

# UNIVERSITY OF OSLO

## Mesure de l'exposition individuelle à la pollution par des capteurs portables en Île-de-France

Entre difficultés et avantages sur les instruments de référence

Baptiste Languille

Séminaire Villes et qualité de l'air : expositions des populations et enjeux d'urbanisme - vendredi 25 novembre 2022



# La pollution de l'air : un mélange complexe et un problème sanitaire

## À l'échelle mondiale

→ 7 millions de décès prématurés par an<sup>[1]</sup>

## En France

→ Particules fines : 40 000 morts par an<sup>[2]</sup>

## Grande diversité de polluants

### Particules (PM)

Taille → PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>1</sub>

Technique → Carbone suie (BC)

Composition chimique → Aérosols organiques (AO)

Émission primaire ou secondaire → Aérosols organiques secondaires (AOS)

### Gaz

Natures chimiques variées :

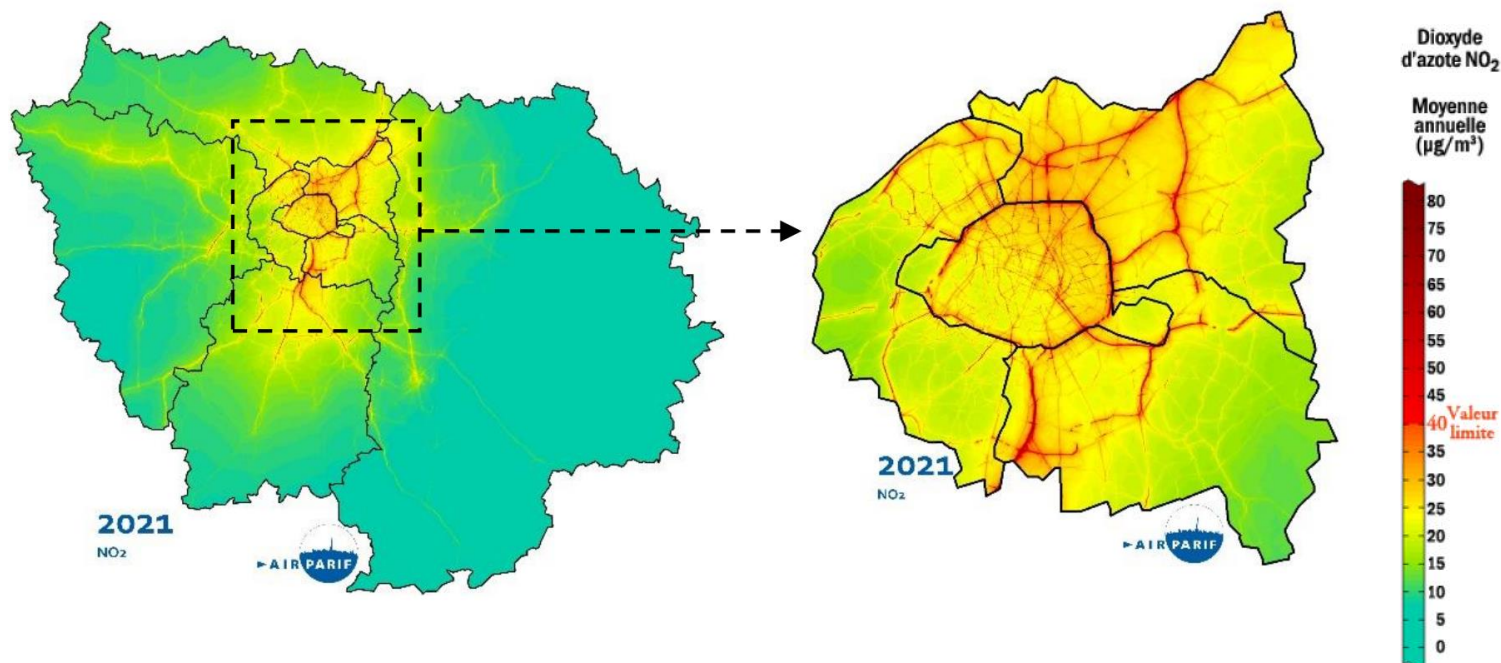
- Composés organiques volatils (COV)
- Oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>) = NO<sub>2</sub> + NO
- Ozone (O<sub>3</sub>)

## Nécessité :

- de réduire les émissions et donc les niveaux de pollution
- de comprendre et mesurer l'exposition individuelle

# L'Île-de-France et ses polluants

- Région la plus peuplée
- Fortes hétérogénéités
- Polluants toujours préoccupants<sup>[1]</sup> :
  - Particules (PM), dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>), ozone (O<sub>3</sub>)
  - Dépassement OMS pour 95 % (PM), 100 % (NO<sub>2</sub> et O<sub>3</sub>) des Franciliens



**Gradients géographiques importants**  
**Fortes variations temporelles**  
**→ Quelle influence sur l'exposition individuelle ?**

# Comment caractériser l'exposition individuelle ?

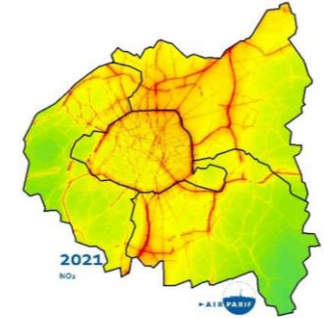
## Aujourd'hui en Île-de-France : Airparif



- Association agréée pour la surveillance de la qualité de l'air
- 70 stations fixes (PM, O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, benzène, etc.)
- Suivi temporel efficace de l'air extérieur
- Cartographie et prévision de la qualité de l'air par interpolation et modélisation

## Limites associées

- Cartes et rapports quotidiens/horaires, mesures fixes en extérieur uniquement
- Lacunes dans la mesure des gradients spatiaux
  - **Approche inadaptée pour mesurer l'exposition individuelle**



## Limites des capteurs

- Pas aussi précis que les instruments de références
- Interférences avec d'autres polluants et l'humidité
  - **Besoin d'une caractérisation robuste des capteurs pour connaître leurs performances**

## Les capteurs portables : une solution ?

- Petits et légers : portables toute la journée (air intérieur)
- « Bon marché » : possibilité de multiplier les exemplaires et couvrir une large zone
  - **S'approcher de la « vraie » exposition individuelle ?**

## La mesure de l'exposition individuelle par des capteurs en Île-de-France

- Exposition très élevée pour certains métiers et environnements : taxi, NO<sub>2</sub><sup>[1]</sup> ; boulanger, PM<sub>2.5</sub><sup>[2]</sup> ; transports, BC (pour des enfants)<sup>[3]</sup>

→ **Aucune étude représentative de l'ensemble des Franciliens**

# Questions de recherche

→ Comment choisir de manière objective des capteurs portables capables de mesurer l'exposition individuelle à la pollution ?

Rédaction d'un protocole de sélection et de qualification des capteurs

Mise en application de cette méthodologie

→ Quelle est l'exposition individuelle des Franciliens ?

Déploiement de campagnes de mesures (volontaires + capteurs)

Caractérisation de l'exposition individuelle (activité et environnement)

# Conception et utilisation d'une méthodologie de caractérisation de capteurs portables pour la mesure de l'exposition individuelle

Science of the Total Environment 708 (2020) 134698



Contents lists available at ScienceDirect

Science of the Total Environment

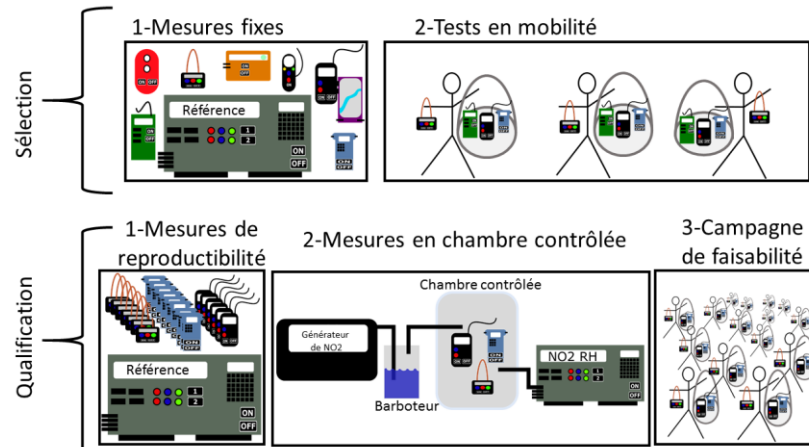
journal homepage: [www.elsevier.com/locate/scitotenv](http://www.elsevier.com/locate/scitotenv)



A methodology for the characterization of portable sensors for air quality measure with the goal of deployment in citizen science



Baptiste Languille<sup>a,\*</sup>, Valérie Gros<sup>a</sup>, Nicolas Bonnaire<sup>a</sup>, Clément Pommier<sup>a</sup>, Cécile Honoré<sup>b,1</sup>,  
Christophe Debert<sup>b</sup>, Laurent Gauvin<sup>b</sup>, Salim Srairi<sup>c</sup>, Isabella Annesi-Maesano<sup>d</sup>, Basile Chaix<sup>e</sup>,  
Karine Zeitouni<sup>f</sup>



# Le projet Agence Nationale de la Recherche ANR POLLUSCOPE



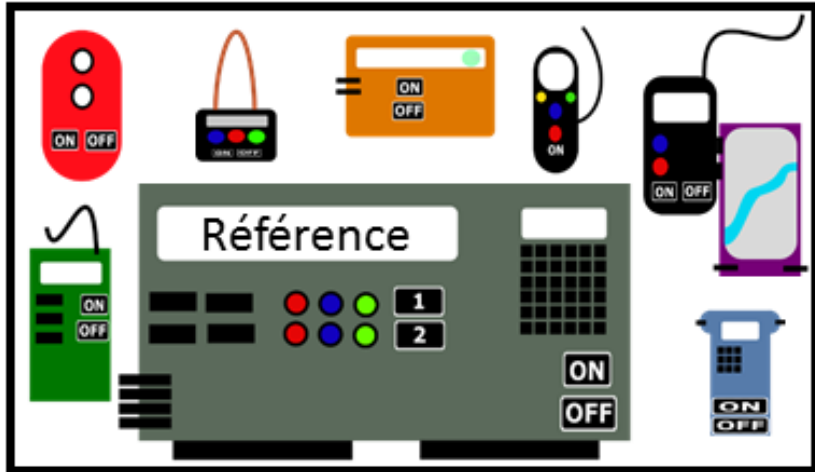
## Objectif : concevoir un observatoire participatif de la qualité de l'air en Île-de-France

1. Métrologie – Sélection et qualification des capteurs
  2. Santé – Étude sur des impacts de la pollution sur la santé
  3. Informatique – Plateforme de traitement et d'accès aux données
- Cahier des charges
    - Fiabilité
    - Poids (< 2 kg)
    - Prix
    - Autonomie (> 12 h)
    - Connectivité
    - Etc.
  - Étude bibliographique
  - 8 capteurs testés parmi une centaine disponibles commercialement (en 2017)
  - 7 polluants mesurés
    - Particules (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>1</sub>)
    - Ozone (O<sub>3</sub>)
    - Oxydes d'azote (NO, NO<sub>2</sub>)
    - COV<sub>tot</sub>
    - Carbone suie (BC)
    - Formaldéhyde



# Phase de sélection des capteurs - 2 étapes

## 1-Mesures fixes



- Mesures fixes en comparaison d'appareils de référence (station du SIRTA - ACTRIS)

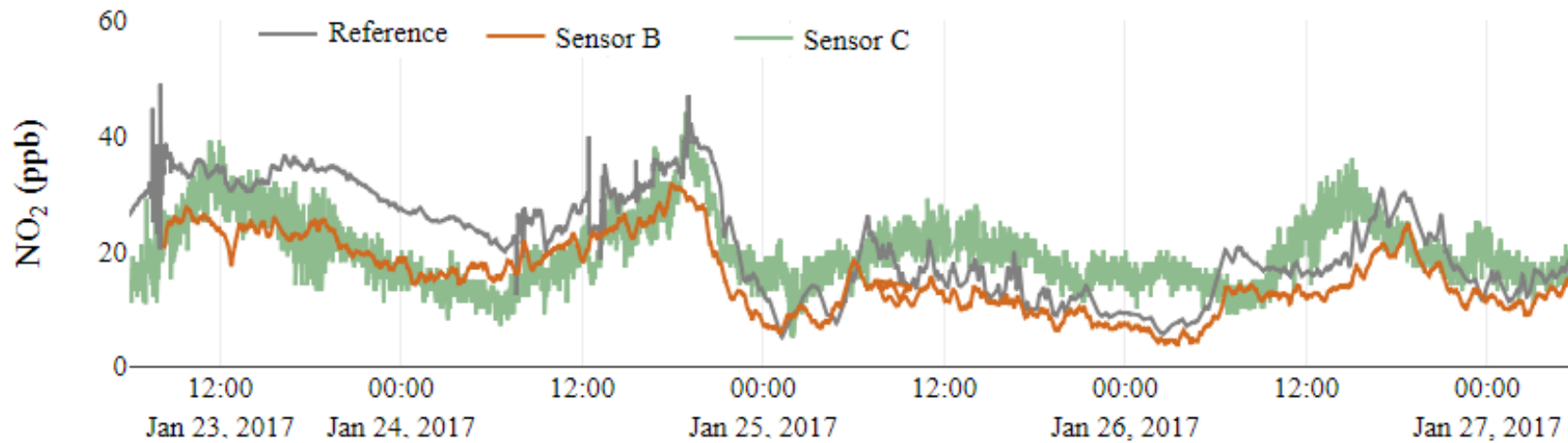
## 2-Tests en mobilité



- Mesures en mobilité
- 3 exemplaires de chaque capteur



# Phase de sélection - étape 1 : mesures fixes



➔ **Besoin d'un outil objectif et quantitatif**

- SET (Fishbain *et al.*, 2017) ➔ indice de performance (IPI) : moyenne de 7 paramètres

Sensor	Measure	Mean	Match	RMSE	Pearson	Kendall	Spearman	Presence	LFE	IPI
A	BC (ng.m <sup>-3</sup> )	1077	0,88	268,16	0,98	0,85	0,96	0,97	1,00	<b>0,91</b>
B	O <sub>3</sub> (ppb)	8	0,30	15,20	0,70	0,60	0,80	0,75	1,00	<b>0,46</b>
B	NO <sub>2</sub> (ppb)	11	0,46	5,33	0,94	0,72	0,89	0,78	1,00	<b>0,76</b>
C	NO <sub>2</sub> (ppb)	20	0,35	13,24	0,04	0,08	0,12	1,00	1,00	<b>0,42</b>
D	NO <sub>2</sub> (ppb)	47	0,24	36,72	0,54	0,54	0,73	0,67	1,00	<b>0,56</b>
B	PM <sub>10</sub> (ng.m <sup>-3</sup> )	104	0,43	111,81	0,18	0,20	0,26	0,81	0,99	<b>0,40</b>
E	PM <sub>10</sub> (ng.m <sup>-3</sup> )	535	0,37	1819,14	0,06	0,38	0,52	0,69	0,89	<b>0,07</b>
F	PM <sub>10</sub> (ng.m <sup>-3</sup> )	21	0,63	15,94	0,84	0,33	0,46	1,00	0,99	<b>0,64</b>
E	PM <sub>2,5</sub> (ng.m <sup>-3</sup> )	136	0,43	184,98	0,45	0,52	0,72	0,69	0,99	<b>0,49</b>
F	PM <sub>2,5</sub> (ng.m <sup>-3</sup> )	18	0,76	9,83	0,91	0,66	0,82	1,00	0,99	<b>0,80</b>
E	PM <sub>1</sub> (ng.m <sup>-3</sup> )	43	0,43	32,75	0,76	0,62	0,82	0,69	1,00	<b>0,65</b>
F	PM <sub>1</sub> (ng.m <sup>-3</sup> )	13	0,77	8,50	0,88	0,66	0,82	1,00	0,99	<b>0,78</b>

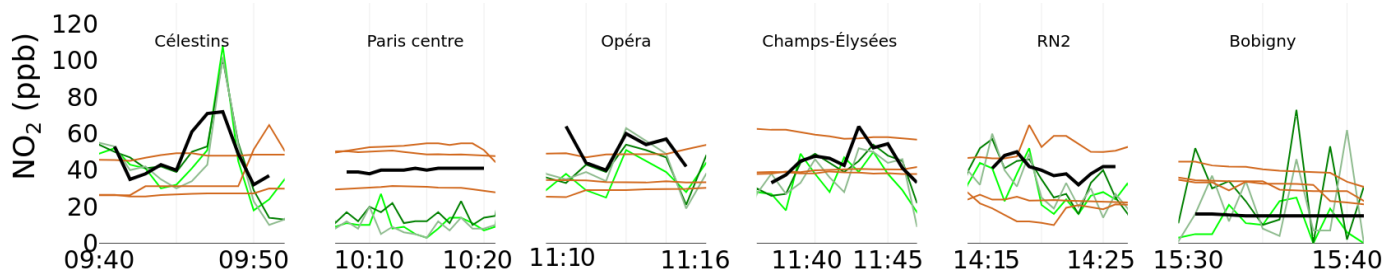
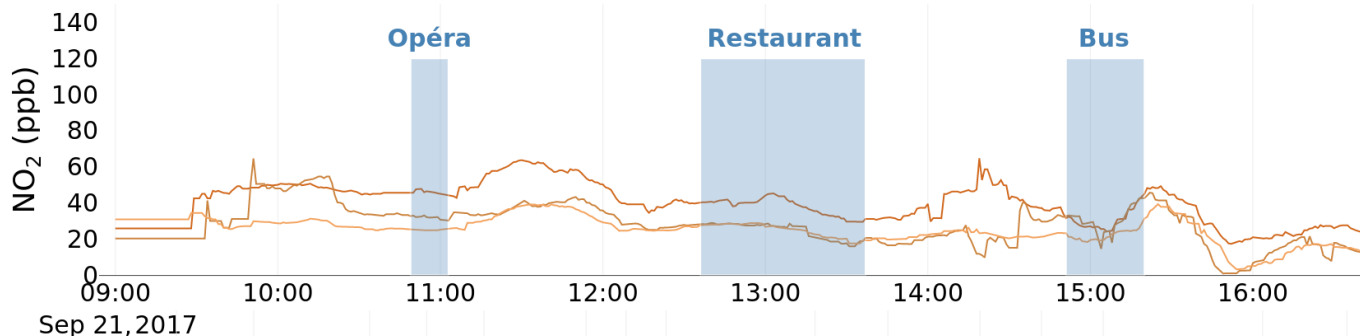
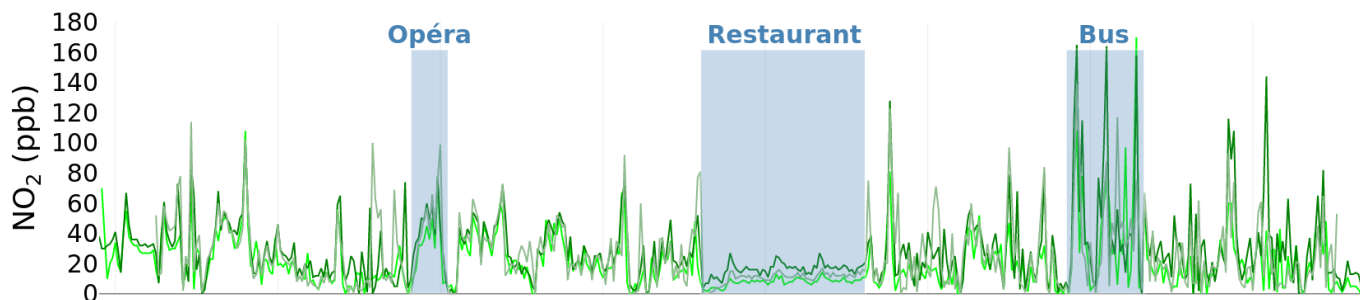
Capteurs retenus

Capteurs éliminés

➔ **Qualification objective des capteurs**

# Phase de sélection - étape 2 : tests en mobilité

- 3 exemplaires portés pendant 1 jour
- Itinéraire : différents environnements, proximité des stations fixes



- **Capteurs C**  
Bonne répétabilité  
Perception des changements d'environnements
- **Capteurs B**  
Mauvaise reproductibilité  
Mauvaise perception dynamique
- **Comparaison avec la station fixe**  
Bons accord et covariation  
Mauvaise covariation, écarts importants entre les exemplaires

# Conclusion de la phase de sélection

- 2 étapes



Mesures fixes



Mesures en mobilité

- 3 capteurs sélectionnés (pas de temps = 1 min)

AE51 - BC



Canarin - PM



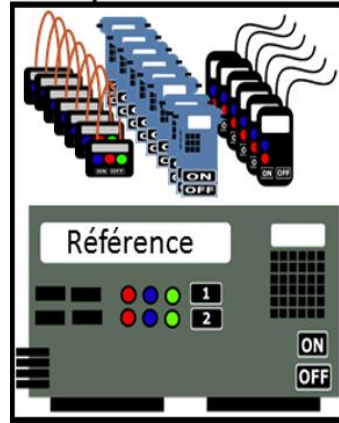
Cairclip - NO<sub>2</sub>



→ 3 capteurs sélectionnés à qualifier

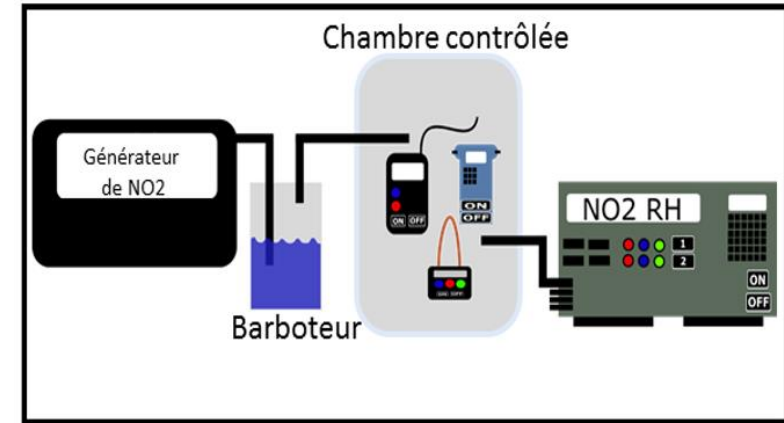
# Phase de qualification des capteurs - 2 étapes

## 1-Mesures de reproductibilité



- $\approx 15$  exemplaires/capteur en mesures fixes
- Comparaison à l'appareil de référence
- **Bonne reproductibilité, RMSE :**
  - BC  $\rightarrow 340 \text{ ng.m}^{-3}$
  - NO<sub>2</sub>  $\rightarrow 14 \text{ ppb}$
  - PM<sub>2.5</sub>  $\rightarrow 6 \text{ }\mu\text{g.m}^{-3}$

## 2-Mesures en chambre contrôlée



- Variations d'humidité relative (HR) et NO<sub>2</sub>
- **Réactivité temporelle satisfaisante NO<sub>2</sub> (0 - 200 ppb)**
- **Interférence HR (40 - 80 %) :**
  - BC  $\rightarrow \approx 200 \text{ ng.m}^{-3}$
  - NO<sub>2</sub>  $\rightarrow \approx 30 \text{ ppb}$
  - PM  $\rightarrow$  aucune (en absence de PM)
- **Invalidation en conséquence**

**$\rightarrow$  Déploiement des capteurs lors des campagnes de mesures**

# L'exposition individuelle au BC, PM et NO<sub>2</sub> des Franciliens mesurée par des capteurs portables



Article

## Personal Exposure to Black Carbon, Particulate Matter and Nitrogen Dioxide in the Paris Region Measured by Portable Sensors Worn by Volunteers

Baptiste Languille<sup>1,2</sup>, Valérie Gros<sup>2,\*</sup>, Bonnaire Nicolas<sup>2</sup>, Cécile Honoré<sup>3,4</sup>, Anne Kaufmann<sup>3</sup> and Karine Zeitouni<sup>5</sup>

Personal exposure is still not accurately measured today

Large campaigns involving 37 volunteers equipped 24/7 with portable sensors measuring BC, PM and NO<sub>2</sub>

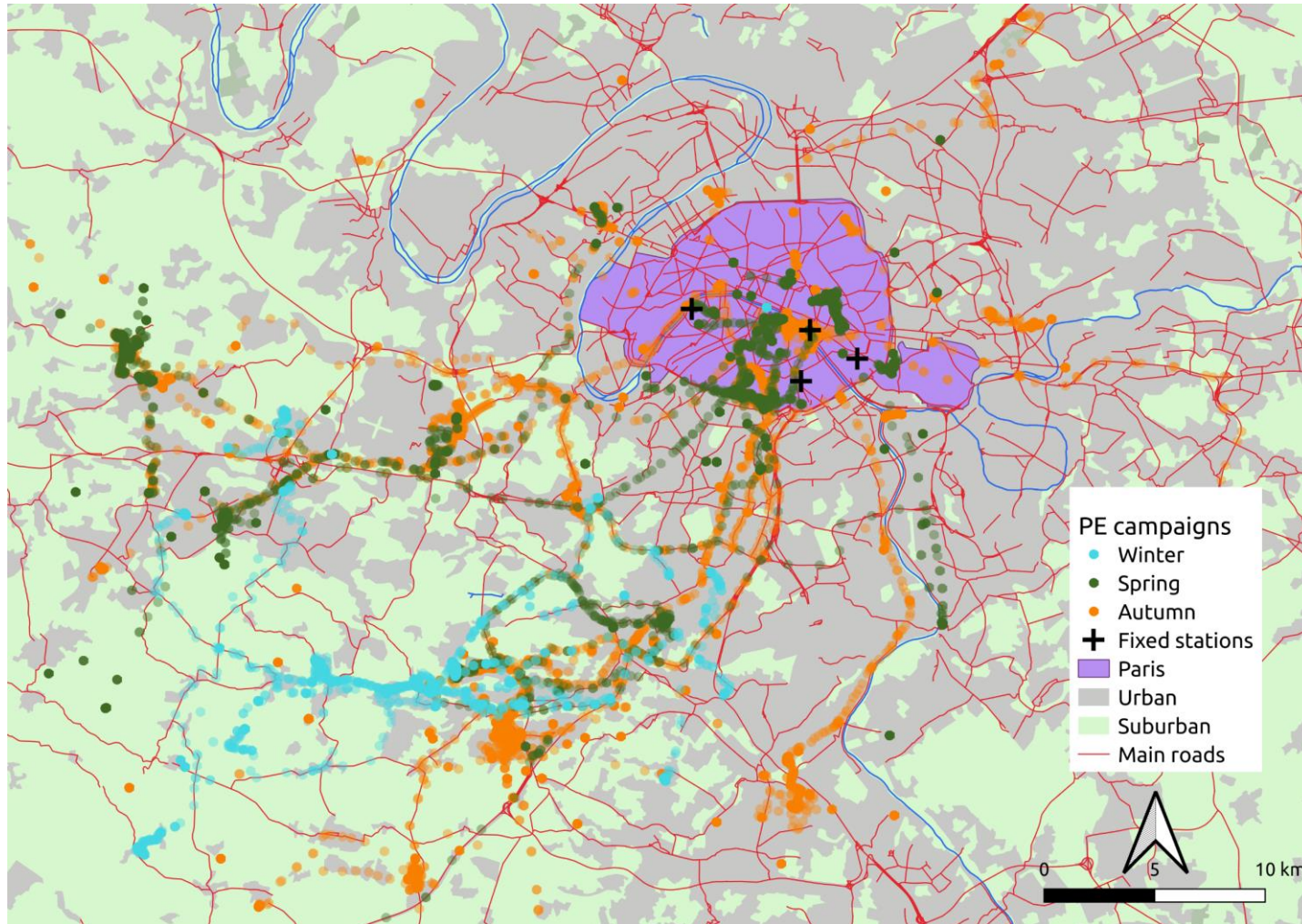
A few environments are responsible for large contributions to personal exposure

Up to:

34 % for BC	26 % for NO <sub>2</sub>	44 % for PM
-------------	--------------------------	-------------

Static ambient monitoring stations are not proper surrogate for personal exposure measurement

# Trois campagnes de mesures impliquant 37 volontaires



## ■ Campagnes (> 10<sup>6</sup> mesures) :

Printemps 18-22 juin 2018

Automne 19-26 nov. 2018

Hiver 15 jan.-17 mars 2019

## ■ Chaque volontaire (anonyme) :

- 1 Canarin (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>1</sub>)
- 1 Cairclip (NO<sub>2</sub>)
- + AE51 (BC) (6 exemplaires)

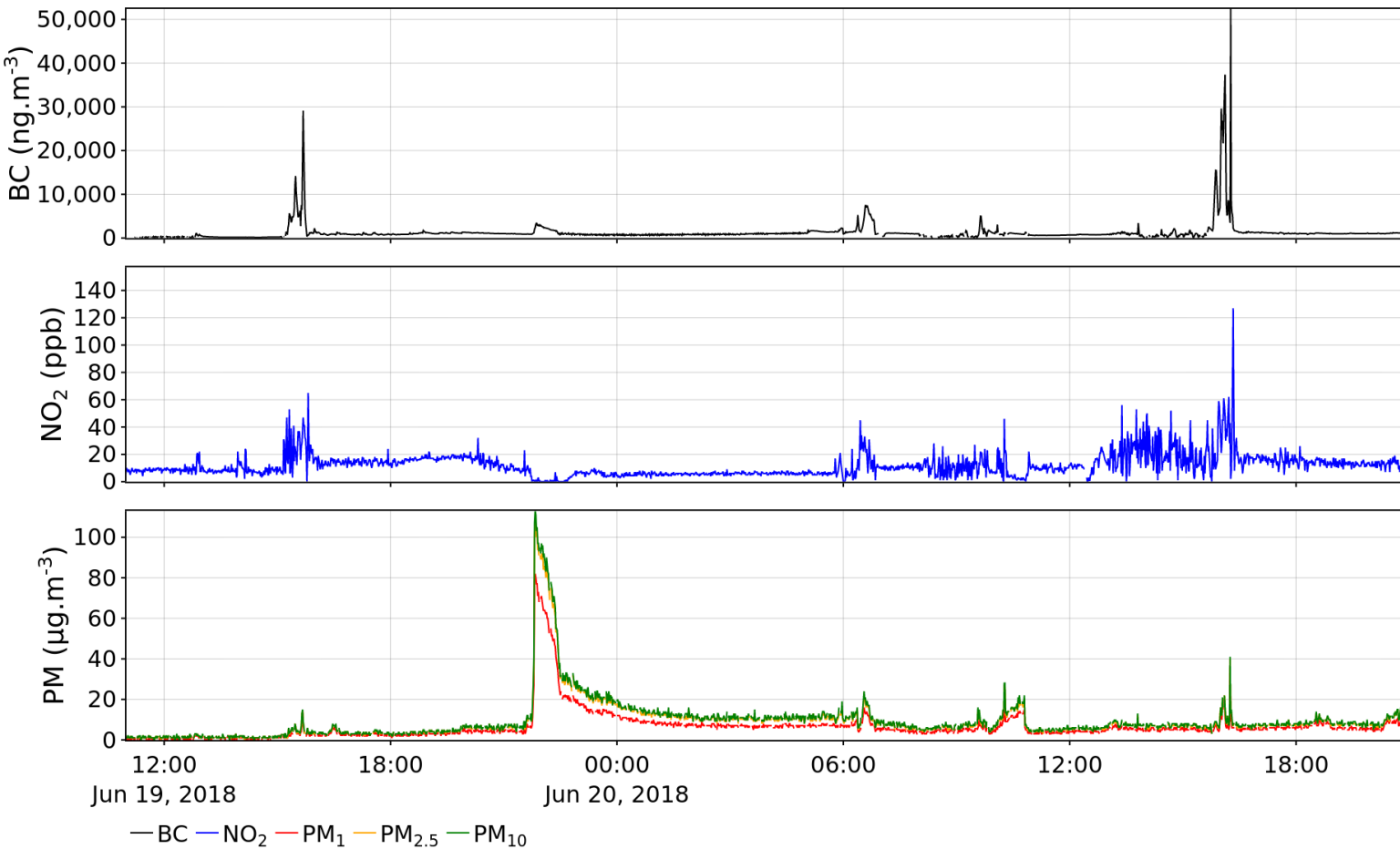
## ■ Invalidation des données aberrantes

- Traitement manuel
- Données négatives
- Artefact dû à l'humidité
- Nombre : quelques milliers
- Pourcentage : ≈ 1 %

➔ Jeu de données validées, complétude élevée (jusqu'à > 80 %)

# Exemple d'exposition individuelle

Volunteer AH



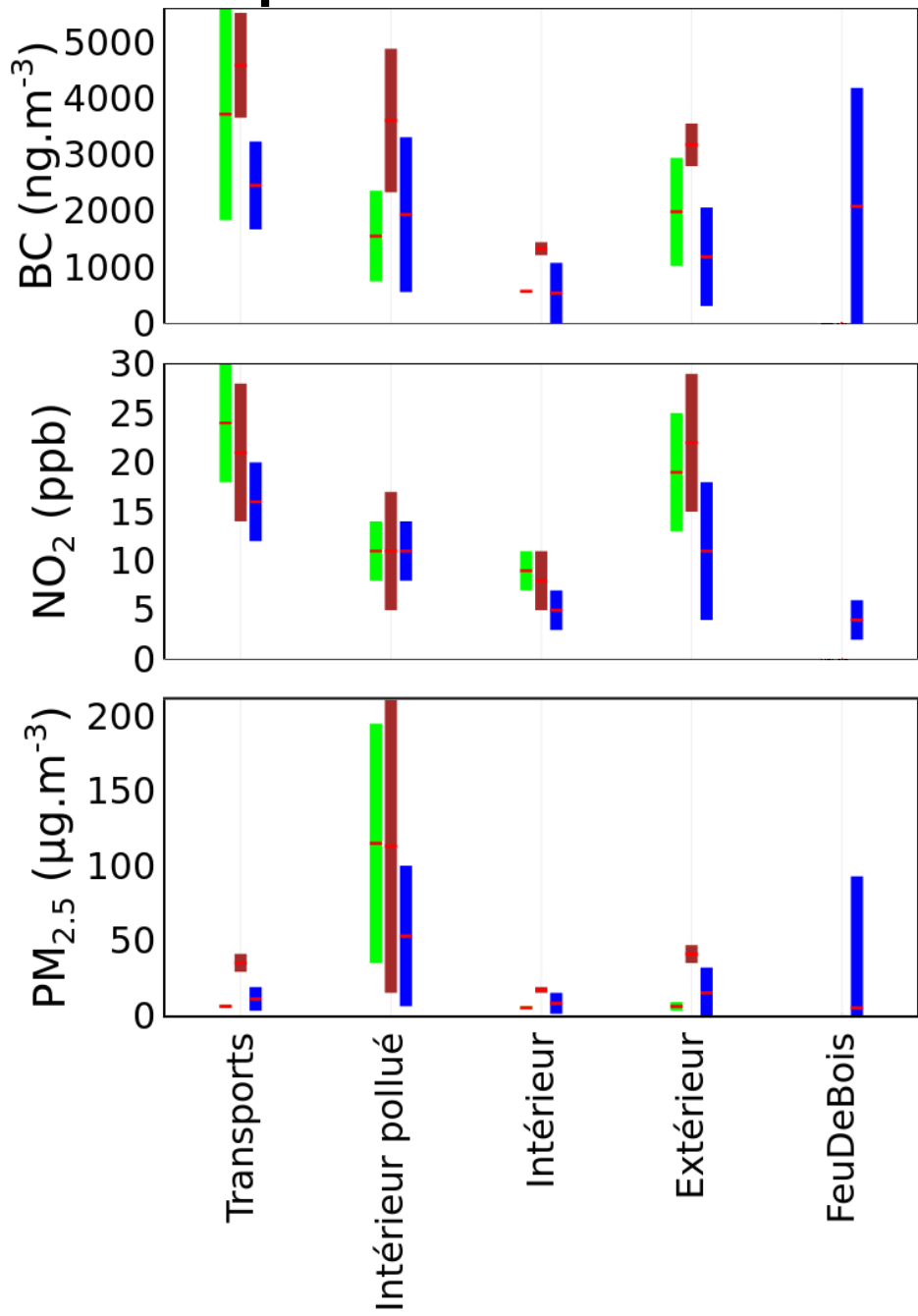
- Variations typiquement observées
- Influence des environnements
- Hypothèses sur leurs identifications

- Emplois du temps renseignés
- 5 environnements identifiés :
  - Transports
  - Intérieur
  - Intérieur pollué
  - Extérieur
  - Feu de bois

➔ Calcul systématique des expositions pour chaque environnement

# Expositions par environnement

Exposition / environnement  
(printemps - automne - hiver)



Exposition BC : max. transports

Exposition PM : max. intérieur pollué

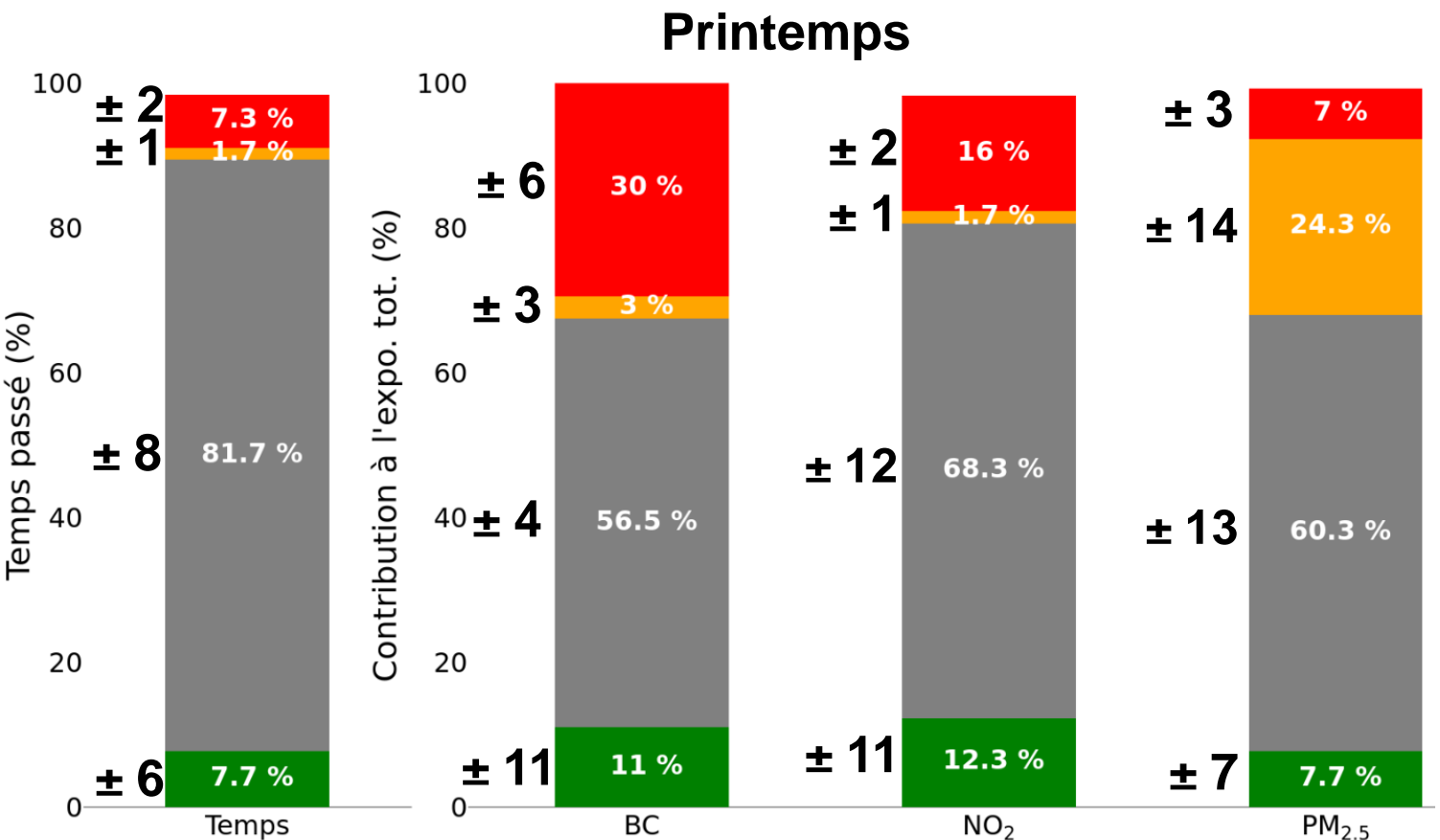
➔ Importance du temps passé dans chaque environnement

➔ Quid de la contribution des environnements ?



# Comparaison (moyenne par campagne)

$$Contribution_{Env.i} = \frac{Exposition_{Env.i}}{Exposition_{Totale}} \times \%Temps_{Env.i}$$



- Contribution **transports** BC & NO<sub>2</sub>
- Contribution **intérieur pollué** PM
- Variabilité importante entre les volontaires (**± écart-type**)

➔ **Pas pris en compte par les stations fixes**

# Des stations fixes pour mesurer l'exposition individuelle ?

- **Corrélation « station fixe » - « exposition » dans la littérature<sup>[1]</sup>**
  - R<sup>2</sup> élevé → station fixe comme approche de l'exposition individuelle
  - Comparaison difficile (≠ pas de temps, ≠ corrélations, moyenne des volontaires ?, etc.)
- **Calculs exhaustifs des corrélations**
  - R<sub>S</sub> & R<sub>P</sub>, moyenne 1 h & 1 jour, « fond urbain » - « moyenne des capteurs » & « capteurs individuels »

Campaign	Station	Pollutant	1-h Average				1-Day Average			
			rs	rp	In-vol. rs	In-vol. rp	rs	rp	In-vol. rs	In-vol. rp
Spring	Paris XIII <sup>e</sup>	BC	0.58	0.34	0.45, 0.74	0.23, 0.52	0.52	0.57	0.30, 0.90	0.29, 0.97
	Paris VII <sup>e</sup>	NO <sub>2</sub>	0.27	0.26	0.21, 0.47	0.14, 0.38	0.17	0.26	-0.70, 0.60	-0.49, 0.86
	Paris XII <sup>e</sup>	NO <sub>2</sub>	0.13	0.14	0.07, 0.47	0.05, 0.40	0.25	0.28	-0.30, 1.00	-0.24, 0.99
	Paris XIII <sup>e</sup>	NO <sub>2</sub>	0.19	0.24	0.07, 0.50	0.10, 0.51	0.25	0.30	-0.40, 1.00	-0.49, 1.00
	Paris IV <sup>e</sup>	PM <sub>2.5</sub>	0.51	0.12	0.15, 0.69	-0.14, 0.68	0.64	0.41	-0.20, 1.00	-0.51, 0.97
Autumn	Paris XIII <sup>e</sup>	BC	0.71	0.54	0.67, 0.79	0.51, 0.66	0.74	0.68	0.48, 0.95	0.49, 0.96
	Paris VII <sup>e</sup>	NO <sub>2</sub>	0.20	0.07	0.02, 0.52	-0.15, 0.49	0.07	0.02	-0.38, 0.90	-0.33, 0.93
	Paris XII <sup>e</sup>	NO <sub>2</sub>	0.13	0.10	-0.16, 0.55	-0.13, 0.64	0.10	0.17	-0.94, 0.67	-0.77, 0.74
	Paris XIII <sup>e</sup>	NO <sub>2</sub>	0.15	0.06	-0.07, 0.38	-0.18, 0.45	0.10	0.04	-0.83, 0.62	-0.83, 0.60
	Paris IV <sup>e</sup>	PM <sub>2.5</sub>	0.58	0.30	0.15, 0.88	0.00, 0.76	0.56	0.36	0.48, 0.90	-0.36, 0.94
Winter	Paris XIII <sup>e</sup>	BC	0.59	0.35	0.28, 0.77	0.07, 0.56	0.70	0.68	0.29, 0.93	0.07, 0.92
	Paris VII <sup>e</sup>	NO <sub>2</sub>	0.16	0.23	-0.08, 0.48	-0.01, 0.53	0.35	0.40	0.10, 0.80	0.18, 0.67
	Paris XII <sup>e</sup>	NO <sub>2</sub>	0.07	0.15	-0.17, 0.43	-0.15, 0.42	0.30	0.40	-0.40, 0.71	-0.05, 0.69
	Paris XIII <sup>e</sup>	NO <sub>2</sub>	0.10	0.19	-0.07, 0.38	-0.04, 0.43	0.35	0.41	-0.40, 0.79	-0.20, 0.65
	Paris IV <sup>e</sup>	PM <sub>2.5</sub>	0.66	0.23	0.39, 0.84	-0.01, 0.79	0.55	0.38	-1.00, 0.97	-1.00, 0.95

- R<sup>2</sup> moyenne jour > heure
- Valeurs extrêmes dues au faible nombre de données
- Corrélations > littérature

→ Pertinence discutable de ce raisonnement et de l'utilisation des stations fixes pour mesurer l'exposition individuelle

[1]

# Limites, conclusions et perspectives

- Pas de mesures des COV, capteurs perfectibles → **Pollution intérieure, changement d'environnement**
- Peu d'emplois du temps renseignés, plateforme en développement + tablettes → **Meilleure identification des environnements**
- Représentativité et nombre des volontaires discutable → **Représentativités temporelle et personnelle accrues**

**Cf. Bouillon et al., en prép.**

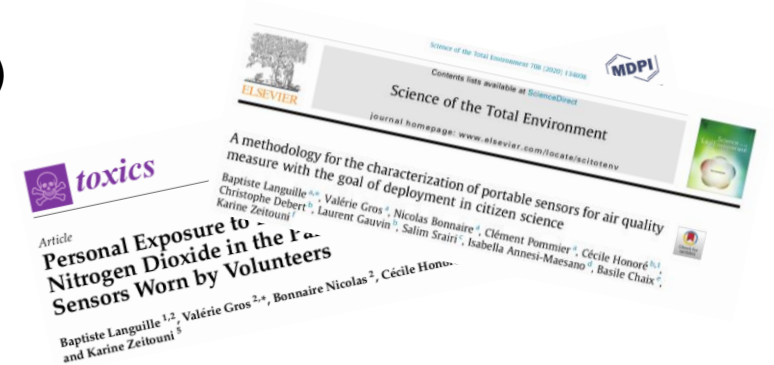
→ **1<sup>re</sup> mesure de l'exposition individuelle en Île-de-France (BC, NO<sub>2</sub>, PM)**

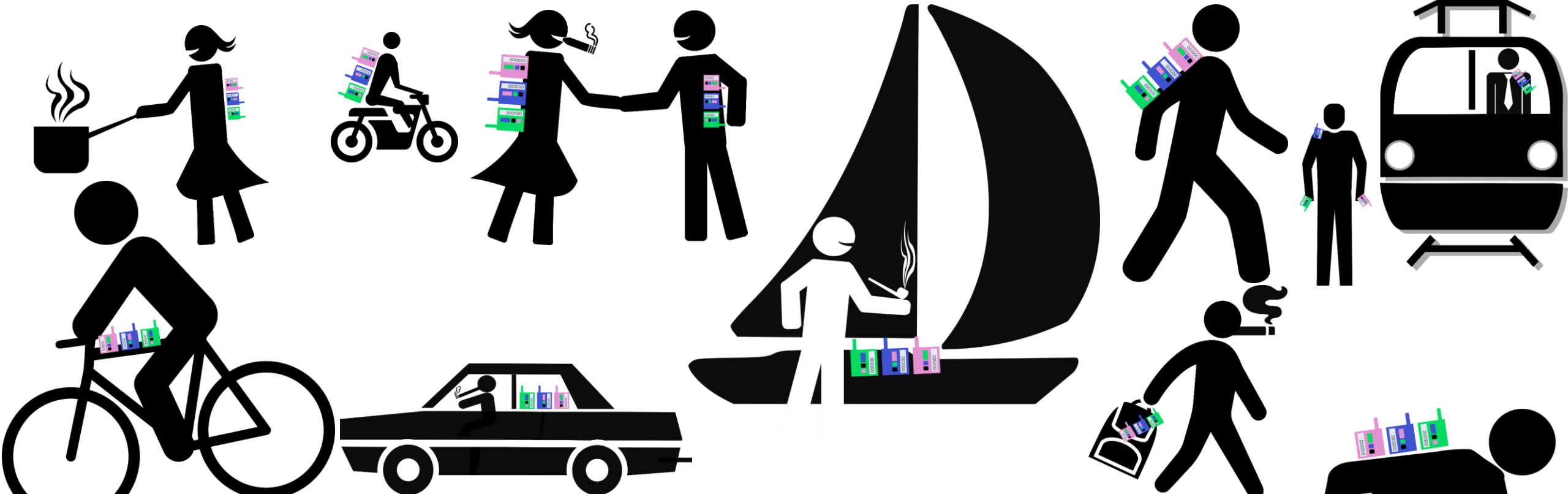
→ **Contributions importantes**

**Transports** (jusqu'à 34 % BC, 26 % NO<sub>2</sub>)

**Intérieur pollué** (jusqu'à 44 % PM<sub>2.5</sub>)

→ **Mise en évidence des lacunes de l'approche par les stations fixes**





**Merci de votre attention**

