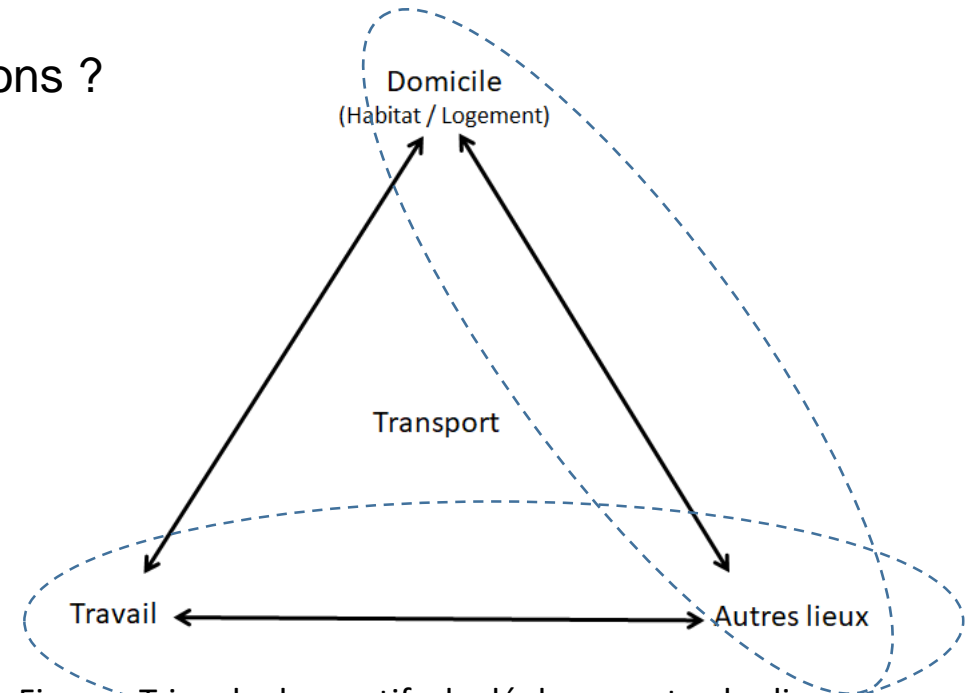


Figure : Triangle des motifs de déplacements, des lieux d'exposition et des leviers d'action des politiques de mobilité

Quel(s) impact(s) sur les politiques de mobilités/densifications urbaines ?

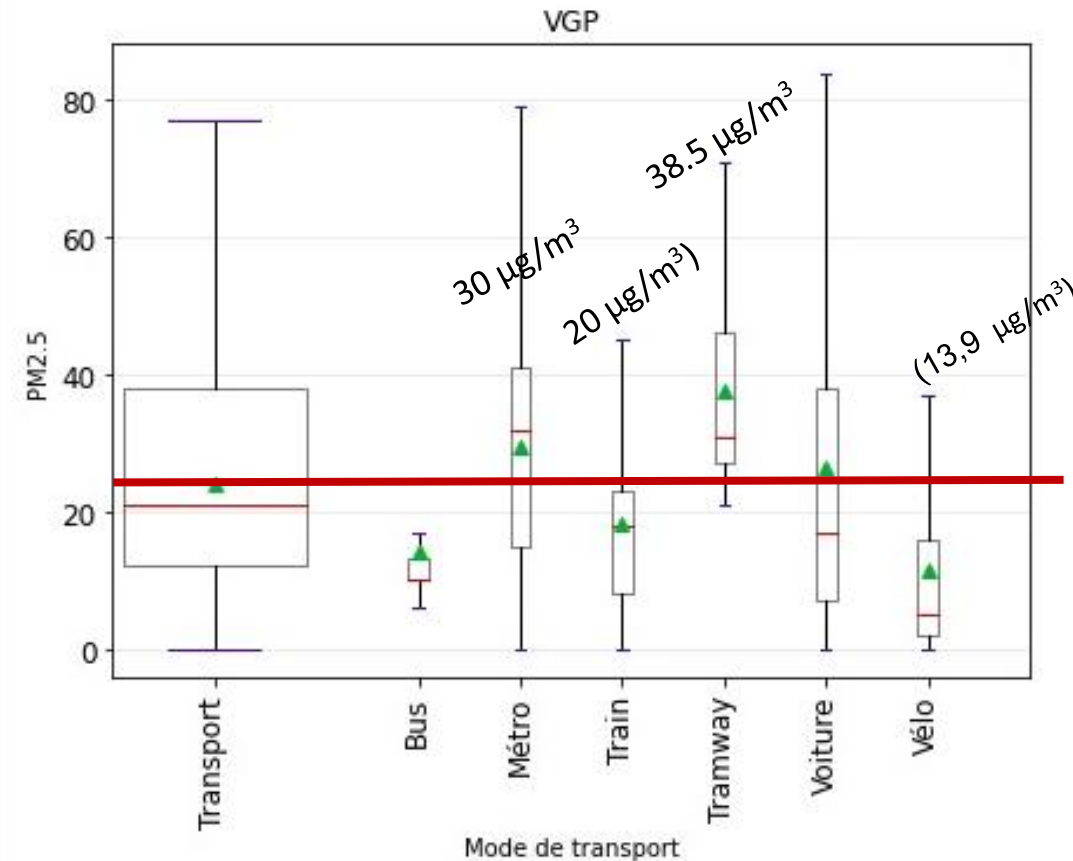
- Mobilités pendulaires (Vs des mobilités triangulaires)
- Ville compacte et Mixité fonctionnelle : concentration des lieux d'habitat, d'emploi mais aussi de loisirs/services

Résultats (2)

- La plus faible concentration moyennedéplacement en **vélo**
- Une forte concentration moyenne déplacement en **tramway**
- Un niveau médian d'exposition à des concentrations de **40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** en $\text{PM}_{2.5}$, a été relevé par d'autres travaux (Delaunay *et al.*, 2012)

La catégorie "trains", regroupant des lignes essentiellement aériennes

- e.g., lignes souterraines (métro parisien et RER) où des niveaux médians de $\text{PM}_{2.5}$ (**119 à 155 $\mu\text{g}/\text{m}^3$**) (Delaunay *et al.*, 2012 ; Grange, Host, 2012).



Coefficient de corrélation linéaire (r) VGP-RECORD

- $r = 0,75$ (Déplacements en "voiture".)
- $r = 0,64$ (Déplacements en "train")
- $r = 0,33$ (Déplacements en "tramways")

Résultats (2')

DÉPLACEMENTS PAR TRAMWAY

Des pics de concentration brefs/ponctuels lors de trajets :

- "Vélizy 2" - "Meudon la forêt", atteignant ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$)
 - pollution ambiante à l'interface entre le tracé du tramway, la D57, et la N118
- Pôle d'échange/correspondance tramway-métro ($65 \mu\text{g}/\text{m}^3$).
 - Inter-croisements (tramway-métro, réseaux ferrés, axes routiers RD 906 et D63, station de bus et parkings)

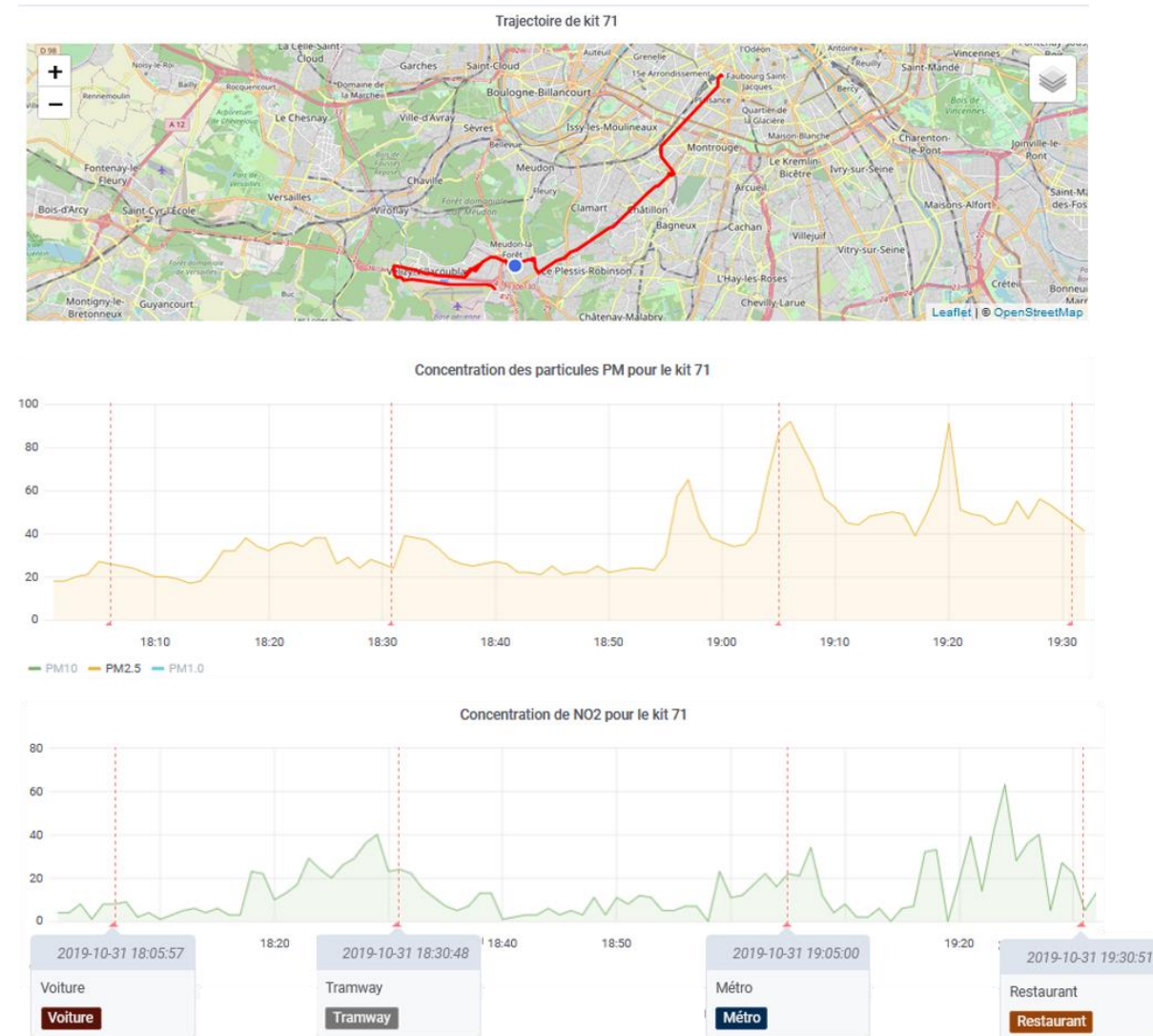
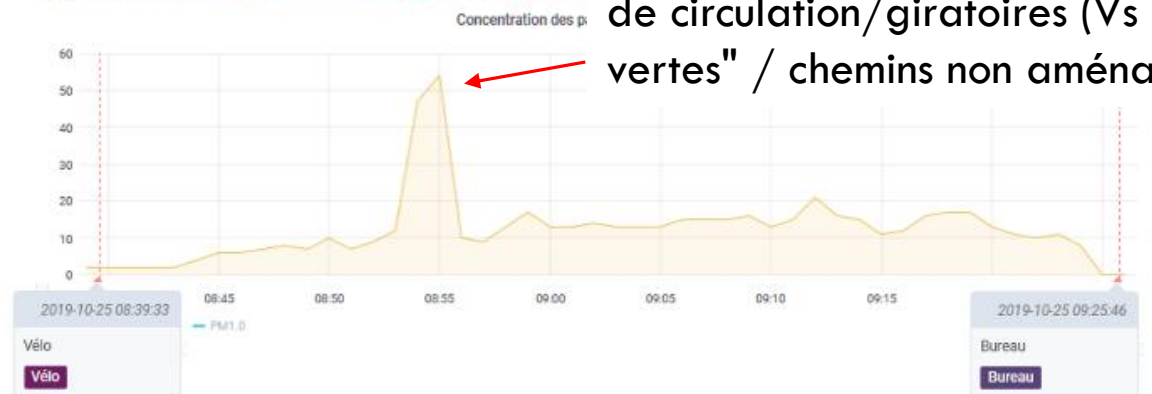
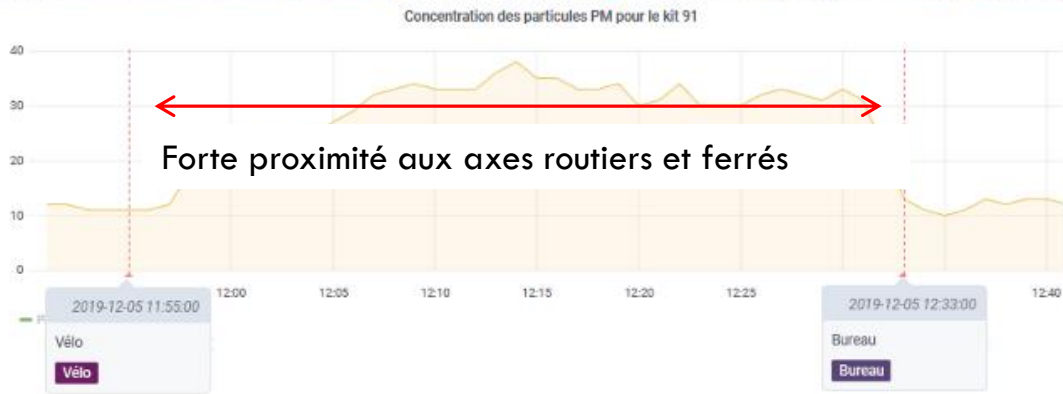


Figure : Exemple de l'exposition d'un participant lors d'un déplacement intermodal

Résultats (2")

DÉPLACEMENTS PAR **VÉLO** (MODE DE MOBILITÉ ACTIVE)



- 13 participants (VGP) durant la semaine / week-end
 - Une exposition variable sur **un même trajet** (et en fonction des types de pistes cyclables)
 - Corrélations PM_{2.5} et NO₂

Résultats (2^{ème})


DÉPLACEMENTS PAR VÉLO / TRAMWAY

1^{er} point commun : La pollution environnante

- L'exposition individuelle de l'usage est fortement tributaire du tissu urbain vis-à-vis des tracés du "tramway" et/ou les voies cyclables.

2^{ème} point commun : Des interférences prévues entre

- Le développement des projets de "tramway" (i.e., exigences de mobilité et de densification)
- La préservation des espaces verts/naturels existants

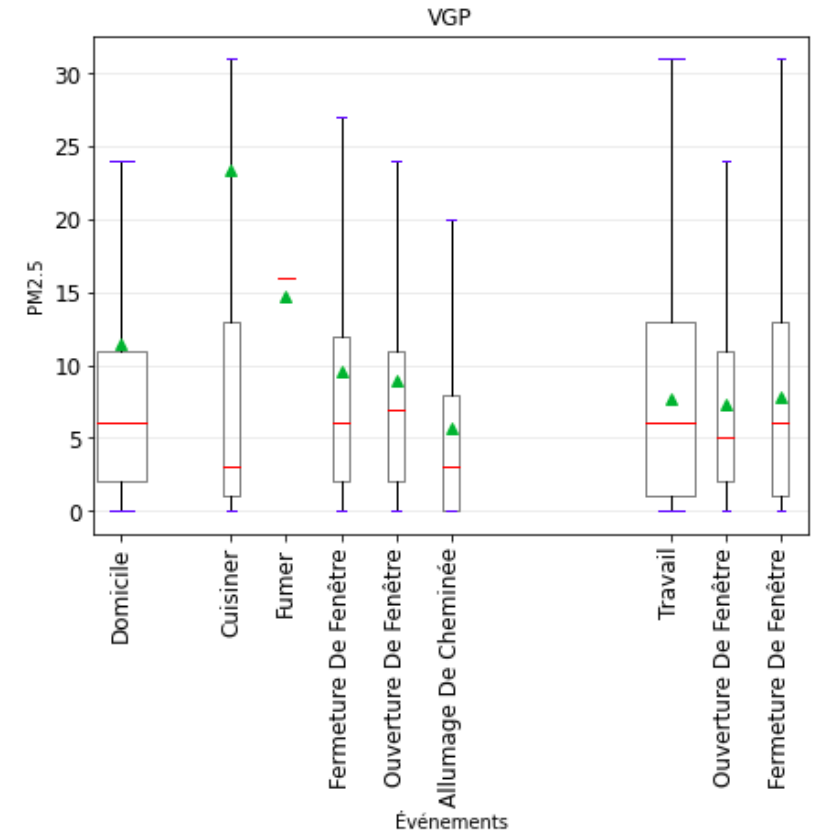
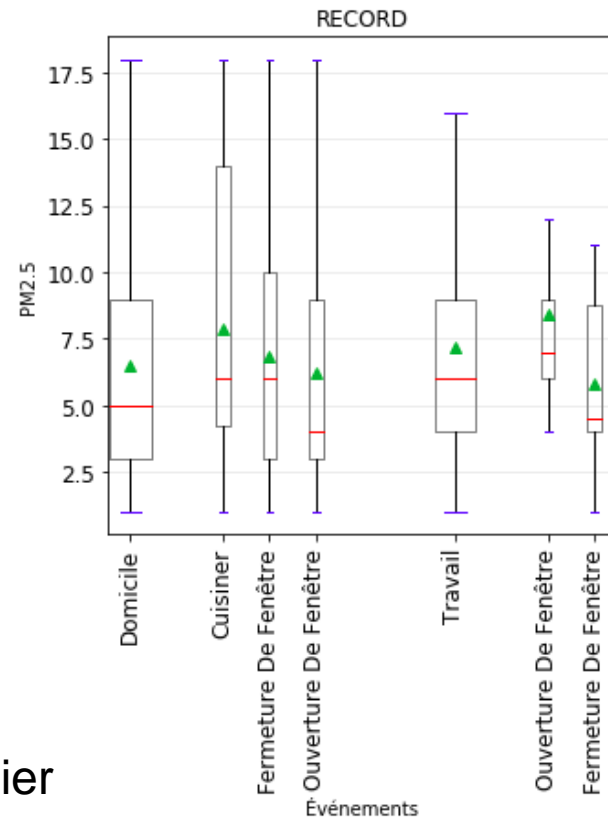


Autres-lieux de loisirs/promenade et itinéraires à faible exposition pour les cyclistes.

Résultats (3)

EXPOSITION AUX DOMICILE

- Activités/événements divers
 - Cuisine d'aliments (31p)
 - Tabagisme (12p)
 - Nettoyage intérieur
 - Allumage de cheminée (5p)
 - Effet saisonnier (automnal)
 - Ouvrir/fermer des fenêtres (34p)
 - Ventilation/chauffage (effet saisonnier estivale)
- Statut "dual" : polluer-victime

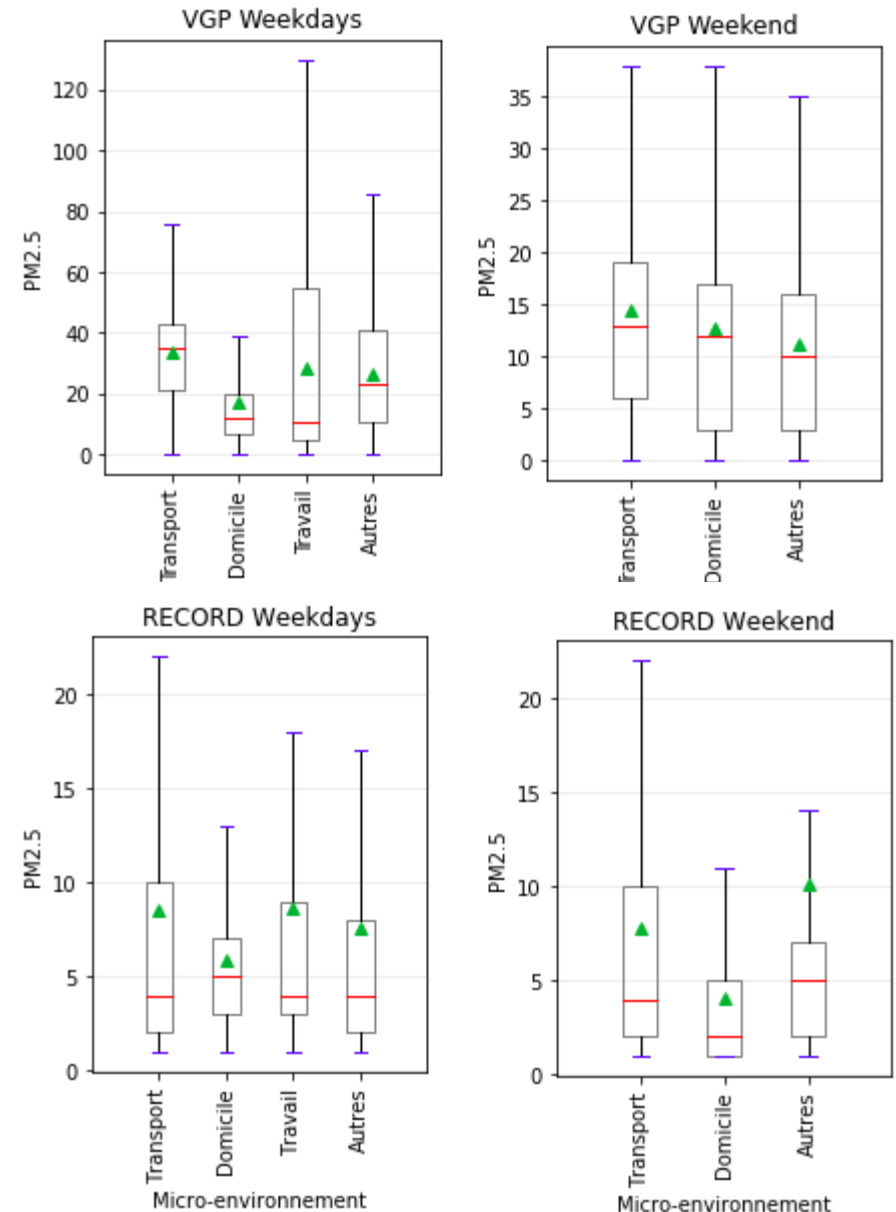


Résultats (4)

EXPOSITION JOURS DE LA SEMAINE/WEEK-END AUX PM_{2.5}

- Les effets de la (non) fréquentation du microenvironnement « travail »
- Week-end / jours de la semaine
 - Chez VGP et chez RECORD
 - La plus forte exposition moyenne concerne les « transport »
- Chez RECORD
 - la plus forte exposition moyenne concerne les « autres lieux »

....Se référer aux mesures d'intensité d'exposition (voir les prochaines parties de cette présentation)



Résultats (4')

QUELLE(S) CONCLUSIONS SUR LES EXPOSITIONS (ET LEURS VARIABILITÉS) ?

Configuration d'étalement urbain ?

Des valeurs plus élevées en $PM_{2.5}$ et BC dans les microenvironnements chez VGP

"transport" et "autres lieux"

Configuration densifiée ?

*Des valeurs plus variables en $PM_{2.5}$ et BC chez la cohorte RECORD

*Des pics de concentrations $PM_{2.5}$ et NO_2 avec la forte proximité aux infrastructures routières, transports en commun, aménagements cyclables/aires piétonnes

Effets sur les niveaux des expositions au "domicile"

Effets sur les niveaux des expositions intérieurs et extérieurs (crèches, écoles, hôpitaux, stades/terrains de sport, etc.)



Déplacement d'un individu (échelle d'une journée) par les transports en commun chez VGP

Des ZFE-mobilités, péages urbains, PDU, etc.

Un report modal (collectif ?)

Résultats (3) le temps passé dans les microenvironnements: le transport et autres

Des mesures qui incitent donc à la prudence quant à l'interprétation des valeurs moyennes pour ces microenvironnements. La question des allocations de temps et des lieux fréquentés

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 %

Des différences entre les deux cohortes pour les valeurs extrêmes.

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.

Des écart-types plus élevés pour la cohorte RECORD traduisent une plus forte hétérogénéité que pour la cohorte VGP.

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.

Concernant le microenvironnement "autres", la médiane demeure bien inférieure à la moyenne pour chacune des deux cohortes. On observe cette situation pour le microenvironnement "transport" dans la seule cohorte VGP.

Résultats (3) dispersion des mesures de concentration et diversités spatiales

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.

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 %

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.

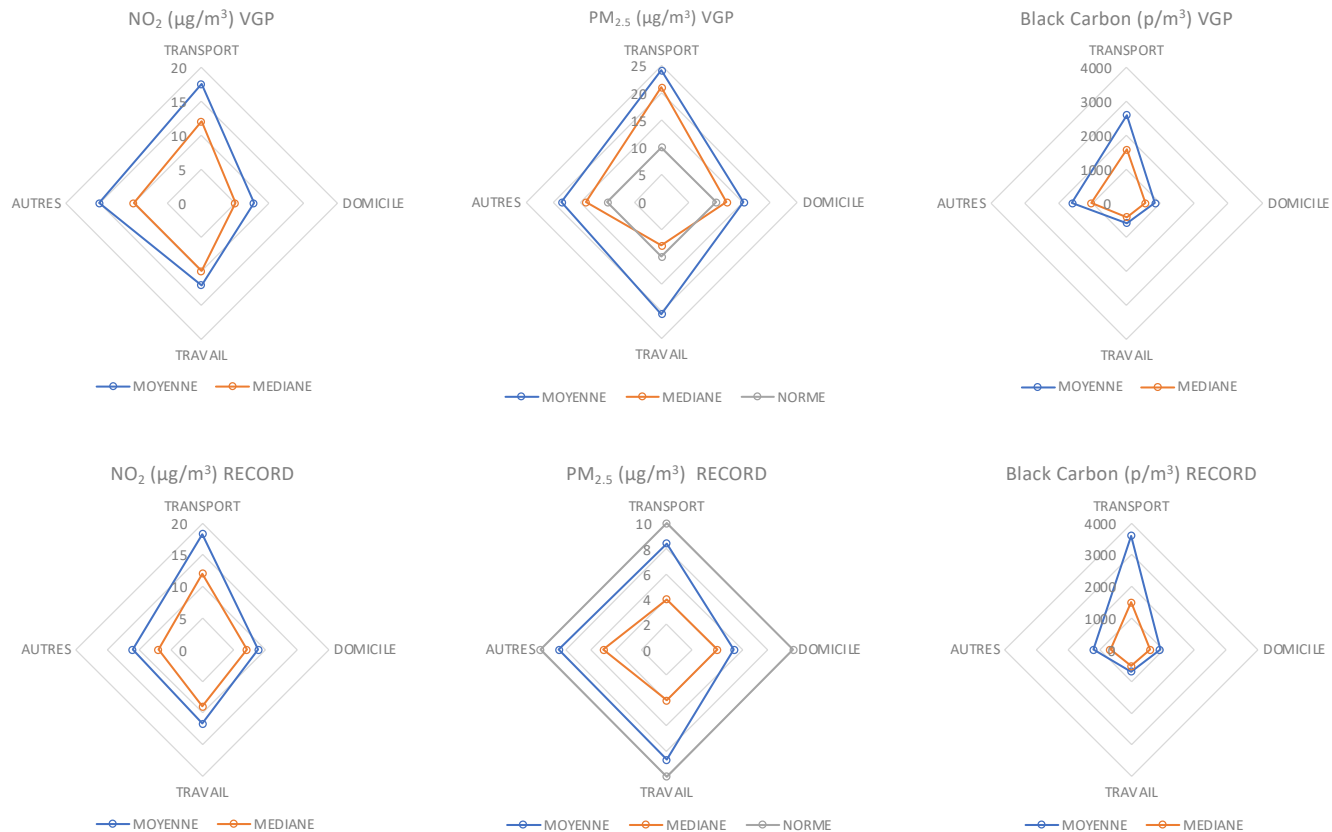
La diversité spatiale des lieux de travail fréquentés par les participants à RECORD, en petite couronne et dans Paris intra-muros mais aussi en grande couronne.

VGP et la dispersion des concentrations pour les trois polluants qui est plus importante pour le domicile.

Une plus grande hétérogénéité des caractéristiques des logements dans la Communauté de Versailles Grand Parc (maison avec cheminée, appartement en milieu très urbain, etc.).

Résultats (4) Une analyse synthétique des résultats

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



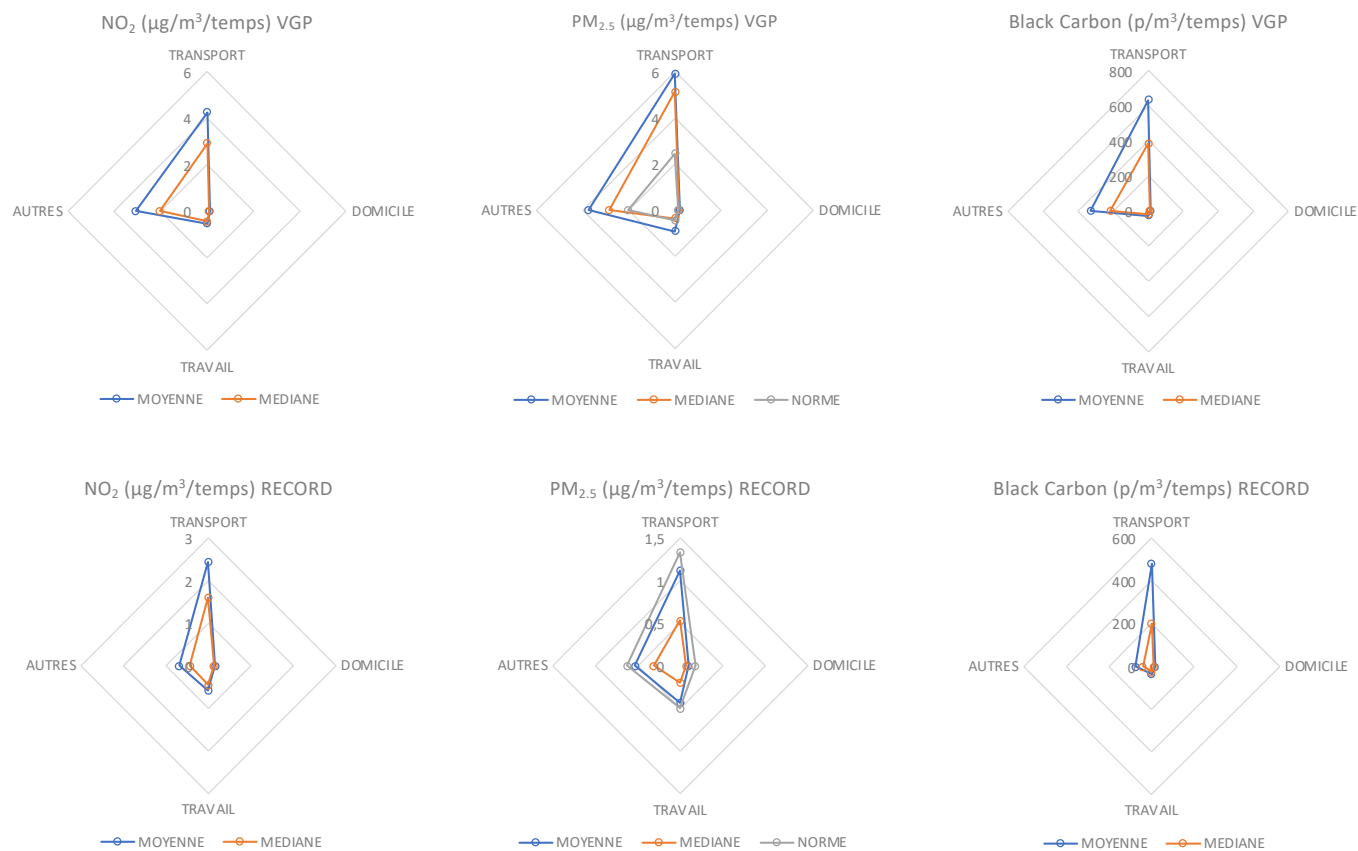
L'importance de certains microenvironnements et événements qui ont été quelque peu négligés dans la littérature sur la pollution de l'air.

La prudence dont on doit faire preuve quant à l'usage des valeurs moyennes dans l'exercice de mesure de la pollution.

L'importance d'une analyse par des mesures de seuil en lien notamment avec les valeurs médianes et des mesures d'intensité

Résultats (4) Une analyse par une mesure d'intensité de concentration

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



L'importance des autres lieux et du transport, ainsi que leur couplage, notamment durant le week-end, au travers des déplacements pour accéder aux autres lieux.

Mise en lisibilité de l'hétérogénéité des valeurs de concentrations à l'échelle de la cohorte en fonction des polluants et des microenvironnements.

Résultats (4) Une comparaison des moyennes et d'intensité relatives entre les microenvironnements et par polluant

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".

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

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.

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

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.

Quotients élevés lorsqu'il s'agit des mesures d'intensité notamment pour le microenvironnement "autres lieux",

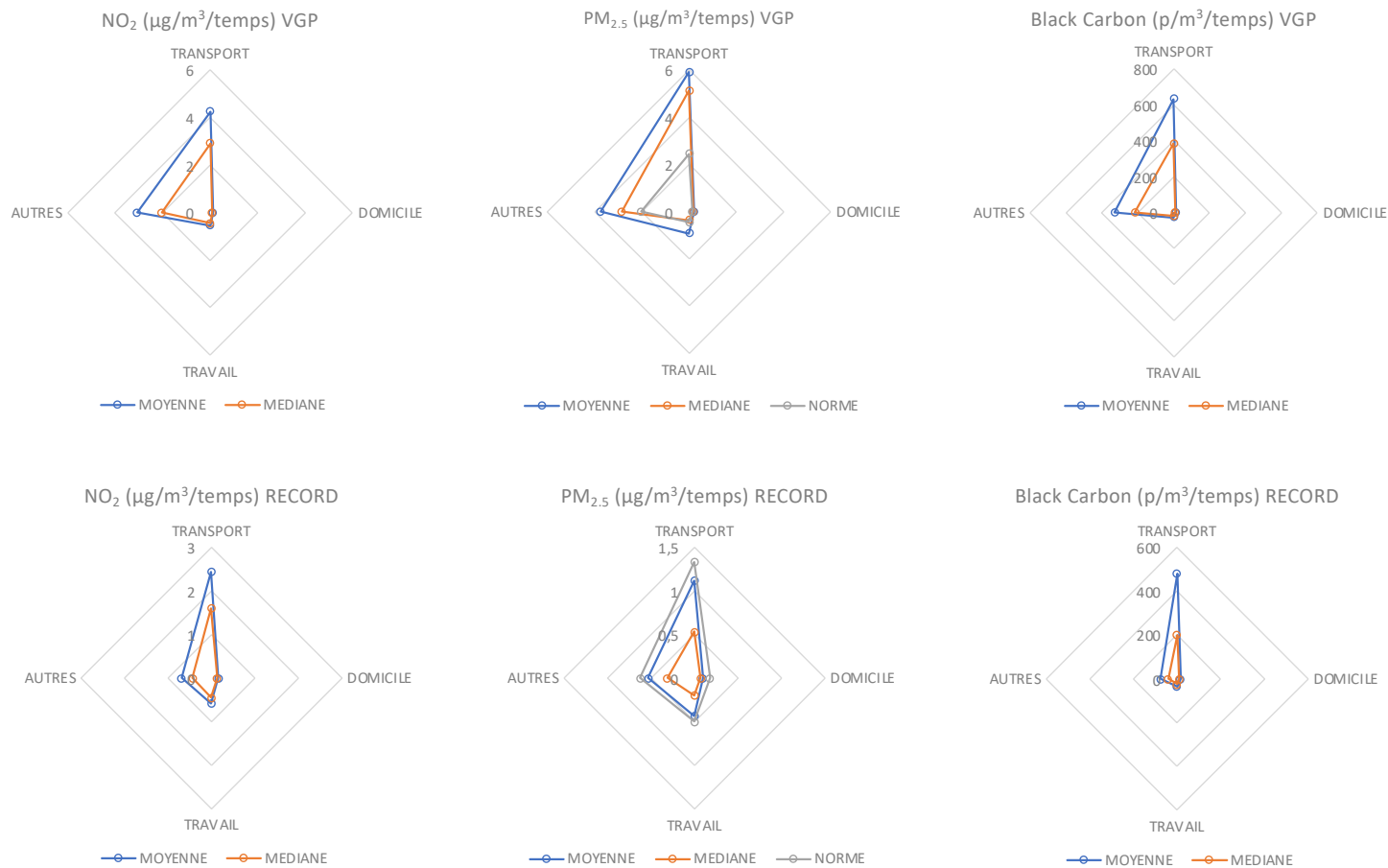
Lorsque l'on prend pour numéraires les valeurs relatives au microenvironnement "domicile", les quotients obtenus en matière d'intensité sont particulièrement élevés. Nous observons des valeurs encore plus élevées lorsqu'il s'agit des mesures d'intensité associées aux autres polluants étudiés.

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

On retrouve certains des résultats précédents, dans des proportions moindre pour la cohorte RECORD

Résultats (3) Une analyse par une mesure d'intensité de concentration

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



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 µg/m³.

En revanche, les microenvironnements "travail" et "domicile" révèlent une importance bien moindre, avec des intensités à hauteur de 1,29 µg/m³ et de 0,2 µg/m³.

Discussion générale

Quelles améliorations de la qualité de l'air en Île-de-France

Stratégies (individuelles/collectives) et conflits

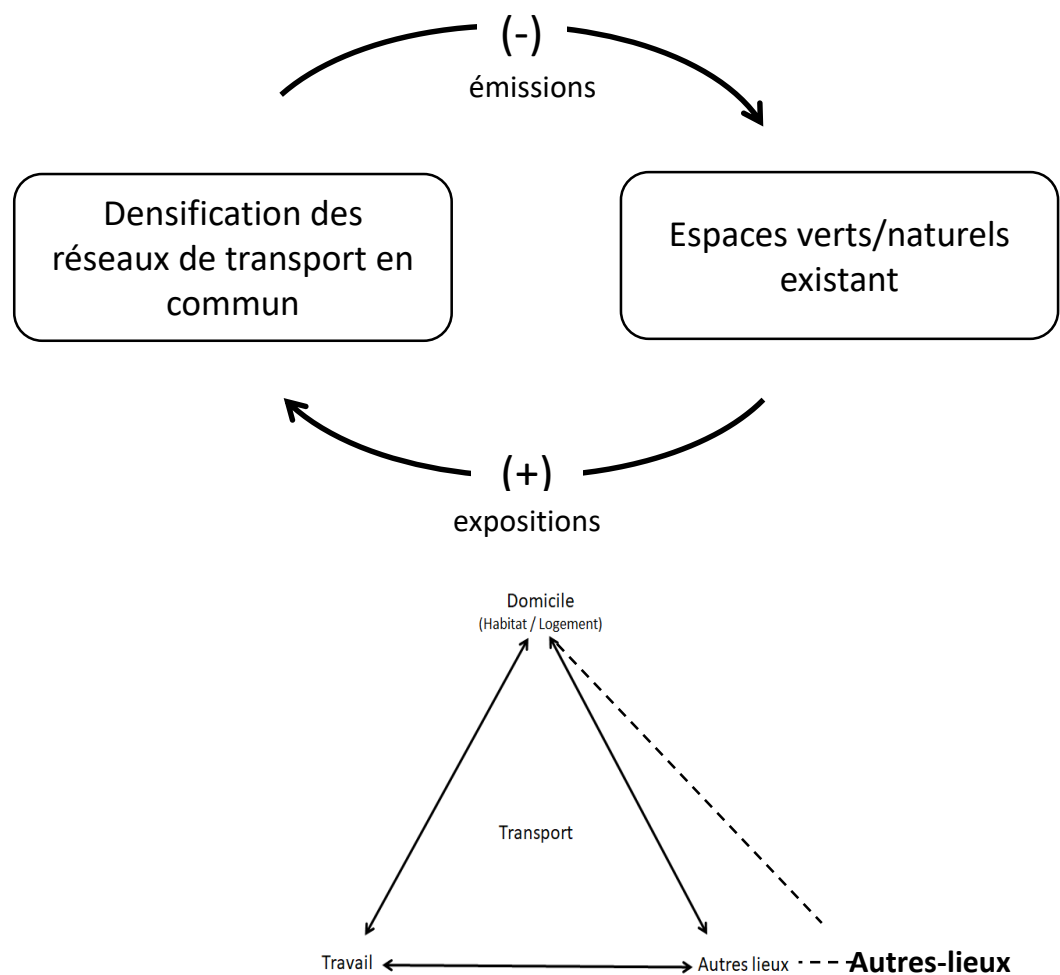
- des stratégies individuels d'abattement : Réduire ses propres émissions dans le microenvironnement "transport",
- Des stratégies individuels d'évitement : Réduire sa propre exposition dans les microenvironnements "transport" et "domicile".

« 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 aux cohortes).

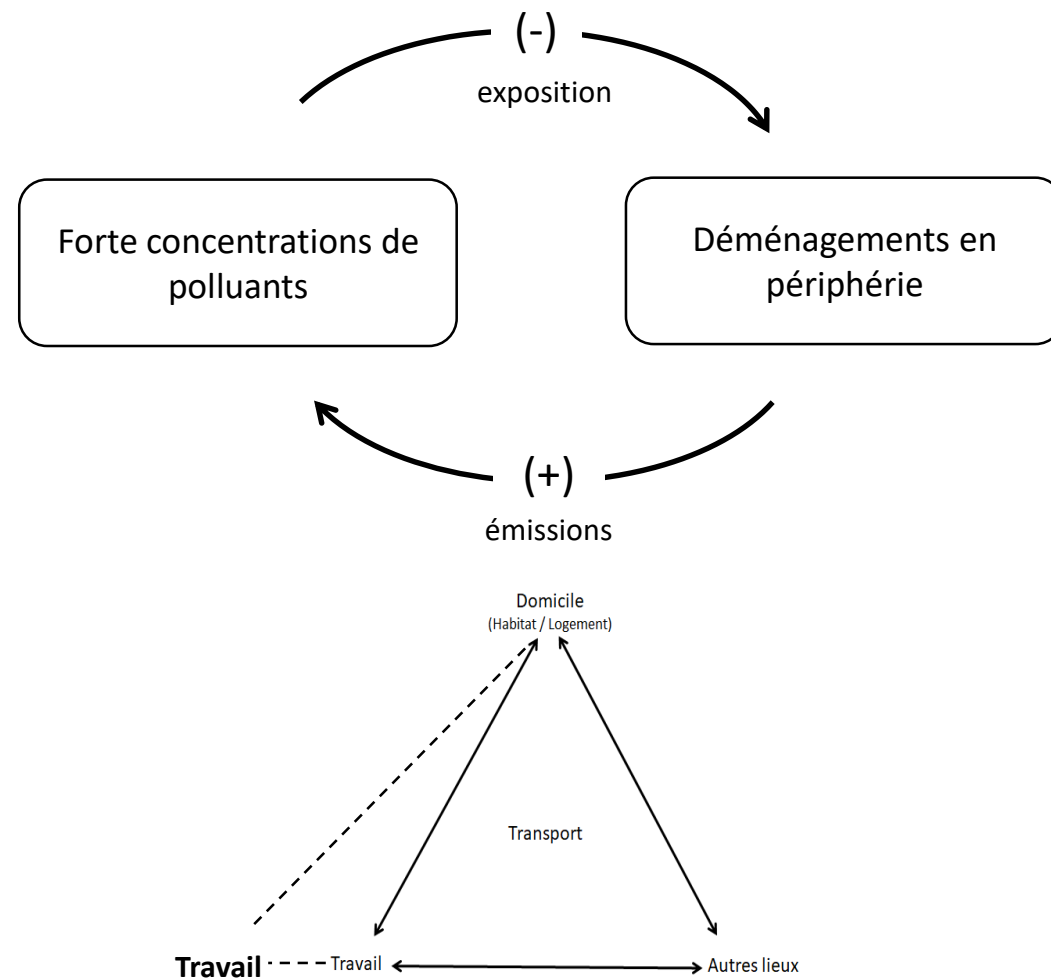
« J'habite dans le 78 et je travaille à Paris tous les jours, et je prends le train. C'est aussi des choix qu'on fait de s'éloigner de Paris. C'est clair que le fait de travailler à Paris ça augmente mon exposition » (participant aux cohortes).

Discussion générale

Rationalité collective



Rationalité individuelle



Discussion générale

L'outil « micro-capteur » en tant qu'éco-innovation

- Données spatio-temporelles contextualisés
- Profils d'exposition propres à chaque individu

Peut-on dresser des conclusions généralisables ?

- Identification précises des sources polluantes lors de déplacements
- Taux de dispersion des polluants

Réduire la dispersion des lieux (domicile, travail, autres lieux)

- ...Réduire l'usage de l'automobile (principale source d'émissions polluantes)
- ...Réduire le temps consacré aux déplacements quotidiens (durée d'exposition)

Arbitrages politiques des risques et des enjeux

- Actions individuelle et collective
- Priorité des enjeux climatiques et environnementaux puis... sanitaires dans les politiques urbaines
- Questionner la « ville de demain » et les processus de métropolisation (MGP)

Merci à vous

Pour plus d'information :

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: European Journal of Geography* [En ligne], Aménagement, Urbanisme. URL : <http://journals.openedition.org/cybergeo/39074>